



**Universidad del Desarrollo**  
Facultad de Ingeniería

MODELO INTEGRADO DE GESTIÓN DE RIESGOS PARA  
DEPÓSITOS DE RELAVES EN CHILE: UNA APROXIMACIÓN  
DESDE LA INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA Y EL MARCO  
REGULATORIO

LESLIE ISABEL VINET ESCOBAR

PROFESOR(ES) GUÍA: HÉCTOR VALDÉS GONZÁLEZ, PhD  
MAURICIO CALDERÓN NETTLE, PhD

PROYECTO DE GRADO PRESENTADO A LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA  
UNIVERSIDAD DEL DESARROLLO PARA OPTAR AL GRADO ACADÉMICO DE MAGÍSTER  
EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

SANTIAGO – CHILE  
2025



**Universidad del Desarrollo**  
Facultad de Ingeniería

MODELO INTEGRADO DE GESTIÓN DE RIESGOS PARA DEPÓSITOS DE  
RELAVES EN CHILE: UNA APROXIMACIÓN DESDE LA INGENIERÍA  
GEOLÓGICA, MINERA Y EL MARCO REGULATORIO

Por: LESLIE ISABEL VINET ESCOBAR

Proyecto de Grado presentado a la Comisión integrada por los profesores:

**PROFESORES GUÍA:** Héctor Valdés-González, PhD y Mauricio Calderón PhD

**PROFESOR INTEGRANTE 1:** Lorenzo Reyes Bozo, PhD (UDLA)

**PROFESOR INTEGRANTE 2:** José Luis Salazar, PhD (USACH)

**PROFESOR INTEGRANTE 3:** Paul Bosch, PhD (UDD)

Para completar las exigencias del Grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería en  
la Universidad del Desarrollo de Chile

Septiembre, 2025

Santiago, Chile

## DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD

Por medio de la presente, declaro que el trabajo titulado **MODELO INTEGRADO DE GESTIÓN DE RIESGOS PARA DEPÓSITOS DE RELAVES EN CHILE: UNA APROXIMACIÓN DESDE LA INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA Y EL MARCO REGULATORIO**, que presento a la Universidad del Desarrollo de Chile, es de mi autoría y no ha sido publicado previamente, ni está siendo considerado para publicación bajo otra filiación. En igual sentido, declaro que el trabajo de tesis y su contenido, son originales y que todos los datos y referencias a trabajos ya publicados con anterioridad han sido debidamente identificados, referenciados o citados en el documento, y que estas citas han sido incluidas en las referencias bibliográficas. Afirmo, asimismo, que los materiales presentados no se encuentran protegidos por derechos de autor; y en caso de que así lo estuvieran, me hago responsable de cualquier litigio o reclamo relacionado con la violación de derechos de propiedad intelectual, exonerando de toda responsabilidad a la Universidad del Desarrollo de Chile.

Finalmente, me comprometo a no someter este trabajo, a consideración en ninguna revista o congreso para publicación sin contar con la aprobación y haber pasado el debido proceso de revisión en Universidad del Desarrollo. En caso de que un artículo sea aprobado para su publicación, autorizo a la Universidad del Desarrollo a incluir dicho artículo en sus revistas, y a reproducirlo, editarlo, distribuirlo, exhibirlo y comunicarlo en el país y en el extranjero, por medios impresos, electrónicos, Internet o cualquier otro medio, para propósitos científicos y sin fines de lucro.

A handwritten signature in blue ink, consisting of several loops and a long horizontal stroke at the bottom.

LESLIE ISABEL VINET ESCOBAR

Firma

*Don't be afraid  
What you're mind conceals  
You should make a stand  
Stand up for what you believe  
And tonight we can truly say  
Together we're invincible...*

## AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mis más sinceros agradecimientos a todas aquellas personas e instituciones que hicieron posible la realización de este Magíster en Ciencias de la Ingeniería (MCI).

Agradezco profundamente al programa de Magíster por darme la oportunidad de ser parte de esta experiencia, brindarme apoyo y financiamiento para llevar a cabo este importante desafío académico, el cual me ha permitido adquirir herramientas valiosas para fortalecer mi aporte profesional.

Gracias a los profesores del programa por su dedicación y exigencia, los cuales contribuyeron significativamente a mi desarrollo académico. En especial, al director del programa, Dr. Paul Bosh, por su liderazgo y compromiso con la formación de profesionales íntegros y con visión de futuro.

Agradezco al Dr. Mauricio Calderón (PhD), a quien le tengo un profundo aprecio y quien inicialmente me propuso participar en este programa —aunque en un comienzo no se concretó—, pero con quien igualmente compartimos en el proyecto MASA. Gracias por su apoyo, su orientación y sus conocimientos durante todos estos años. Mucho éxito en tus futuros proyectos.

También expreso mi más sincero agradecimiento al Dr. Héctor Valdés (PhD), por su constante apoyo y confianza en mí durante esta etapa, por la motivación de continuar con este proyecto, brindándome orientación cuando más lo necesitaba. Le agradezco profundamente por su calidad humana, generosidad y por estar presente cuando sentí que no podría continuar. Más allá de ser un excelente profesional, es una gran persona, comprometida con sus estudiantes y con mi proceso académico.

A los miembros de la comisión, Dr. Lorenzo Reyes y Dr. José Luis Salazar, por su valioso tiempo y sus aportes a esta investigación, los cuales enriquecieron significativamente el desarrollo de este trabajo.

A Rocío Nettle, coordinadora del programa, gracias por tu disposición, acompañamiento y buena voluntad en todo momento. Tu labor fue fundamental para que todo funcionara.

A mis amigos y compañeros del programa, gracias por cada conversación, cada risa y compañía durante este proceso. Compartir esta etapa con ustedes la hizo más llevadera y significativa.

A ti, Nacho, por tu apoyo, cariño incondicional y por estar siempre a mi lado, incluso en esos momentos en que más necesitaba una palabra sincera.

A mi querido Gaspito, a quien extraño tanto... siempre estarás conmigo.

Finalmente, agradezco a mi familia: a mi mamá, mi papá y mis hermanas Karen, Mari y Eve, quienes me han acompañado con su amor y apoyo incondicional en cada etapa de este camino. Gracias a ustedes encontré la fuerza y motivación para seguir adelante.

Un agradecimiento especial a mi mamá, quien siempre ha creído en mí sin importar las circunstancias. Gracias por tu amor constante, por apoyarme en cada decisión, buena o mala, y por quererme siempre. Este logro también te pertenece.

# Modelo Integrado de Gestión de Riesgos para Depósitos de Relaves en Chile: Una Aproximación desde la Ingeniería Geológica, Minera y el Marco Regulatorio

LESLIE ISABEL VINET ESCOBAR

Bajo la supervisión de los profesores Héctor Valdés-González, PhD y Mauricio Calderón PhD en la Universidad del Desarrollo de Chile

## Resumen

A pesar de los avances tecnológicos en la minería, Chile carece de modelos de gestión de riesgos para depósitos de relaves, lo que dificulta la prevención y mitigación eficaz de riesgos estructurales y ambientales. El objetivo de este estudio es desarrollar un modelo integrado de gestión de riesgos para depósitos de relaves en Chile, que combine la ingeniería geológica y minera con un marco regulatorio actualizado para la mejora de la seguridad y mitigación de los impactos ambientales. La investigación se basa en un enfoque mixto. Cualitativamente, a través de 10 entrevistas semiestructuradas a ingenieros y geólogos expertos, académicos y profesionales del rubro de la minería, seleccionados intencionadamente dentro de la industria minera chilena para determinar cómo y porque se debe mejorar el actual modelo de gestión de riesgos. Cuantitativamente a través de 303 encuestas que evaluaron el marco regulatorio vigente, la propuesta de un nuevo decreto regulatorio y las variables claves que se deben considerar en la gestión de riesgos de relaves. Los datos analizados sugieren que el marco regulatorio propuesto es coherente con el modelo integrado de gestión de riesgos propuesto y que por ello facilita su implementación al considerar diferentes niveles de riesgo, tipos de depósitos y características geomecánicas. Alineándose con la opinión de expertos y la normativa, permitiendo una toma de decisiones más efectiva, con énfasis en la seguridad ambiental y comunitaria. Se concluye que el modelo proporciona una herramienta robusta y coherente para la gestión de riesgos en depósitos de relaves, al integrar la experiencia técnica, el marco regulatorio vigente, y la gestión de variables claves que mejoran la capacidad de prever y mitigar riesgos estructurales y ambientales.

**Palabras clave:** Relaves, geomecánica, minería, gestión de riesgos, regulación, impacto ambiental.

## HIGHLIGHTS

### Modelo Integrado de Gestión de Riesgos para Depósitos de Relaves en Chile: Una Aproximación desde la Ingeniería Geológica, Minera y el Marco Regulatorio

LESLIE ISABEL VINET ESCOBAR

- Desarrolla modelo integrado de gestión de riesgos de depósitos de relaves en Chile
- Utiliza entrevistas semiestructuradas y encuestas para mejora de modelo conceptual
- Considera muestra con 10 entrevistas y 303 encuestas a profesionales mineros
- Explicita niveles de riesgo, tipos de depósitos y características geomecánicas
- Integra experiencia técnica, en mitigación de riesgos estructurales y ambientales

## Tabla de contenido

1	Introducción.....	11
1.1	Breve discusión de la literatura.....	13
1.2	Modelo de gestión de riesgos: Novedad, propuesta y contribución.....	17
1.3	Objetivos de la investigación.....	18
2	Metodología.....	19
2.1	Aproximación cualitativa.....	19
2.1.1	<i>Instrumento cualitativo: Entrevistas</i> .....	20
2.2	Aproximación cuantitativa.....	23
2.2.1	<i>Instrumento cuantitativo: Encuesta</i> .....	25
3	Resultados.....	31
3.1	Análisis de resultados cualitativos.....	31
3.1.1	<i>Hallazgos claves detectados</i> .....	35
3.2	Análisis de resultados cuantitativos.....	36
3.2.1	<i>Hallazgos claves detectados</i> .....	46
3.3	Discusión de resultados cualitativos.....	47
3.4	Discusión de resultados cuantitativos.....	49
3.5	Modelo propuesto.....	53
3.5.1	<i>Contraste entre el enfoque regulatorio actual y el modelo de gestión de riesgos</i> .....	57
3.6	Validación del modelo.....	59
3.6.1	<i>Realización del grupo focal y validación participativa</i> .....	59
3.6.2	<i>Principales aportes del grupo focal, opiniones expertas y participativa</i> .....	60
4	Conclusiones.....	61
4.1	Trabajos futuros.....	64
5	Referencias.....	65
6	Anexo 1: Revisión de plagio.....	71
7	Anexo 2: Artículo propuesto desde esta tesis.....	72

## Tabla de figuras

<i>Figura 1: Relaves en Chile (fuente: Elaboración propia)</i> .....	13
<i>Figura 2: Mapa conceptual de la revisión de la literatura (fuente: Elaboración propia)</i> .....	15
<i>Figura 3: Estructura del estudio propuesto y proceso de selección de resultados (fuente: Elaboración propia)</i> .....	19
<i>Figura 4: Modelo de generación del estudio cuantitativo (encuesta) desde el estudio cualitativo (fuente: Elaboración propia)</i> .....	23
<i>Figura 5: Caracterización general de los encuestados: Cargo actual de los participantes. (fuente: Elaboración propia)</i> .....	36
<i>Figura 6: Caracterización general de los encuestados: Años de experiencia en la industria minera. (fuente: Elaboración propia)</i> .....	37
<i>Figura 7: Caracterización general de los encuestados: Tipo de operación minera en la que trabajan principalmente. (fuente: Elaboración propia)</i> .....	37
<i>Figura 8: Percepción de riesgos relacionados con los depósitos de relaves: Significancia del riesgo de falla estructural en los depósitos de relaves. (fuente: Elaboración propia)</i> .....	38
<i>Figura 9: Percepción de riesgos relacionados con los depósitos de relaves: Percepción del riesgo ambiental asociado a los depósitos de relaves. (fuente: Elaboración propia)</i> .....	39
<i>Figura 10: Percepción de riesgos relacionados con los depósitos de relaves: Factores críticos para la estabilidad de los depósitos de relaves (Fuente: Elaboración propia)</i> .....	39
<i>Figura 11: Evaluación del marco normativo chileno sobre depósitos de relaves: Adecuación del marco regulatorio para asegurar la seguridad de los depósitos de relaves. (fuente: Elaboración propia)</i> .....	40
<i>Figura 12: Evaluación del marco normativo chileno sobre depósitos de relaves: Principales limitaciones del marco regulatorio vigente en la gestión de relaves. (fuente: Elaboración propia)</i> ....	41
<i>Figura 13: Evaluación del marco normativo chileno sobre depósitos de relaves: Necesidad de fortalecer la normativa en áreas de monitoreo geotécnico y ambiental. (fuente: Elaboración propia)</i>	41
<i>Figura 14: Evaluación del uso de tecnologías en la gestión de relaves: Implementación de tecnologías de monitoreo en las operaciones mineras. (Fuente: Elaboración propia)</i> .....	42

<i>Figura 15: Evaluación del uso de tecnologías en la gestión de relaves: Tecnologías más efectivas para la gestión de relaves. (Fuente: Elaboración propia)</i> .....	43
<i>Figura 16: Evaluación del uso de tecnologías en la gestión de relaves. Efectividad de las tecnologías de monitoreo en la prevención de desastres. (Fuente: Elaboración propia)</i> .....	43
<i>Figura 17 Medidas de mitigación y sostenibilidad en la gestión de relaves: Prácticas de mitigación empleadas en la operación minera. (fuente: Elaboración propia)</i> .....	44
<i>Figura 18: Medidas de mitigación y sostenibilidad en la gestión de relaves: Suficiencia de las prácticas de mitigación para la seguridad de las comunidades cercanas. (fuente: Elaboración propia)</i> .....	45
<i>Figura 19: Medidas de mitigación y sostenibilidad en la gestión de relaves. Compromiso de la industria minera chilena con la sostenibilidad en la gestión de relaves. (fuente: Elaboración propia)</i> .....	45
<i>Figura 20: Modelo integrado de gestión de riesgos (fuente: Elaboración propia)</i> .....	56

## Tabla de datos

<i>Tabla I: Muestra para el estudio cualitativo (fuente: Elaboración propia)</i> .....	20
<i>Tabla II: Categorías del estudio (fuente: Elaboración propia)</i> .....	22
<i>Tabla III: Cuadro comparativo: DS n° 248 vs modelo de gestión de riesgos de relaves (fuente: Elaboración propia)</i> .....	57
<i>Tabla IV: Muestra de expertos y académicos del grupo focal (fuente: Elaboración propia)</i> .....	59

# 1 Introducción

La gestión de riesgos en depósitos de relaves representa uno de los desafíos más críticos para la industria minera en Chile, donde la estabilidad estructural e impacto ambiental están en constante evaluación (posición geográfica mostrada en figura 1). A pesar de los avances tecnológicos y el marco regulatorio vigente, persiste la necesidad de un modelo integrado que combine datos geológicos, procesos mineros y la percepción experta para mitigar eficazmente los riesgos asociados. Estudios recientes señalan que, incluso con estándares actualizados como el *Global Industry Standard on Tailings Management*, muchos países, incluido Chile, enfrentan brechas en la aplicación operativa de buenas prácticas y sistemas de alerta adecuados (Cox et al., 2022). Esta investigación, desde una mirada de la revisión bibliográfica (figura 2), propone el desarrollo de un modelo de gestión que permita la toma de decisiones informadas con capacidad de respuesta anticipada, utilizando la experticia de profesionales que emplean diversas tecnologías y tipos de modelado para esta problemática. Así, se busca la mejora de la seguridad estructural y sostenibilidad ambiental, garantizando la protección de las comunidades cercanas a los depósitos (Piciullo et al., 2022; Lupo, 2019).

Para contextualizar la necesidad de un modelo integrado en Chile, es pertinente revisar cómo otros países mineros han abordado la gestión de riesgos en depósitos de relaves.

A nivel internacional, diversos países mineros han desarrollado modelos integrados de gestión de riesgos que abarcan todo el ciclo de vida de los depósitos de relaves. En Canadá, el marco Towards Sustainable Mining (TSM) incorpora evaluación de riesgos, auditorías externas, monitoreo continuo y participación comunitaria desde el diseño hasta el cierre. Australia aplica el Tailings Management Framework y los lineamientos de Leading Practice Sustainable Development, que integran estabilidad geotécnica, variabilidad climática y revisiones independientes. En Europa, países como Finlandia y Suecia avanzan hacia modelos basados en economía circular, centrados en el reprocesamiento, la reducción de residuos y la estabilidad química del material depositado.

Los principales modelos internacionales de gestión de relaves incluyen el estándar global GISTM, que define principios para diseño, operación y cierre; el marco TSM, enfocado en gobernanza y verificación independiente; los lineamientos australianos, orientados a estabilidad geotécnica y monitoreo climático; y enfoques europeos basados en economía circular. Estos referentes permiten fundamentar la necesidad de un modelo integrado adaptado al contexto operativo y regulatorio chileno.

En contraste, Chile presenta un marco regulatorio fragmentado entre el DS 248 y otros instrumentos sectoriales, lo que evidencia la necesidad de avanzar hacia un modelo integrado adaptado a su realidad geotécnica y operacional, como el propuesto en esta investigación.

Los avances tecnológicos han mejorado significativamente las herramientas para evaluar riesgos geotécnicos y ambientales en depósitos de relaves. Modelos híbridos como FEM-MPM permiten simular con precisión fenómenos como la licuefacción y deformaciones sísmicas, especialmente relevantes en zonas como el norte de Chile (Sordo et al., 2024). Estas simulaciones se complementan con sistemas de monitoreo continuo que integran sensores en tiempo real, plataformas y modelos predictivos, facilitando la detección temprana de inestabilidades. Destacan también las técnicas satelitales como InSAR, capaces de registrar desplazamientos milimétricos en depósitos activos, cuya integración con análisis espectro-temporales ha permitido desarrollar sistemas de alerta temprana

que podrían anticipar colapsos como el de Brumadinho con semanas de antelación (Das et al., 2024; Raspini et al., 2024).

En el plano ambiental, estas tecnologías contribuyen a detectar filtraciones, acumulación de agua y generación de drenaje ácido, fenómenos frecuentes en relaves abandonados o sin contención adecuada. Este drenaje puede liberar metales pesados que afectan ecosistemas sensibles como humedales altoandinos y cuerpos de agua subterráneos, con consecuencias para la biodiversidad y comunidades cercanas. Recientemente, se ha demostrado la utilidad del *machine learning* aplicado a imágenes satelitales multispectrales (Sentinel-2, WorldView-3) para mapear zonas contaminadas y estimar indicadores como el pH del agua en lagunas impactadas (Chalkley et al., 2023). Este tipo de monitoreo contribuye no solo a prevenir fallas estructurales, sino también a anticipar impactos ecológicos de alto costo social (Park et al., 2019).

Estos avances demuestran que es posible transitar desde una gestión reactiva a una preventiva y predictiva, siempre que exista una integración adecuada entre tecnologías, capacidades técnicas y marcos regulatorios coherentes. En este contexto, la presente investigación propone un modelo integrado que articule las dimensiones geológicas, tecnológicas y normativas, con el fin de mejorar la capacidad del país para gestionar los riesgos estructurales y ambientales asociados a los depósitos de relaves. La propuesta busca ser aplicable y adaptable a distintos contextos mineros, promoviendo decisiones oportunas y técnicamente fundamentadas, en línea con los desafíos de la sostenibilidad y la seguridad comunitaria.



Figura 1: Relaves en Chile (fuente: Elaboración propia)

## 1.1 Breve discusión de la literatura

### *Depósitos de relaves: Teoría y definiciones*

Un depósito de relave puede definirse como un yacimiento minero secundario residual, compuesto por residuos del procesamiento de minerales valiosos como cobre (Cu), hierro (Fe), plata (Ag), oro (Au), plomo (Pb), molibdeno (Mo) y zinc (Zn), elementos característicos de la minería chilena. Estos minerales, presentes principalmente como sulfuros u óxidos, reflejan las condiciones geológicas de presión, temperatura y composición química que dieron origen al yacimiento original (Aracena & Triviño, 2019).

En la industria minera, el material extraído de las minas se clasifica como mineral o desecho (relave). Los desechos se envían a instalaciones de almacenamiento, mientras que los minerales son procesados para obtener el producto principal deseado; el material restante de este proceso también se considera relave (Morrison, 2022).

Desde un punto de vista geoquímico, estos depósitos contienen partículas finas de sulfuros metálicos, silicatos y óxidos de hierro, que al ser expuestos generan drenaje ácido y pueden liberar metales

pesados como Fe, Cu y Zn (Lindsay et al., 2015). Este proceso modifica la mineralogía original del depósito, generando fases secundarias que pueden actuar como fuentes o barreras para la contaminación.

Además, se ha demostrado que los relaves incluso tras haber permanecido almacenados durante décadas continúan evolucionando geoquímicamente: los relaves sumergidos favorecen la precipitación de fases secundarias, mientras que los depositados al aire libre tienden a la oxidación y liberación continua de contaminantes, lo que evidencia la necesidad de considerar su comportamiento a largo plazo. Las especies de azufre disueltas y la mineralogía de relaves históricos bajo condiciones redox variables, demuestra cómo la heterogeneidad interna controla la movilidad de sulfuros y metales, y la generación de drenaje ácido en el tiempo (Moncur et al., 2015; Silva-Cáceres et al., 2024).

#### *Gestión de riesgos estructurales en relaves*

La gestión de riesgos estructurales en depósitos de relaves ha evolucionado gracias a la implementación de tecnologías geotécnicas avanzadas y modelos de monitoreo predictivo. Estudios recientes destacan la importancia de combinar evaluaciones geológicas con análisis de estabilidad en tiempo real, permitiendo la mitigación proactiva de riesgos (Cox et al., 2022).

La literatura enfatiza que un enfoque integrado, que considera tanto el marco regulatorio como las percepciones expertas, es clave para reducir la vulnerabilidad ante desastres ambientales y estructurales. Este enfoque no solo implica el cumplimiento de normas y estándares técnicos, sino también la incorporación del conocimiento práctico de profesionales en terreno, la participación de actores locales y el análisis multidisciplinario de riesgos que fortalece la capacidad de respuesta frente a eventos críticos, se mejora la planificación preventiva y se promueve una cultura de seguridad que va más allá del mero cumplimiento legal (Franks et al., 2011; Hudson et al., 2024).

Se ha demostrado monitoreo continuo con piezómetros y clinómetros, junto con un mantenimiento adecuado, es esencial para identificar de forma temprana riesgos de falla estructural en represas de relaves, especialmente aquellas construidas mediante el método aguas arriba, que presentan mayor vulnerabilidad ante sismos (Hou et al., 2024; Kossoff et al., 2014). Complementariamente, se han desarrollado modelos de control predictivo que combina técnicas de inteligencia artificial y optimización para pronosticar parámetros críticos de estabilidad, como presión de poros y tasas de deformación, facilitando una respuesta anticipada frente a posibles fallas estructurales (Ruan et al., 2023).

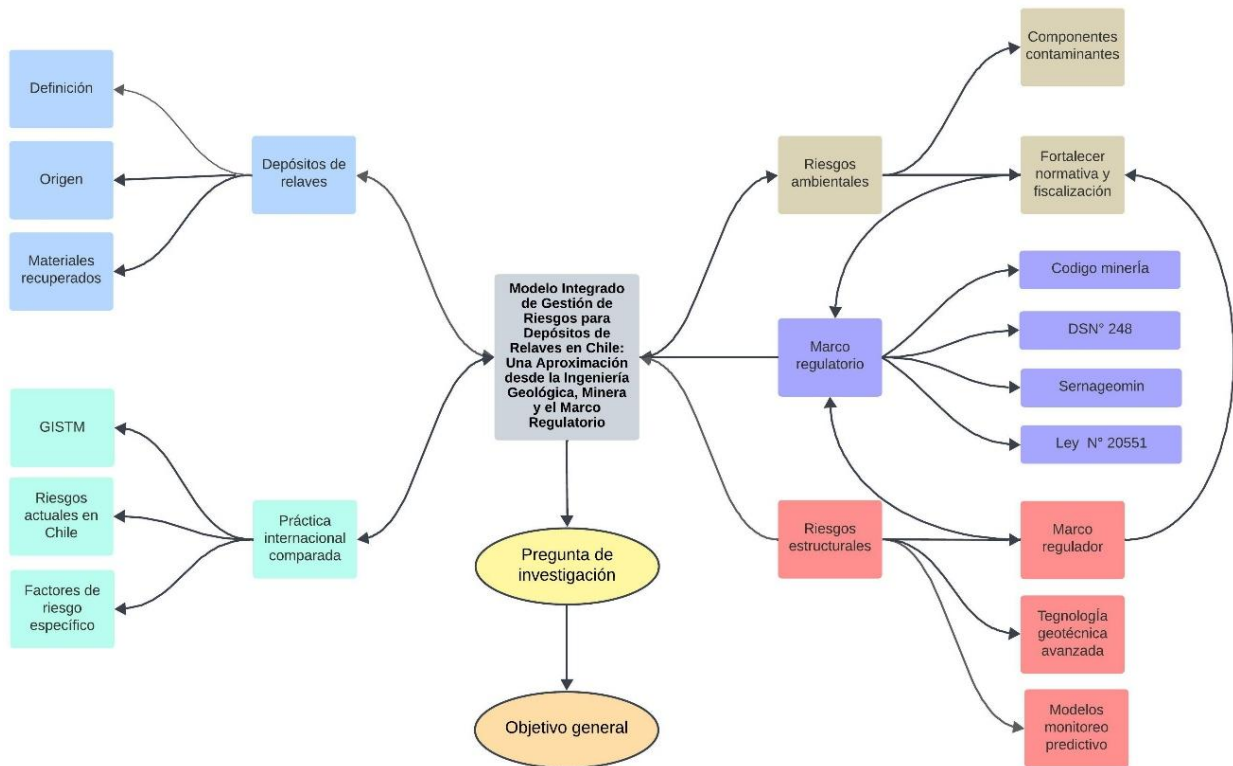


Figura 2: Mapa conceptual de la revisión de la literatura (fuente: Elaboración propia)

### Gestión de riesgos ambientales en relaves

Los relaves, al ser residuos resultantes del procesamiento de minerales, contienen sólidos en suspensión, metales pesados y compuestos químicos, lo que los convierte en una fuente potencial de contaminación si no se manejan adecuadamente. En Chile, la gestión de estos riesgos se basa en un proceso estructurado que incluye la identificación, caracterización, evaluación y priorización de los pasivos ambientales mineros (PAM) (Yurisch, 2016). Este enfoque permite focalizar los depósitos de “riesgo significativo” que podrían causar daños graves al medio ambiente y a las comunidades en caso de eventos adversos (Carneiro & Fourie, 2020). Sin embargo, persisten importantes vacíos en la gestión de riesgos ambientales, especialmente en relación con los depósitos abandonados, que no han sido evaluados adecuadamente. La falta de información precisa sobre estos depósitos aumenta el riesgo de accidentes ambientales, subrayando la necesidad de fortalecer la normativa y mejorar la fiscalización. Es crucial que se implemente una supervisión más rigurosa para garantizar que los depósitos no representen una amenaza significativa para el medio ambiente o las comunidades (Franks et al., 2011; Yurisch, 2016).

A nivel internacional se han evaluado métodos innovadores como la remediación basada en la naturaleza, combinando plantas hiperacumuladoras con microbiología del suelo. Estas estrategias han demostrado reducciones significativas en la movilización de metales, particularmente en climas áridos o semiáridos similares a algunas zonas de Chile (Hassan et al., 2024). Este tipo de enfoque ha ganado terreno debido a su bajo impacto, su aplicabilidad en terrenos degradados y su potencial para estabilizar contaminantes en el tiempo.

Asimismo, se han desarrollado modelos predictivos basados en machine learning que, al analizar datos geoquímicos y espectrales, detectan con alta precisión zonas de riesgo, permitiendo priorizar intervenciones antes de que ocurran incidentes. Estudios recientes han aplicado múltiples métodos combinados con datos hiperespectrales para predecir la distribución espacial de metales pesados en suelos cercanos a relaves, demostrando su aplicabilidad en la gestión preventiva de contaminantes (Xiang et al., 2024).

#### *Política chilena de gestión de relaves: Marco regulatorio*

En Chile, los depósitos de relaves deben cumplir con el marco normativo establecido en el Código de Minería y el Decreto Supremo N° 248 (en proceso de actualización), el cual regula aspectos clave como el diseño, construcción, operación y cierre de estas instalaciones. Este cuerpo normativo se complementa con el Reglamento de Seguridad Minera (DS N° 132) sobre operación y construcción de depósitos, y la Ley 20.551 sobre el cierre de faenas mineras, que exigen la implementación de medidas de seguridad estructural, y aprobación de planes de cierre ambiental por parte del SERNAGEOMIN, con el objetivo de asegurar la protección de las personas, el medio ambiente y la estabilidad física y química de los depósitos (Consejo Minero, 2024).

A lo largo del siglo XX y XXI, este marco ha evolucionado como respuesta a eventos de fallas estructurales y a la creciente presión internacional por una minería más segura y sustentable. En este contexto, el trabajo de Cacciuttolo & Atencio (2022) realiza una revisión detallada de la evolución de la gobernanza de los relaves en Chile desde 1905 hasta 2022, evidenciando avances normativos importantes, pero también la persistencia de desafíos como la gestión de depósitos abandonados, la fiscalización efectiva y la participación de comunidades en la toma de decisiones.

Paralelamente, la literatura reciente propone integrar estrategias de economía circular y sostenibilidad en la política pública. En este sentido, plantear marcos regulatorios modernos que deberían incorporar el concepto de valorización de relaves, ya sea a través de su reprocesamiento para recuperar minerales residuales o mediante su uso como material de construcción lo que permitiría no solo reducir el impacto ambiental de estos pasivos mineros, sino también alinear la política chilena con estándares internacionales más integrales y resilientes. (Kinnunen et al., 2022)

#### *Gestión de relaves: Práctica internacional comparada*

La publicación del *Global Industry Standard on Tailings Management* en 2020 desarrolló el primer estándar global para la gestión de relaves mineros, aplicable tanto a instalaciones existentes como futuras (Cox et al., 2022). Esta regulación, a diferencia del DS N°248, no se centra únicamente en requisitos técnicos y de seguridad física, sino que también incorpora aspectos sociales, ambientales y económicos, promoviendo una mayor transparencia y acceso público a la información (Global Industry Standard on Tailings Management, 2020).

En Chile, la gestión de depósitos de relaves es un tema crítico debido a los riesgos asociados a su construcción, operación y cierre. Según el SERNAGEOMIN, existen 779 depósitos convencionales: 128 activos, 176 abandonados y 475 inactivos (Catastro de Depósito de Relaves en Chile, 2023). En incidentes recientes relacionados con tranques de relaves, se han identificado elementos comunes que pueden haber contribuido a los problemas, entre ellos el método de construcción aguas arriba y la falta de controles operativos adecuados, ambos factores que aumentan el riesgo de falla por licuefacción en eventos sísmicos (Kossoff et al., 2014).

A nivel internacional, la experiencia comparada demuestra que los países con marcos regulatorios robustos (como Canadá, Australia y Suecia) han adoptado modelos integrales que combinan normas técnicas, auditorías independientes y participación comunitaria, resultados que se han asociado a una mejor gestión del riesgo y menor incidencia de incidentes. Por ejemplo, un estudio sugiere que integrar indicadores de sostenibilidad tales como la reducción de agua en relaves y la revalorización de subproductos reduce tanto impactos estructurales como ambientales sin comprometer la viabilidad operacional (Adiansyah et al., 2015).

Además, una revisión reciente concluye que la aplicación de estrategias de economía circular como el uso conjunto de relaves y materiales gruesos de desecho mejora la estabilidad física de los depósitos al reducir la saturación de agua, optimizar la compactación y acelerar la consolidación del material, contribuyendo simultáneamente a una gestión más sostenible y segura (Kinnunen et al., 2022).

## 1.2 Modelo de gestión de riesgos: Novedad, propuesta y contribución

Dada la situación país respecto a las regulaciones gestión de riesgos de los sistemas de relaves en Chile, se plantean las siguientes preguntas de investigación: ¿Cuáles son variables claves para la gestión integrada de riesgos, basado en ingeniería geológica y procesos mineros, que permiten mejorar la seguridad y sostenibilidad en los depósitos de relaves en Chile? y ¿Cómo influye la implementación de tecnologías avanzadas de monitoreo geotécnico y procesos mineros en la optimización de la gestión de riesgos en depósitos de relaves en Chile?

En Chile, a pesar de los avances en tecnologías mineras, y a pesar del marco regulatorio existente, persiste una falta de modelos integrados de gestión de riesgos específicos para la planificación, operación y control depósitos de relaves. Esta carencia limita la capacidad de prever y mitigar riesgos estructurales y ambientales eficazmente, lo que aumenta la vulnerabilidad ante desastres. Este enfoque innovador permite una evaluación más precisa de los riesgos estructurales y ambientales, respondiendo a la creciente necesidad de seguridad y sostenibilidad en las operaciones mineras. Aportando significativamente a la literatura respecto de la gestión sustentable de relaves en contextos mineros desafiantes.

Se propone entonces el desarrollo de un modelo integrado de gestión de riesgos para depósitos de relaves en Chile, basado en entrevistas a expertos y el marco regulatorio vigente. La investigación aborda variables clave de ingeniería geológica y procesos mineros, validando la integración de tecnologías de monitoreo geotécnico y herramientas de modelado para mejorar la estabilidad estructural, mitigar riesgos ambientales, y garantizar la seguridad de las comunidades cercanas y sostenibilidad de las operaciones.

La propuesta de un modelo integrado de gestión de riesgos para depósitos de relaves es innovadora en el contexto chileno, al unificar la ingeniería geológica y minera dentro de un marco normativo. Este modelo contribuye significativamente a la sostenibilidad y seguridad de las operaciones mineras, integrando tecnologías avanzadas de monitoreo y prácticas reguladas. Esto llena un vacío crítico en la gestión de relaves, adaptando estándares globales a las particularidades de Chile. En este sentido esta investigación contribuye a la integración futura de tecnologías para la gestión, análisis de depósitos de relaves en base a datos actualizados correlacionando parámetros geológicos y de procesos mineros, mejorando así las decisiones de gestión de riesgos y garantizando la seguridad ambiental y comunitaria fortaleciendo la seguridad y la sostenibilidad de las operaciones mineras.

De acuerdo con lo mencionado anteriormente, este trabajo considera los siguientes como objetivo general y objetivos específicos para este trabajo de tesis.

### 1.3 Objetivos de la investigación

Entendido lo anteriormente discutido, el objetivo general de este trabajo es:

Desarrollar un modelo integrado de gestión de riesgos para depósitos de relave en Chile, que combine la ingeniería geológica y minera con un marco regulatorio actualizado para la mejora de la seguridad y mitigación de los impactos ambientales.

Los objetivos específicos son:

- Analizar los riesgos asociados a los depósitos de relaves en Chile, considerando aspectos geológicos, mineros y ambientales.
- Evaluar las percepciones de mejora de expertos del área de geología y minería, con experiencia en la gestión de riesgos de depósitos de relaves.
- Definir las relaciones y proponer relaciones entre variables claves para la determinación de etapas y componentes de un modelo integrado de gestión de riesgos estructurales y ambientales.

## 2 Metodología

### 2.1 Aproximación cualitativa

Una parte del presente estudio adopta un paradigma cualitativo, con un diseño exploratorio basado en entrevistas semiestructuradas. Se seleccionó esta metodología por su capacidad de comprender de manera profunda y contextualizada los significados y comportamientos de los expertos en la gestión de riesgos de depósitos de relaves. Este enfoque permite analizar de forma holística cómo los profesionales enfrentan desafíos en la mitigación de riesgos estructurales y ambientales (figura 3).

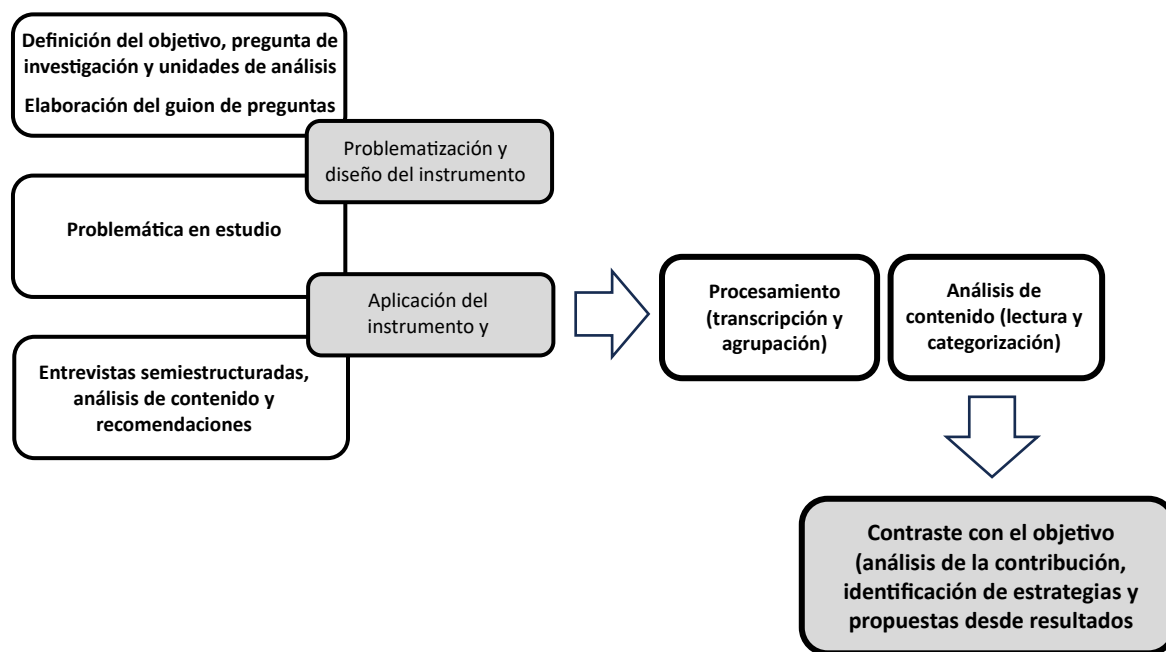


Figura 3: Estructura del estudio propuesto y proceso de selección de resultados (fuente: Elaboración propia)

La población del estudio está conformada por 10 ingenieros y geólogos expertos, seleccionados intencionalmente según su experiencia en la minería chilena (Tabla I). Los participantes tienen una media de 20 años de experiencia profesional, lo que asegura la pertinencia y riqueza de sus aportes en temas de seguridad minera y gestión de relaves. El entorno de aplicación del estudio se centra en la minería chilena, abarcando tanto depósitos de relaves como el marco regulatorio vigente y las propuestas legislativas en evolución.

Tabla I: Muestra para el estudio cualitativo (fuente: Elaboración propia)

Nº entrevistado	Perfil del entrevistado	Perfil académico/ profesional
1	Profesional	NAVA Consulting
2	Profesional	BBA Consultants
3	Profesional	Rio Tinto Group
4	Profesional	Teck Resources Limited
5	Académico	PhD. En Minería, Universidad de Chile
6	Académico	Ph.D. University of California, Berkeley, EE. UU.
7	Académico	MPhil Engineering for Sustainable Development, University of Cambridge, UK
8	Académico	PhD Mining and Minerals, University of Exeter, UK
9	Académico	Doctor en Ciencias, Mención Geología de la Universidad de Chile
10	Académico	Máster en Hidrología y Gestión de Recursos Hídricos, Universidad de Alcalá.

Para el desarrollo de la investigación propuesta, se proponen el siguiente esquema de preguntas abiertas que permiten abordar las variables clave relacionadas con la ingeniería geológica, los procesos mineros y el marco regulatorio.

#### 2.1.1 Instrumento cualitativo: Entrevistas

### **Etapas 1: Caracterización y comprensión del riesgo en impacto actual en relaves**

#### *Percepción de riesgos actuales*

1. Desde su perspectiva, ¿cuáles son los principales riesgos y desafíos que enfrentan actualmente los depósitos de relaves en Chile?
2. ¿Cree que los métodos actuales de gestión de riesgos son suficientes para mitigarlos adecuadamente? ¿Porqué?

#### *Técnicas de ingeniería geomecánica y minera*

3. Actualmente ¿qué prácticas y procedimientos se emplean para la gestión de riesgos en depósitos de relaves?

#### *Consideraciones ambientales*

4. ¿Cómo se abordan actualmente los impactos ambientales en los depósitos de relaves? ¿Cree que las medidas son suficientes?

### **Etapas 2: Propuesta para mejorar gestión del riesgo de relaves y concepción de etapas del modelo**

#### *Desafíos y oportunidades*

5. ¿Cuáles son los principales desafíos que percibe a la hora de la implementación de un modelo integrado de gestión de riesgos en la industria minera chilena?

6. ¿Cómo percibe el avance de la gestión de riesgos en depósitos de relaves en Chile en el futuro?

*Modelo integrado de gestión de riesgos*

7. Desde su experiencia, ¿qué elementos cree que debería incluir un modelo integrado de gestión de riesgos para los depósitos de relaves?
  - a) ¿Qué etapas propone o percibe necesarias?
  - b) ¿Cuáles son las variables claves? ¿Qué variables y parámetros deben revisarse regularmente?
  - c) ¿Cuáles son los flujos de información que el modelo requiere?
8. ¿Cómo dibujaría el modelo? ¿Qué etapas debería contener? ¿Cómo relacionaría las etapas? Puede simplemente mejorar o modificar libremente las propuestas que otros han desarrollado previamente.

Para el análisis de los datos, se establecieron categorías clave a partir de las entrevistas, las cuales fueron analizadas mediante un enfoque inductivo, identificando patrones, factores críticos y deficiencias en los modelos actuales de gestión de riesgos (Tabla II). Se llevó a cabo un contraste con el marco regulatorio vigente para evaluar la coherencia de las prácticas propuestas con las normativas. En cuanto a los aspectos éticos, el estudio se desarrolló garantizando la confidencialidad y voluntariedad de los participantes, quienes fueron informados de los objetivos y metodología con total transparencia. Todos los datos fueron tratados con imparcialidad, manteniéndose su integridad a lo largo del análisis para asegurar la validez de los resultados.

Tabla II: Categorías del estudio (fuente: Elaboración propia)

Ítems	Categorías	Representación
<b>Ítem 1: Desde su perspectiva, ¿cuáles son los principales riesgos y desafíos que enfrentan actualmente los depósitos de relaves en Chile?</b>	Colapso de depósitos	(2/10)
	Pasivos ambientales	(4/10)
	Falta de gestión	(4/10)
<b>Ítem 2: Cree que los métodos actuales de gestión de riesgos son suficientes para mitigarlos adecuadamente? ¿Porqué?</b>	Estabilidad de relaves	(2/10)
	Desafíos operacionales	(4/10)
	Contaminación y medio ambiente	(4/10)
<b>Ítem 3: Actualmente ¿qué prácticas, procesos o procedimientos se emplean para la gestión de riesgos en depósitos de relaves?</b>	Normas y estándares	(2/10)
	Análisis de riesgos	(2/10)
	Predicción y monitoreo	(3/10)
	Gestión operativa	(3/10)
<b>Ítem 4: ¿Cómo se abordan actualmente los impactos ambientales en los de depósitos de relaves? ¿Cree que las medidas son suficientes?</b>	Políticas y Normativas	(4/10)
	Colaboración de expertos	(3/10)
	Monitoreo y prevención	(3/10)
<b>Ítem 5: ¿Cuáles son los principales desafíos que percibe a la hora de la implementación de un modelo integrado de gestión de riesgos en la industria minera chilena?</b>	Conocimiento y reutilización	(3/10)
	Estandarización	(1/10)
	Falta de integración	(6/10)
<b>Ítem 6: ¿Cómo percibe el avance de la gestión de riesgos en depósitos de relaves en Chile en el futuro?</b>	Percepción social	(2/10)
	Normas y estándares	(3/10)
	Mejoras técnicas	(2/10)
	Desafíos pendientes	(3/10)

La entrevista semiestructurada fue validada mediante un proceso iterativo, comenzando con un pilotaje en un grupo reducido de tres a cinco ingenieros y geólogos expertos que cumplían con los criterios de selección del estudio. Este pilotaje permitió identificar problemas de interpretación, ambigüedades y posibles sesgos en las preguntas formuladas. Tras cada ronda, se ajustaron las preguntas para mejorar su claridad y alinearlas con los objetivos de la investigación, enfocados en la gestión de riesgos en depósitos de relaves. Se realizó un análisis cualitativo preliminar de las respuestas para evaluar si facilitaban la exploración de percepciones técnicas sobre los factores clave de estabilidad estructural, procesos mineros y el marco regulatorio. Tras cada ajuste, se probó nuevamente el instrumento hasta alcanzar una versión final consistente, que generara respuestas detalladas y relevantes a la pregunta de investigación.

Entre las principales limitaciones de la metodología se incluyen la posible falta de representatividad debido a la selección intencionada de los participantes, lo que puede limitar la generalización de los resultados a otros contextos. Además, el análisis cualitativo está sujeto a interpretación, lo que podría introducir sesgos en la codificación de las respuestas.

## 2.2 Aproximación cuantitativa

Complementar este estudio cualitativo con un enfoque cuantitativo, ofrece una visión más robusta y generalizable de la gestión de riesgos en depósitos de relaves, partiendo del análisis de resultados cualitativos (figura 4).

Para el análisis de datos cuantitativos se utilizaron herramientas de procesamiento y visualización adecuadas al tipo de información obtenida. El análisis cuantitativo fue realizado mediante Microsoft Excel, herramienta empleada para tabulación, procesamiento y elaboración de gráficos descriptivos.

En el caso del análisis cualitativo, no se utilizó software especializado ya que el tamaño reducido de la muestra (10 entrevistas) permitió realizar una codificación manual rigurosa, sistemática y replicable mediante análisis temático.

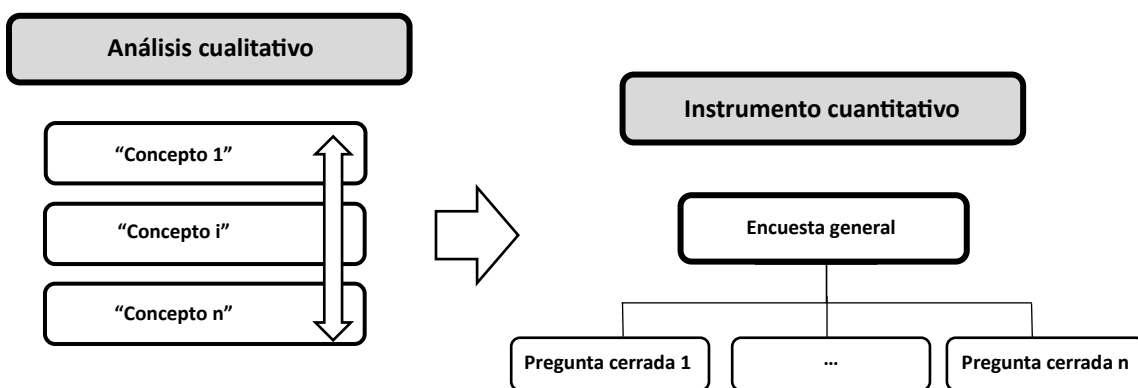


Figura 4: Modelo de generación del estudio cuantitativo (encuesta) desde el estudio cualitativo (fuente: Elaboración propia)

Una mirada cuantitativa basada en 303 encuestas permite capturar tendencias, percepciones y prácticas en una muestra amplia de profesionales del sector minero, logrando una triangulación de

datos que favorece la validez y confiabilidad del modelo propuesto. Además, el uso de encuestas permite evaluar el consenso y las diferencias de opinión sobre aspectos específicos del modelo de gestión de riesgos, como la efectividad de las tecnologías de monitoreo, la implementación del marco normativo y las prácticas de mitigación de riesgos estructurales y ambientales.

## Beneficios de la aproximación cuantitativa en el estudio

1. **Generalización de resultados:** Las encuestas permiten extender los hallazgos más allá del grupo cualitativo de expertos, obteniendo una perspectiva más amplia y representativa de la industria.
2. **Identificación de patrones:** Facilita la identificación de patrones cuantitativos en cuanto a las percepciones y prácticas de gestión de riesgos en depósitos de relaves, diferenciados por subsectores (gran minería, mediana minería, etc.).
3. **Triangulación de datos:** Integrar datos cualitativos y cuantitativos permite triangulación metodológica, aumentando la solidez y profundidad del modelo propuesto.
4. **Medición de consenso:** Evaluar el nivel de acuerdo entre los profesionales del sector minero sobre las prácticas y desafíos de la gestión de relaves en el contexto chileno.
5. **Identificación de áreas críticas:** Los datos de encuesta resaltan las áreas críticas donde los profesionales consideran que existen mayores riesgos o que requieren mayor intervención regulatoria o técnica.

### 2.2.1 Instrumento cuantitativo: Encuesta

El instrumento propuesto se centra en las percepciones y prácticas actuales sobre gestión de riesgos en depósitos de relaves, organizado en cinco secciones clave: antecedentes profesionales, percepción de riesgos, evaluación del marco regulatorio, aplicación de tecnologías y medidas de mitigación. Cada sección explora las variables identificadas en la fase cualitativa.

## Instrumento: "Percepción y Prácticas en la Gestión de Riesgos de Depósitos de Relaves en Chile"

### Sección 1: Antecedentes profesionales

Esta sección contextualiza la experiencia de los participantes y el tipo de operaciones mineras en las que trabajan.

- ¿Cuál es su cargo actual?
  - Especialista en gestión de relaves
  - Profesional con conocimientos en relaves (Geólogos, ingenieros en minas, etc. no especializado)
  - Ingeniero geotécnico
  - Ciudadano interesado en la temática / Otro (especifique)
- ¿Cuántos años de experiencia tiene en la industria minera?
  - Menos de 5 años
  - 5-10 años
  - 10-20 años
  - Más de 20 años
  - No aplica

- ¿En qué tipo de operación minera trabaja principalmente?
  - Gran minería
  - Mediana minería
  - Pequeña minería
  - Exploración
  - Ninguna

## **Sección 2: Percepción de riesgos**

Esta sección se centra en la identificación de los riesgos percibidos y su importancia en la gestión de depósitos de relaves.

- ¿Qué tan significativo considera el riesgo de falla estructural en los depósitos de relaves?
  - Muy significativo
  - Moderadamente significativo
  - Poco significativo
  - No significativo
- ¿Qué nivel de riesgo ambiental percibe en los depósitos de relaves actuales?
  - Muy alto
  - Alto
  - Medio
  - Bajo
- ¿Cuáles considera que son los factores más críticos para la estabilidad de los depósitos de relaves? (Seleccione hasta 3)
  - Diseño de los depósitos
  - Tecnología de monitoreo
  - Gestión operativa
  - Condiciones geotécnicas
  - Supervisión regulatoria
  - Otros (especifique)

### **Sección 3: Evaluación del marco regulatorio**

Evaluar la percepción sobre el marco regulatorio y su efectividad en la gestión de riesgos.

- ¿Considera que el marco regulatorio chileno es adecuado para garantizar la seguridad en los depósitos de relaves?
  - Muy adecuado
  - Adecuado
  - Poco adecuado
  - Inadecuado
- ¿Cuáles considera que son las mayores limitaciones del marco regulatorio actual en relación con la gestión de relaves? (Seleccione hasta 2)
  - Falta de actualización de normativas
  - Fiscalización insuficiente
  - Escasez de recursos técnicos
  - Falta de claridad en los requisitos
  - Falta de personal capacitado
  - Otros (especifique)
- ¿Cree que es necesario fortalecer la normativa en temas de monitoreo geotécnico y ambiental?
  - Sí, muy necesario
  - Moderadamente necesario
  - Poco necesario
  - No necesario

### **Sección 4: Aplicación de tecnologías**

Este apartado evalúa el uso de tecnologías y la percepción sobre su efectividad en la gestión de riesgos.

- ¿Utiliza tecnologías de monitoreo en su operación?
  - Sí
  - No
  - No aplica

- ¿Qué tecnologías considera más efectivas para la gestión de relaves? (Seleccione todas las que correspondan)
  - Sensores de monitoreo en tiempo real
  - Modelado numérico
  - Drones y sensores de detección remota
  - Sistemas de alerta temprana
  - Otros (especifique)
- En una escala de 1 a 5, ¿qué tan efectivas considera las tecnologías de monitoreo para la prevención de desastres en depósitos de relaves?
  - 1 (Nada efectivas)
  - 2 (Poco efectiva)
  - 3 (Moderadamente efectivas)
  - 4 (Efectiva)
  - 5 (Muy efectivas)

### **Sección 5: Medidas de mitigación y sostenibilidad**

Esta última sección explora las medidas de mitigación y la percepción sobre la sostenibilidad de las prácticas en relaves.

- ¿Qué prácticas de mitigación se emplean en su operación minera? (Seleccione todas las que correspondan)
  - Control de calidad del agua y suelo
  - Monitoreo geotécnico de estabilidad
  - Planes de cierre y post-cierre
  - Reforestación y recuperación ambiental
  - Otros (especifique)
  - No aplica
- ¿Considera que las prácticas actuales de mitigación en su operación son suficientes para garantizar la seguridad de las comunidades cercanas?
  - Sí, totalmente suficientes
  - Moderadamente suficientes
  - Poco suficientes
  - Insuficientes

- ¿En qué medida considera que la industria minera chilena está comprometida con la sostenibilidad en la gestión de relaves?
  - Muy comprometida
  - Moderadamente comprometida
  - Poco comprometida
  - No comprometida

### **Escala de respuestas y análisis**

Para el análisis de los datos obtenidos, se usan estadísticas descriptivas, como frecuencias y medias, y análisis de correlación para identificar patrones entre la percepción de riesgos y la efectividad del marco regulatorio o las tecnologías de monitoreo. Este enfoque mixto no solo aporta con una validación empírica adicional para el modelo, sino que también permite identificar áreas de mejora directa, estableciendo un panorama más completo sobre la gestión de riesgos de relaves en Chile.

### 3 Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para cada una de las preguntas del instrumento. Por cuestiones de espacio y de claridad en la lectura se decidió incluir únicamente los datos que aportan información relevante para esta investigación. Las categorías asociadas a cada una de las preguntas se resumen en la tabla II.

#### 3.1 Análisis de resultados cualitativos

##### **Ítem 1: Desde su perspectiva, ¿cuáles son los principales riesgos y desafíos que enfrentan actualmente los depósitos de relaves en Chile?**

Si revisamos los resultados generales de la primera pregunta del cuestionario (Tabla I) nos encontramos que para los entrevistados hay dos riesgos y desafíos principales, representados con una representación 4 de 10 cada uno. Uno asociado a la falta de **gestión entorno a los depósitos de relaves**, y, por otro lado, la idea asociada a **pasivos ambientales**. Resulta interesante esta similitud, se mantenga constante, independientemente del perfil de los informantes clave. En efecto, para el caso de riesgo por gestión se percibe que en los últimos años “... las grandes mineras han implementado dentro de su sistema de gestión de relaves el Global Industry Standard ...” (entrevistado 6). Con ello el desafío es que dicha implementación se materialice y sea efectiva, permitiendo la convivencia de un proceso de gestión mejorado, con la vida del depósito. También como desafío latente, se tiene para la pequeña y mediana minería, la necesidad de estandarizar la gestión, lo que se expresa en la siguiente idea: “Poder estandarizar la gestión, tanto en las etapas de diseño, construcción, operación, cierre y postcierre” (entrevistado 3). Desde la mirada de pasivos ambientales, preocupan los efectos del cambio climático “...los eventos más críticos se van a repetir con más frecuencia” (entrevistado 7). Lo anterior cobra relevancia si se considera que los depósitos más antiguos “... se establecieron quizás sin considerar la actividad sísmica o el aumento de volumen del relave” (entrevistado 9). Es decir que el problema principal radica en lo ambiental y en la imagen social con que el depósito es percibido, la desinformación, y la ausencia absoluta del tratamiento de dichos residuos. En cualquier caso, la cifra total es elevada para dichas categorías en conjunto (8 de 10), más si tenemos en cuenta que el 2/10 restante se focaliza en la posibilidad del **colapso de los depósitos**: “...definir acciones que permitan reducir y/o minimizar los riesgos de colapso de relaves (estabilidad física) y de generación de drenaje ácido (estabilidad química) que pueda contaminar recursos hídricos de una zona en particular” (entrevistado 1).

##### **Ítem 2: ¿Cree que los métodos actuales de gestión de riesgos son suficientes para mitigarlos adecuadamente? ¿Porqué?**

Al revisar los resultados generales de la segunda pregunta del cuestionario (Tabla I), encontramos que 2/10 de los entrevistados hizo referencia a la **estabilidad de los relaves** como una medida suficiente en términos de mitigación de riesgos. Por ejemplo, uno de los entrevistados mencionó que “...la estabilidad física de relaves se ha desarrollado fuertemente en Chile y... cumple con los estándares internacionales” (entrevistado 1), mientras que otro indicó que “...desde el punto de vista de estabilidad, yo creo que sí, hemos, contamos con altos estándares en esta área...” (entrevistado 7). Sin embargo, en ambos casos, se reconocen limitaciones relacionadas con el aspecto ambiental.

En cuanto a los **desafíos operacionales**, el 4/10 de los entrevistados expresaron inquietudes en torno a la implementación práctica de los sistemas de gestión de riesgos en las operaciones mineras. Un entrevistado señaló que *"...El mayor desafío hoy en día es que las operaciones puedan implementar un sistema de gestión que permita asegurar que los diseños planificados se ejecuten correctamente durante la operación."* (entrevistado 2). Además, se resaltó la escasez de profesionales especializados: *"hay una escasez de profesionales para todo lo que necesitamos"* (entrevistado 10). La acumulación de conocimiento histórico también se destacó como un factor clave para afrontar situaciones catastróficas: *"...Chile por su historia minera ha acumulado conocimiento que se ha ido aplicando para poder generar una buena respuesta ante situaciones de carácter catastrófico."* (entrevistado 6).

Por último, en la categoría de **contaminación y medio ambiente** otro 4/10 de los entrevistados destacó las preocupaciones sobre los impactos ambientales derivados de los depósitos de relaves. Un entrevistado mencionó que, aunque hay conocimiento sobre *"sistemas de manejo de aguas"* y *la contaminación de aguas subterráneas, monitorear esos temas es más difícil*" (entrevistado 8). También se advirtió que cualquier medida tomada es insuficiente, dada la magnitud del riesgo: *"...cualquier medida que se tome, es poca, considerando el alto riesgo..."* (entrevistado 3).

En general, los entrevistados señalan que, aunque hay avances significativos, los métodos actuales no son completamente suficientes, especialmente en lo relacionado con la contaminación y los desafíos operacionales.

### **Ítem 3: Actualmente ¿qué prácticas, procesos o procedimientos se emplean para la gestión de riesgos en depósitos de relaves?**

Al examinar los resultados de la tercera pregunta del cuestionario (Tabla I), se observa que solo 2/10 de los entrevistados menciona la relevancia de las **normas y estándares** en la gestión de riesgos de depósitos de relaves, destacando que *"...las normas internacionales de gestión de relaves del ICMM se centran en aspectos de estabilidad física"* (entrevistado 1), lo que sugiere que, aunque existen directrices claras, su alcance podría ser limitado.

En cuanto a la **identificación y análisis de riesgos**, 2 de 10 de los entrevistados mencionan que el verdadero reto radica en la gestión posterior a la identificación de los riesgos. Según el (entrevistado 2), *"...la gestión de riesgos debe ir más allá de una simple matriz que clasifica los riesgos en alto, medio y bajo"*. Esto indica que hay un vacío en la implementación de medidas efectivas que mitiguen estos riesgos, subrayando la necesidad de una mejora en los procedimientos actuales.

Por otro lado, 3 de 10 de los entrevistados se refiere al **modelamiento y monitoreo**, resaltando un aumento reciente en el uso de modelos numéricos para evaluar la estabilidad de los depósitos de relaves, indicando que *"...ha habido un aumento en el modelamiento numérico debido a normativas que exigen un monitoreo más constante"* (entrevistado 3), sugiriendo que estas herramientas están comenzando a ser integradas en la práctica diaria. Otro entrevistado menciona la importancia de realizar talleres de riesgo para identificar variables críticas que pueden impactar los depósitos, indicando que: *"...Se deben realizar talleres de Riesgo (FMA), que son un análisis de modos de falla catastróficos, comenzando desde la identificación de los controles críticos, es decir, identificando variables que pueden afectar un depósito"* (entrevistado 6), lo que muestra un esfuerzo por establecer un enfoque más proactivo.

Finalmente, también se destacó la **gestión operativa**, donde 3/10 de los informantes subraya la necesidad de un control eficiente, mencionando que *"...la superintendencia de relaves de Anglo American opera de manera efectiva, llevando un control riguroso del recrecimiento del relave y de la gestión del agua"* (entrevistado 7), Sin embargo, también se planteó que *"...hay una falta de control químico y geoquímico"* (entrevistado 8), lo que indica que aún hay áreas que requieren atención y mejora.

Se reconoce la importancia de las normas y los análisis de riesgos, donde las prácticas actuales de gestión de riesgos en los depósitos de relaves necesitan ser más integrales y efectivas, especialmente en lo que respeta al monitoreo y control operativo.

#### **Ítem 4: ¿Cómo se abordan actualmente los impactos ambientales en los de depósitos de relaves? ¿Cree que las medidas son suficientes?**

Al analizar los resultados de la tercera pregunta del cuestionario (Tabla I), se observa que 4 de 10 de los entrevistados considera que las **políticas y normativas** relacionadas con la gestión de relaves presentan desafíos importantes. En particular, se menciona que *"...existen numerosos depósitos abandonados, lo que refleja la falta de una política única que aborde la gestión de los relaves"* (entrevistado 1). Aunque los depósitos de la gran minería están diseñados y monitoreados según normas ingenieriles, este mismo entrevistado subraya la necesidad de abrir la discusión a diversas áreas científicas, especialmente en la estabilidad química, para mejorar los procedimientos.

Por otro lado, otro entrevistado señala que las normativas requieren evaluar riesgos ambientales, lo que a veces supone un desafío por la falta de profesionales especializados: *"...Involucrar a los expertos en los análisis de riesgos puede ser complicado"* (entrevistado 2), expresó. Mientras tanto, el **cumplimiento normativo** en sí mismo no es suficiente para garantizar la seguridad: *"...En el papel está bien, pero las normativas no se ponen a prueba hasta que ocurran los problemas"* (entrevistado 6).

Un 3 de 10 de los entrevistados enfatiza la **colaboración entre expertos** como un factor clave en la gestión de relaves. Uno de ellos menciona que *"...los aspectos ambientales y operativos a menudo son gestionados por equipos separados, lo que podría mejorarse con una mayor integración"* (entrevistado 9). Además, el mismo porcentaje de entrevistados señala la importancia de un buen plan de respuesta ante emergencias que esté alineado con las organizaciones públicas.

Finalmente, otro 3/10 de los informantes se refiere a el **monitoreo y prevención**, destacando el enfoque preventivo en evitar derrames y colapsos, afirmando que *"...se monitorean las aguas subterráneas y la contaminación en los alrededores"* (entrevistado 7), mientras que también agrega que *"las mineras saben que es un riesgo grande y, por ello, invierten en estas medidas"* (entrevistado 10). Esto sugiere que, aunque se reconocen los avances, aún existen aspectos que requieren atención para mejorar la gestión y prevención de riesgos en los depósitos de relaves.

#### **Ítem 5: ¿Cuáles son los principales desafíos que percibe a la hora de la implementación de un modelo integrado de gestión de riesgos en la industria minera chilena?**

Al revisar los resultados generales de la pregunta sobre los desafíos percibidos en la implementación de un modelo integrado de gestión de riesgos en la industria minera chilena, encontramos que un 3/10 de los entrevistados mencionaron la importancia del **conocimiento detallado de los yacimientos y la reutilización de materiales**. Esta idea resalta la necesidad de adaptar las prácticas a las particularidades de cada yacimiento, como lo menciona un entrevistado: *"Un modelo integrado debe*

*tener en consideración la heterogeneidad de tipos de yacimientos minerales...*" (entrevistado 1). Asimismo, la reutilización de materiales presentes en los relaves, como aquellos claves para la transición energética *"...Reutilizando materiales de relaves que puedan contener elementos claves..."* (entrevistado 9).

Por otro lado, el desafío de la **estandarización** fue citado por el 1/ 10 de los entrevistados, quienes resaltaron la incertidumbre y la necesidad de generar formas más robustas de evaluar los riesgos *"...Cuando queremos hablar de riesgos, nos apoyamos en el juicio experto... hay un desafío en estandarizar para que los análisis de riesgo sean consistentes"* (entrevistado 2).

El desafío que más se menciona y que agrupa un 6/10 de las respuestas, es la **falta de integración** en los procesos. La fragmentación de las tareas y la falta de coordinación dentro de la industria minera fue destacada por varios entrevistados, uno de los cuales comentó: *"...Cada una de las tareas trabaja como de forma separada... esa falta de integración es el mayor desafío"* (entrevistado 3). Destaca la importancia de integrar completamente la gestión de los relaves desde el inicio de las operaciones y asegurarse de contar con un modelo unificado: *"...Que se pueda integrar 100% la gestión del depósito de relaves dentro de la operación desde un inicio..."* (entrevistado 6), *"...Falta también un modelo, cada empresa tiene el suyo, pero ese es un desafío grande"*. (entrevistado 7).

Los resultados reflejan que, aunque se reconocen avances y desafíos específicos, la falta de integración en los procesos sigue siendo la principal característica identificada en la implementación de un modelo de gestión de riesgos en la industria minera chilena

#### **Ítem 6: ¿Cómo percibe el avance de la gestión de riesgos en depósitos de relaves en Chile en el futuro?**

Al analizar los resultados generales de la pregunta sobre la percepción del avance en la gestión de riesgos en depósitos de relaves en Chile, se identifican cuatro áreas clave. En primer lugar, la **percepción social** preocupa al 2/10 de los entrevistados. Este grupo destaca que, si bien las comunidades cercanas a los relaves, como las del norte de Chile, están más conscientes de los riesgos, la atención nacional sigue siendo insuficiente: *"...la percepción nacional de este tema es bastante precaria..."* (entrevistado 1). A pesar de esto, se han observado progresos en términos de monitoreo y conciencia: *"...hoy en día hay muchas más herramientas, más monitoreo y más conciencia..."* (entrevistado 7).

En segundo lugar, 3 de 10 mencionan **la normativa y los estándares** como un desafío. Algunos entrevistados indican que, aunque las grandes mineras han implementado estándares internacionales, la legislación nacional aún está atrasada: *"...me gustaría que la normativa fuera más rápida, pero al final vamos como detrás de lo que ya las compañías importantes están haciendo"* (entrevistado 10). No obstante, se percibe un esfuerzo creciente por parte de la industria en alinearse con los estándares globales: *"...siento que la industria se está preocupando hartito de este tema"* (entrevistado 8).

Con una representatividad de 2 de 10 se señala que las **mejoras técnicas** han sido un avance importante. En este sentido, se destacan avances en modelos de estimación de estabilidad y en la búsqueda de mayor precisión en los factores de seguridad: *"...cada vez se piden modelos de estimación de estabilidad más complejos, más robustos"* (entrevistado 3). Además, las lecciones aprendidas de fallas anteriores han ayudado a implementar mejoras continuas: *"...cuando ocurren fallas como las de Brasil o Canadá, se implementaron mejoras"* (entrevistado 6).

Finalmente, 3/10 de los entrevistados indica que aún existen **desafíos pendientes** en la gestión de riesgos. Si bien ha habido avances, algunos consideran que falta para que sea un tema prioritario en toda la industria minera: “...todavía le falta para que sea un tema fundamental que todos manejen en una minera” (entrevistado 2). A pesar de ello, el progreso es visto como constante: “...el avance es constante, quizás no tan rápido como nosotros queremos, pero va bien encaminado” (entrevistado 9).

En conjunto, las respuestas muestran un equilibrio entre avances significativos y desafíos persistentes, lo que refleja el camino por recorrer hacia una gestión de riesgos más integral y efectiva.

### 3.1.1 Hallazgos claves detectados

Desde el análisis de las respuestas categorizadas se desprende los principales hallazgos para las etapas cualitativas establecidas:

- Dos principales enfoques en la gestión de riesgos en depósitos de relaves en Chile:
  1. Desafíos operacionales y normativos
  2. Conciencia ambiental
- Falta de una gestión integrada como un desafío clave, especialmente en la pequeña y mediana minería.
- Necesidad de estandarización de las prácticas en todas las etapas del ciclo de vida de los relaves (importancia de implementación de modelos estandarizados y unificados que tengan como base la gestión y categorización, y que aborden la gestión de riesgos desde el diseño hasta el cierre y postcierre de los depósitos):
  - Clasificatoria
  - Gestión y gobernanza
  - Gestión de la emergencia
- Falta de integración y fragmentación de tareas que representan un reto importante en la coordinación de procesos.
- Preocupación por los efectos del cambio climático y la vulnerabilidad de los relaves más antiguos, que fueron construidos sin considerar riesgos actuales como la actividad sísmica o el aumento de volumen de residuos.
- Abordar no solo los desafíos técnicos, sino también la importancia de abordar la imagen pública y la percepción social de los depósitos de relaves.

### 3.2 Análisis de resultados cuantitativos

El análisis cuantitativo se basa en los datos obtenidos de una encuesta aplicada a 303 participantes vinculados al ámbito minero, con el objetivo de conocer sus percepciones y prácticas en torno a la gestión de riesgos en depósitos de relaves en Chile. La encuesta se estructura en cinco secciones claves: antecedentes profesionales, percepción de riesgos, evaluación del marco regulatorio, aplicación de tecnologías y medidas de mitigación y sostenibilidad. A continuación, se analizan los principales resultados obtenidos y su interpretación, acompañados de gráficos representativos que permiten visualizar con mayor claridad los resultados.

#### Sección 1: Antecedentes profesionales

El perfil de los encuestados refleja una predominancia de *profesionales con conocimientos en relaves* (74%), mientras que solo un 4% corresponde a *especialistas en gestión de relaves* (figura 5). Esta diferencia sugiere que, si bien existe un nivel generalizado de conocimiento técnico en la industria minera, aún persiste un déficit en la formación especializada de profesionales en el área de gestión integral de riesgos en depósitos de relaves.

Desde la perspectiva de la experiencia laboral, la mayoría de los encuestados tiene menos de 5 años en la industria minera (55%), como se observa en la figura 6. Este resultado puede interpretarse como una señal de recambio generacional en el sector, lo que podría impactar en cómo se incorporan y ponen en práctica las normativas y prácticas en el entorno laboral.

Respecto al tipo de operación minera, un 40% de los encuestados indicó trabajar en la *gran minería*, mientras que un 48% no está directamente vinculado a una operación minera activa, lo que podría incluir perfiles provenientes de consultorías, investigación o instituciones del sector público vinculadas a la supervisión minera (figura 7).

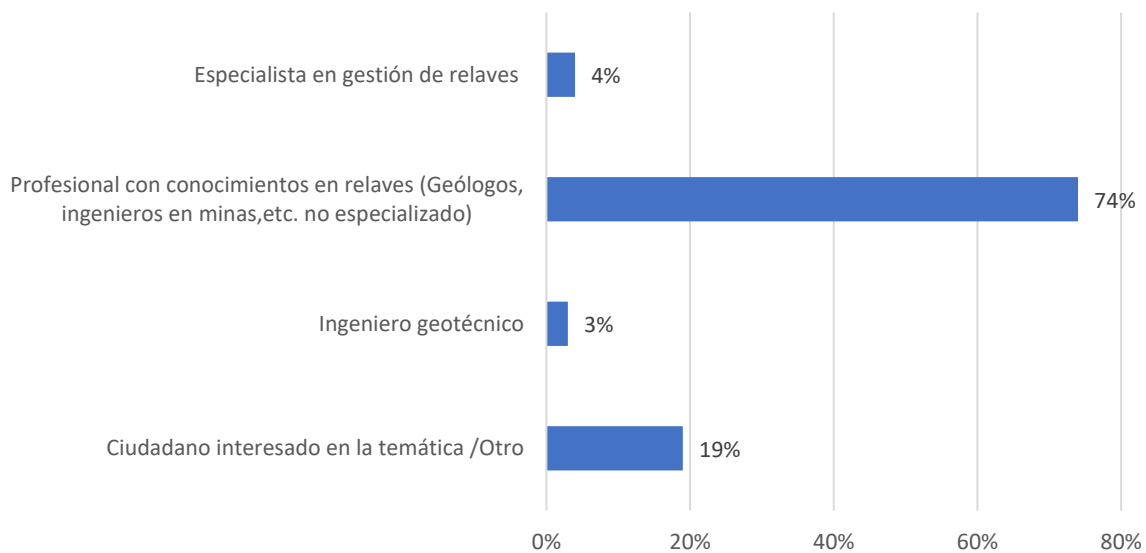


Figura 5: Caracterización general de los encuestados: Cargo actual de los participantes. (fuente: Elaboración propia)

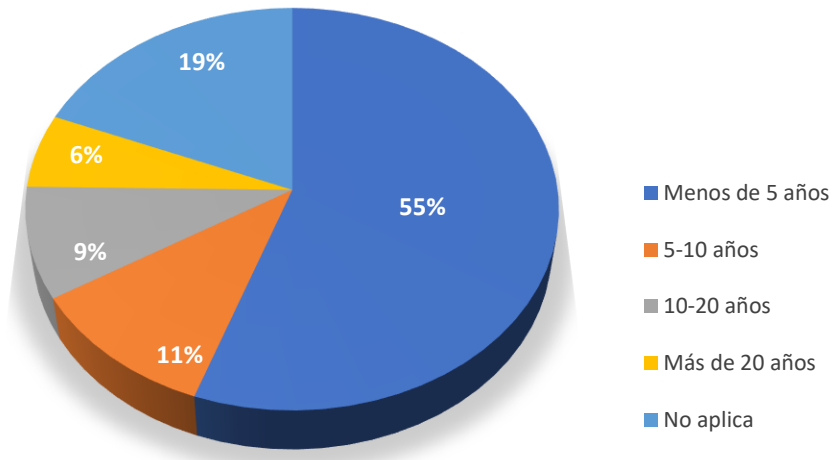


Figura 6: Caracterización general de los encuestados: Años de experiencia en la industria minera. (fuente: Elaboración propia)

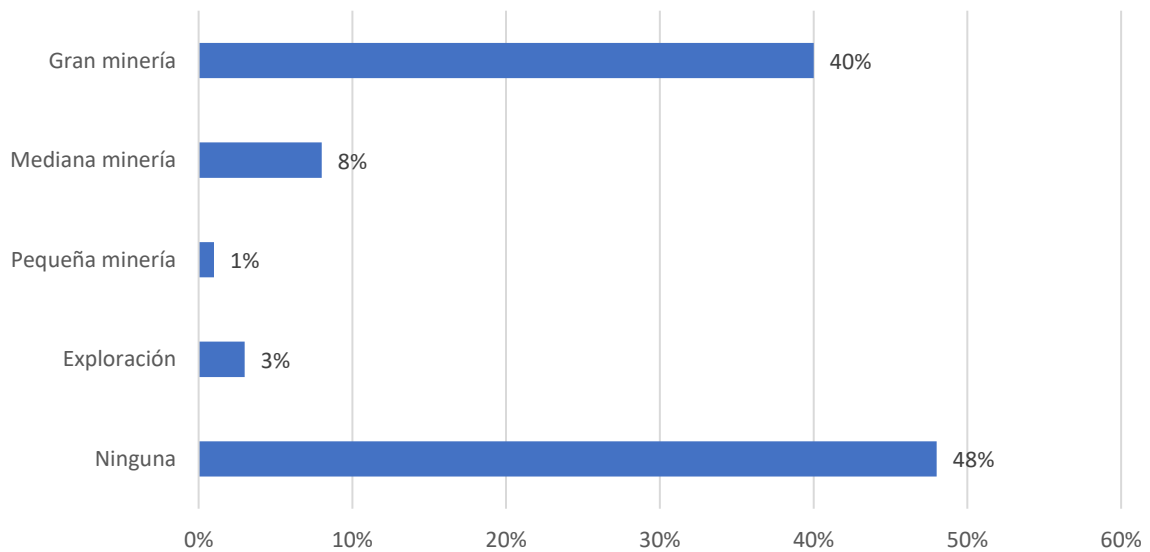


Figura 7: Caracterización general de los encuestados: Tipo de operación minera en la que trabajan principalmente. (fuente: Elaboración propia)

## Sección 2: Percepción de riesgos

Uno de los hallazgos más relevantes del estudio es que un 83% de los encuestados considera que el riesgo de falla estructural en los depósitos de relaves es *muy significativo* (figura 8), mientras que un 14% lo percibe como *moderadamente significativo*. Esta percepción generalizada refleja una marcada preocupación del sector frente a los riesgos geotécnicos, especialmente considerando el contexto sísmico del territorio chileno. En relación con el riesgo ambiental, un 79% considera que este es *alto o muy alto*, lo que pone en evidencia una preocupación que no se limita solo a los aspectos estructurales, sino que también incorpora los potenciales impactos sobre el medio ambiente (figura 9). En cuanto a los factores críticos para la estabilidad de los depósitos, los encuestados identificaron como más relevantes el diseño de los depósitos (26%), las condiciones geotécnicas (22%) y la gestión operativa (14%). Otros aspectos destacados fueron la tecnología de monitoreo (19%) y la supervisión regulatoria (16%), como se detalla en la figura 10. Esta identificación de variables clave por parte de los encuestados muestra una comprensión integral de los factores que determinan la estabilidad, integrando variables técnicas junto con elementos de gobernanza y supervisión."

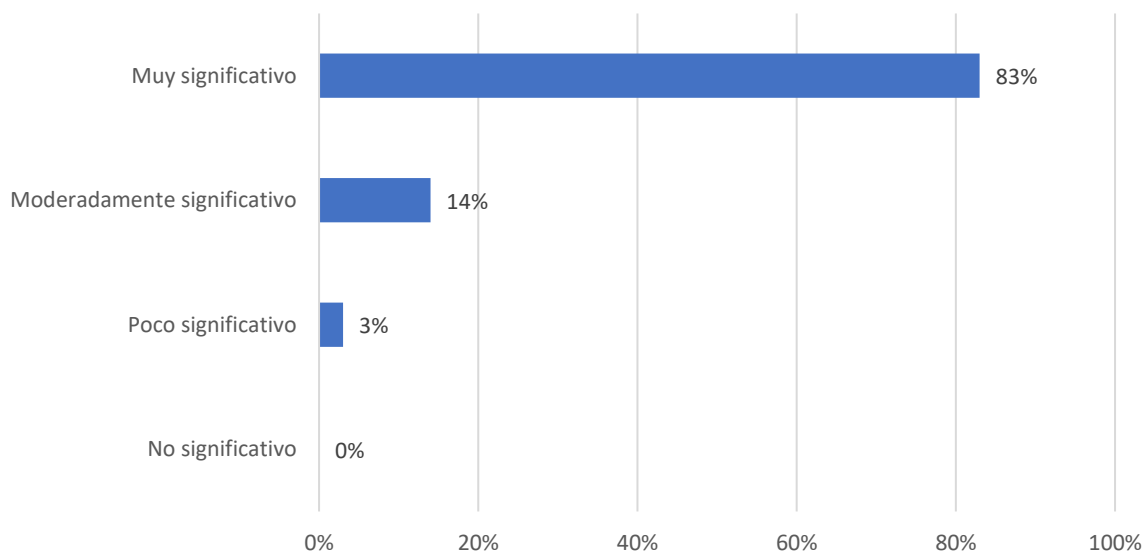


Figura 8: Percepción de riesgos relacionados con los depósitos de relaves: Significancia del riesgo de falla estructural en los depósitos de relaves. (fuente: Elaboración propia)

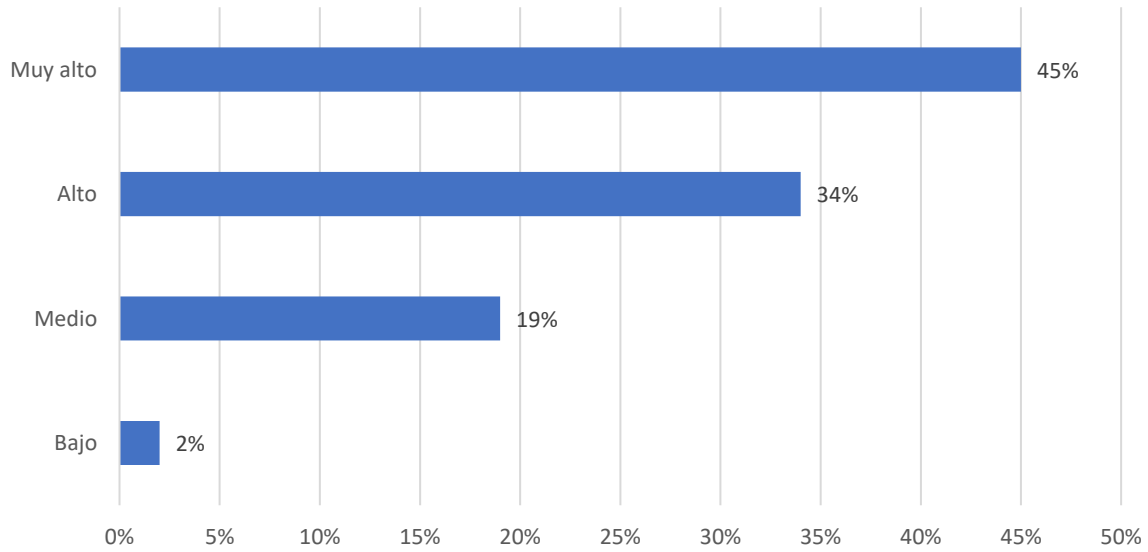


Figura 9: Percepción de riesgos relacionados con los depósitos de relaves: Percepción del riesgo ambiental asociado a los depósitos de relaves. (fuente: Elaboración propia)

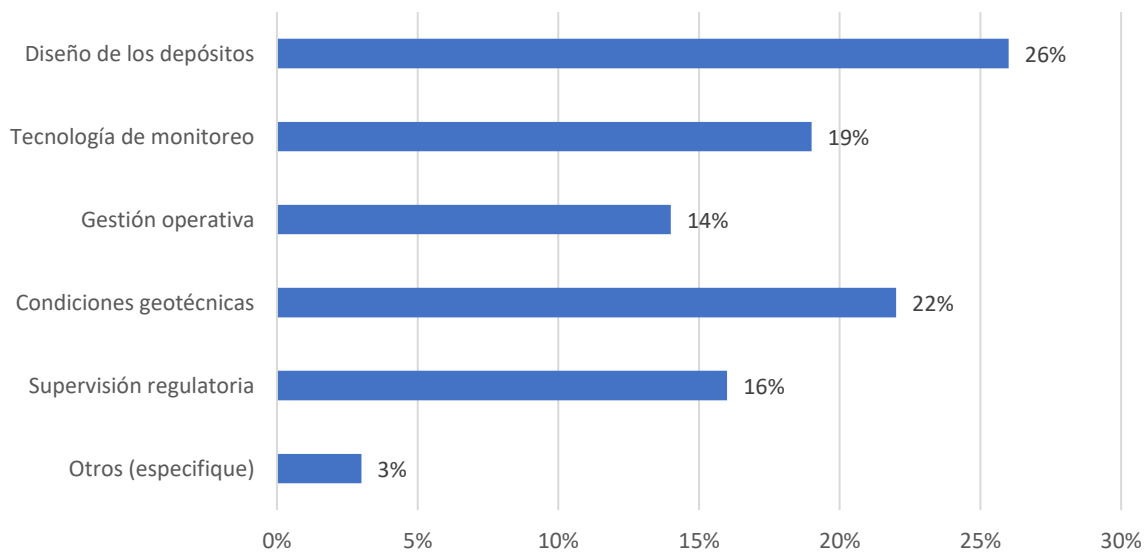


Figura 10: Percepción de riesgos relacionados con los depósitos de relaves: Factores críticos para la estabilidad de los depósitos de relaves (Fuente: Elaboración propia)

### Sección 3: Evaluación del marco regulatorio

En cuanto a la percepción sobre el marco normativo actual al garantizar la seguridad de los depósitos de relaves, un 36% de los encuestados considera que es *poco adecuado*, mientras que un 10% lo califica como *inadecuado* (figura 11). Estos resultados sugieren una visión crítica respecto a la capacidad del marco regulatorio chileno para responder a los desafíos técnicos y ambientales asociados a los depósitos de relaves.

Entre las principales limitaciones señaladas, destacan la *fiscalización insuficiente* (35%) y la *falta de actualización de normativas* (23%), seguidas por la *falta de personal capacitado* (19%) y la *escasez de recursos técnicos* (13%) (figura 12). Reflejando una preocupación transversal por las capacidades institucionales y por la necesidad de modernizar el marco legal.

Adicionalmente, un 72% de los encuestados considera *muy necesario* fortalecer la normativa relativa al monitoreo geotécnico y ambiental, percepción que se visualiza en la figura 13. Esta necesidad refuerza la idea de avanzar hacia una normativa dinámica, que incorpore estándares actualizados y exigencias técnicas acordes con los desafíos actuales del sector.

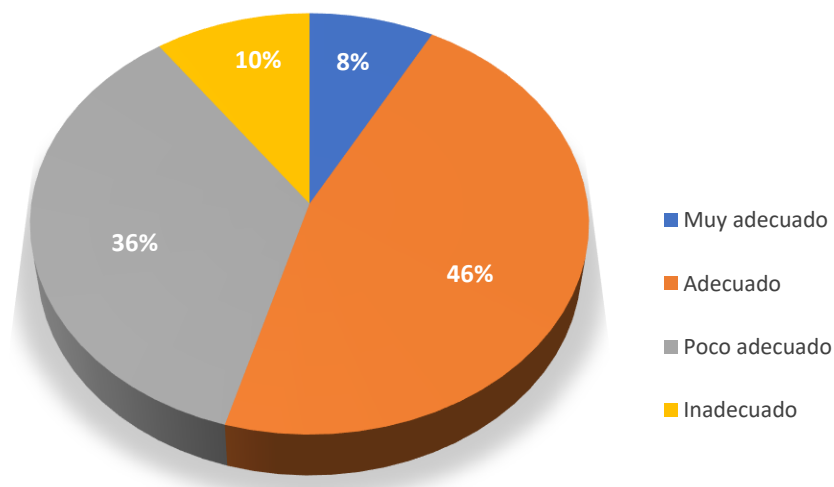


Figura 11: Evaluación del marco normativo chileno sobre depósitos de relaves: Adecuación del marco regulatorio para asegurar la seguridad de los depósitos de relaves. (fuente: Elaboración propia)

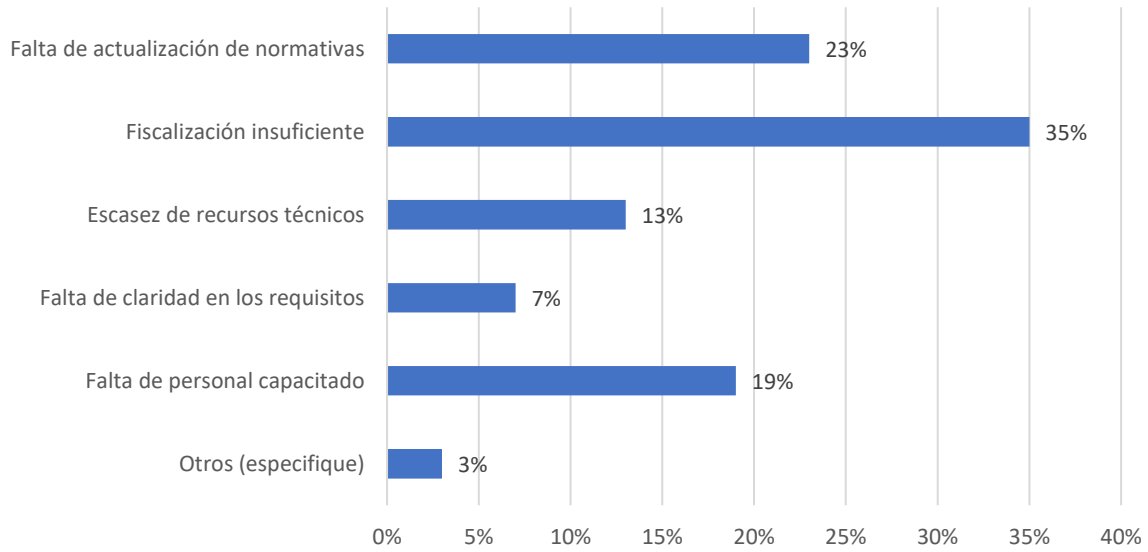


Figura 12: Evaluación del marco normativo chileno sobre depósitos de relaves: Principales limitaciones del marco regulatorio vigente en la gestión de relaves. (fuente: Elaboración propia)

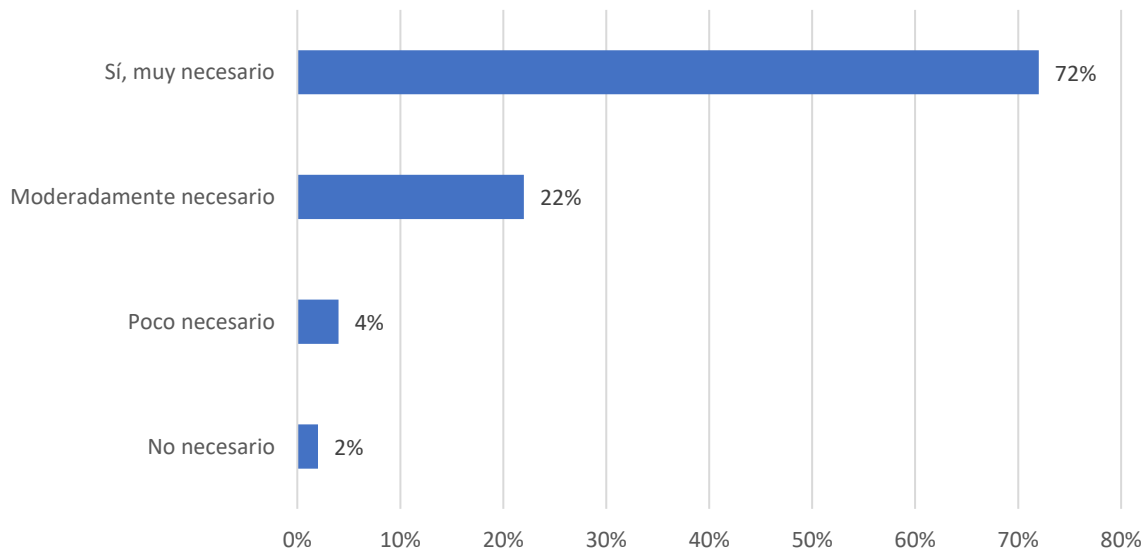


Figura 13: Evaluación del marco normativo chileno sobre depósitos de relaves: Necesidad de fortalecer la normativa en áreas de monitoreo geotécnico y ambiental. (fuente: Elaboración propia)

#### Sección 4: Aplicación de tecnologías

En cuanto a la implementación de tecnologías de monitoreo, solo un 26% de los encuestados señaló que estas se aplican en su operación minera (figura 14). Este bajo porcentaje contrasta con el alto grado de riesgo percibido y sugiere que aún existen barreras tecnológicas, económicas e institucionales para la implementación efectiva de soluciones tecnológicas.

Respecto a las herramientas consideradas más efectivas, destacan los *sensores de monitoreo en tiempo real* (32%), los *sistemas de alerta temprana* (29%) y el *modelado numérico* (18%), como se observa en la figura 15. Sin embargo, los encuestados también mencionaron en respuestas abiertas tecnologías específicas como *radares SAR/INSAR*, *prismas topográficos*, *pozos de monitoreo* y la *validación periódica de sensores* como elementos clave para una gestión eficiente.

En relación con la percepción de efectividad de estas tecnologías para la prevención de desastres, un 61% de los encuestados las considera *efectivas o muy efectivas*, lo cual se presenta en la figura 16. Este resultado demuestra un alto nivel de confianza en las herramientas tecnológicas, aunque su implementación práctica aún es limitada.

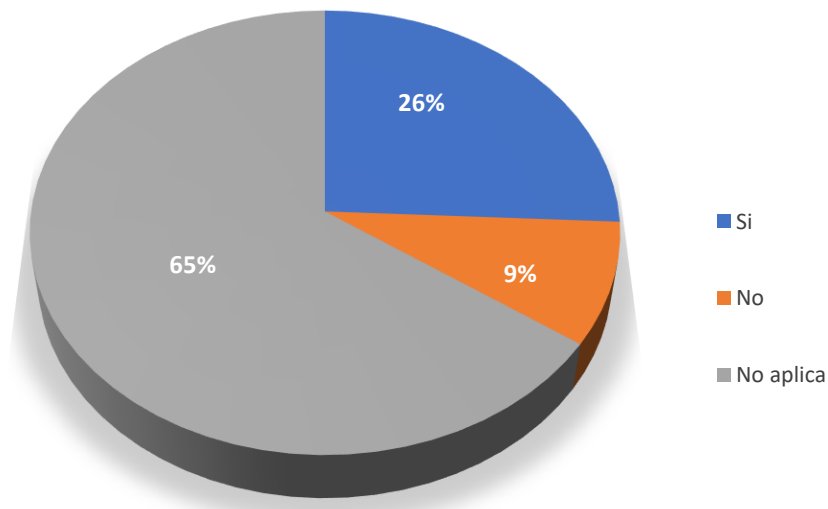


Figura 14: Evaluación del uso de tecnologías en la gestión de relaves: Implementación de tecnologías de monitoreo en las operaciones mineras. (Fuente: Elaboración propia)

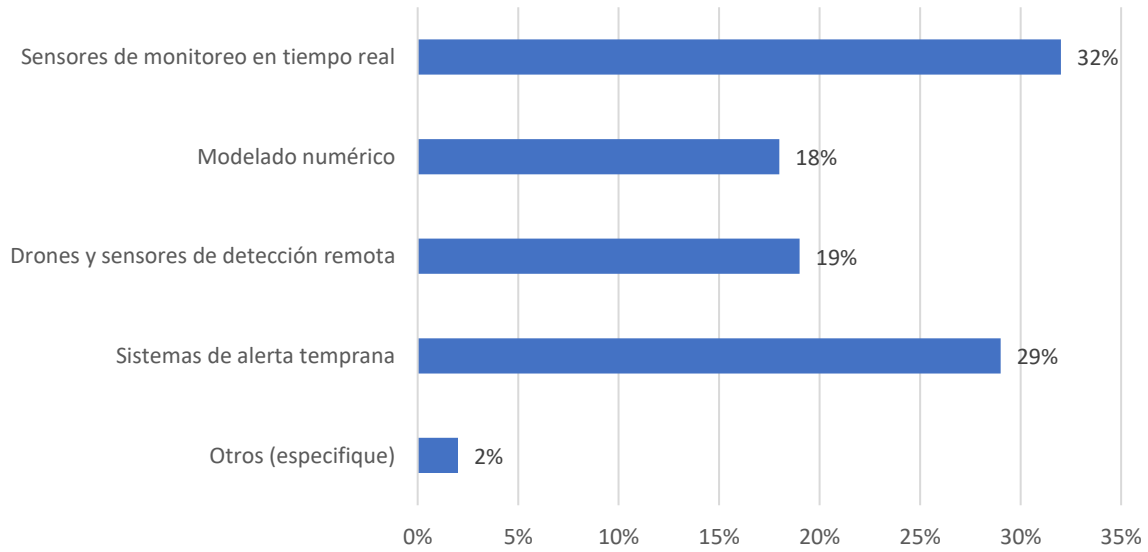


Figura 15: Evaluación del uso de tecnologías en la gestión de relaves: Tecnologías más efectivas para la gestión de relaves. (Fuente: Elaboración propia)

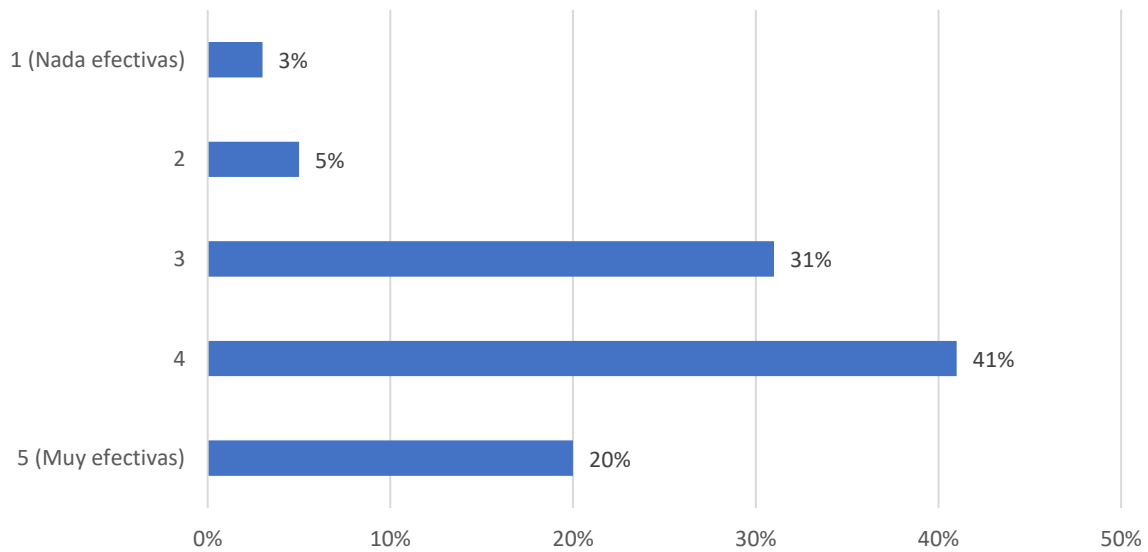


Figura 16: Evaluación del uso de tecnologías en la gestión de relaves. Efectividad de las tecnologías de monitoreo en la prevención de desastres. (Fuente: Elaboración propia)

## Sección 5: Medidas de mitigación y sostenibilidad

Las prácticas de mitigación más comunes en las operaciones mineras son el monitoreo geotécnico de estabilidad (20%), el control de calidad del agua y suelo (20%) y los planes de cierre y post-cierre (19%) (figura 17). Estas medidas son esenciales para la seguridad y sostenibilidad a largo plazo de las actividades mineras. Un 9% de los encuestados también destacó la reforestación y recuperación ambiental. Los resultados indican un enfoque creciente en la estabilidad geotécnica y la restauración de los ecosistemas impactados, reflejando un interés por mejorar la gestión ambiental.

Respecto a la percepción sobre la suficiencia de estas medidas, solo un 10% considera que son *totalmente suficientes*, mientras que un 26% las califica como *poco suficientes o insuficientes* (figura 18). Estos resultados refuerzan la necesidad de avanzar hacia prácticas más robustas e integradas.

Finalmente, el nivel de compromiso percibido de la industria con la sostenibilidad es considerado *moderado* por el 49% de los encuestados, mientras que un 32% lo considera *poco comprometido* (figura 19). Esto sugiere que, si bien existe un avance en el discurso institucional sobre sostenibilidad, aún se perciben importantes brechas entre el compromiso declarado y las acciones efectivas implementadas.

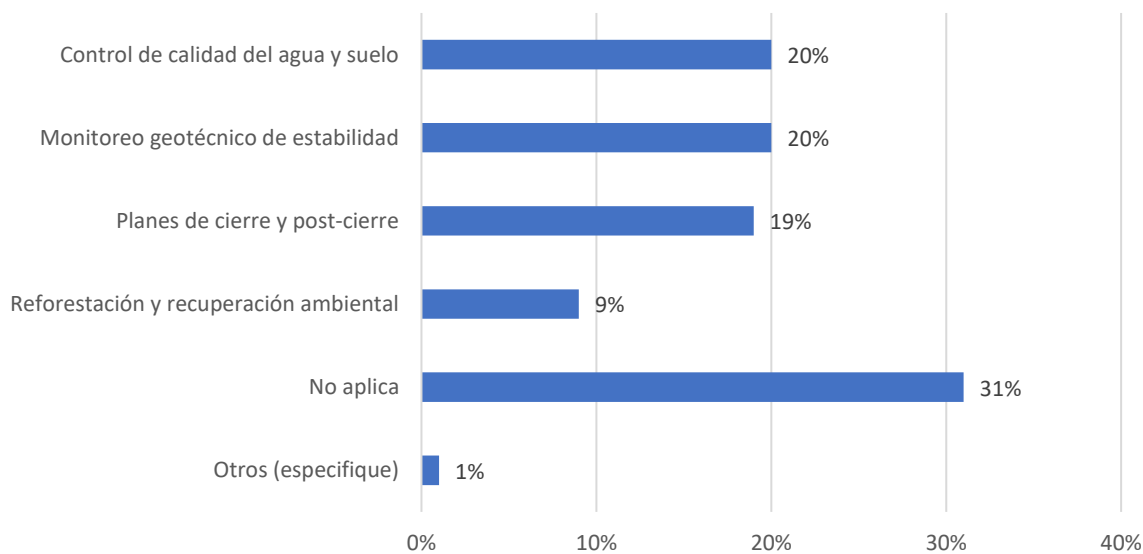


Figura 17 Medidas de mitigación y sostenibilidad en la gestión de relaves: Prácticas de mitigación empleadas en la operación minera. (fuente: Elaboración propia)

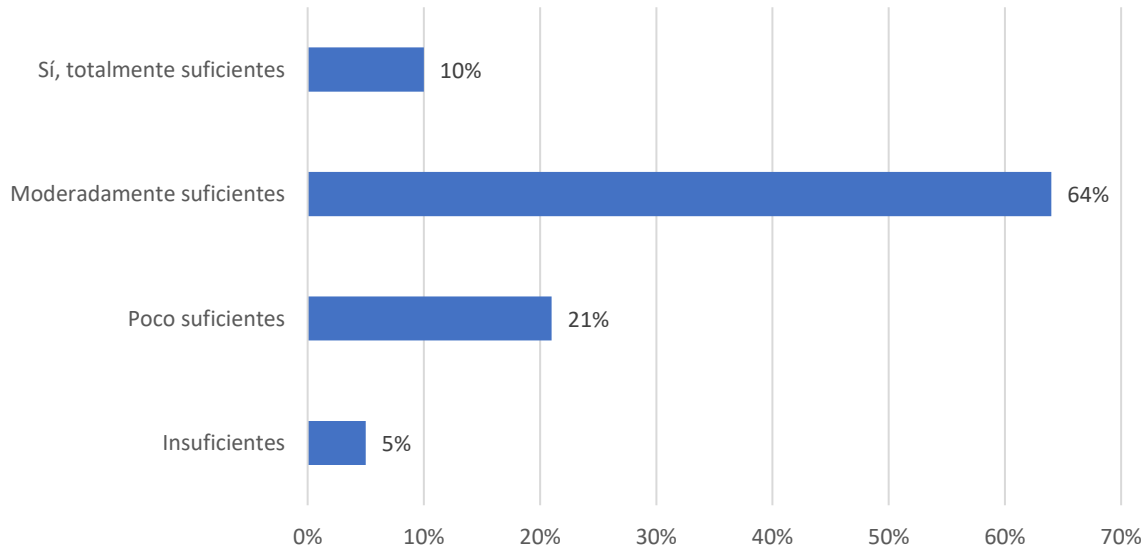


Figura 18: Medidas de mitigación y sostenibilidad en la gestión de relaves: Suficiencia de las prácticas de mitigación para la seguridad de las comunidades cercanas. (fuente: Elaboración propia)

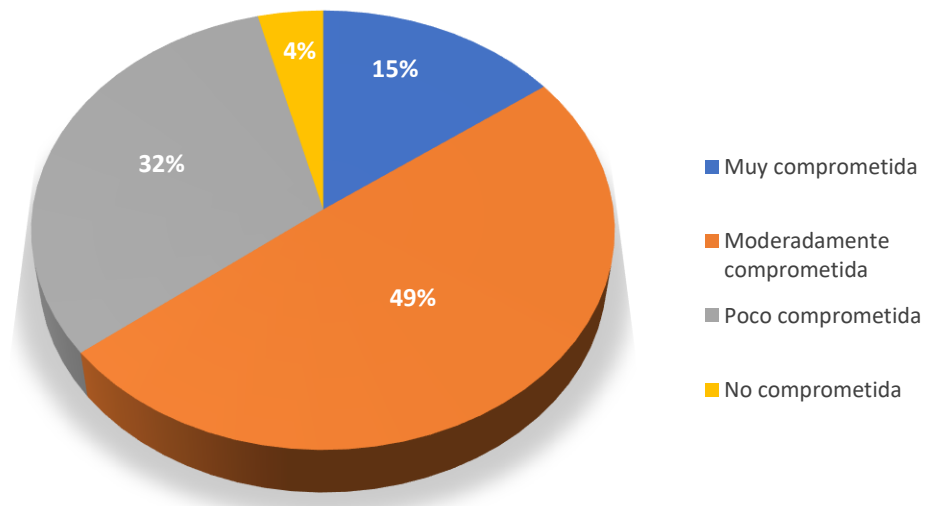


Figura 19: Medidas de mitigación y sostenibilidad en la gestión de relaves. Compromiso de la industria minera chilena con la sostenibilidad en la gestión de relaves. (fuente: Elaboración propia)

### 3.2.1 Hallazgos claves detectados

Desde el análisis de los resultados cuantitativos, se desprende los principales hallazgos para las cinco secciones establecidas:

- Alta percepción sobre el riesgo estructural y ambiental asociado a los depósitos de relaves.
- Abordar los riesgos desde una perspectiva integral que incorpore aspectos técnicos, ambientales y organizacionales.
- Bajo porcentaje de especialistas y técnicos en gestión de relaves y predominio de profesionales con menor experiencia en la disciplina.
- Percepción crítica respecto al marco regulatorio vigente, considerado por muchos como poco adecuado o insuficiente.
- Falta de actualización normativa.
- Fiscalización deficiente.
- Limitaciones presupuestarias y vacíos en la capacitación técnica.
- Brecha entre el compromiso declarado con la sostenibilidad y las acciones concretas implementadas.
- Debilidad en la gestión sostenible de los depósitos.

### 3.3 Discusión de resultados cualitativos

Entre los hallazgos, se destacan dos principales enfoques en la gestión de riesgos en depósitos de relaves en Chile: uno centrado en los desafíos operacionales y normativos, y otro en la percepción y conciencia ambiental. En este sentido, estos hallazgos son coherentes con lo que sostiene la literatura, tal como señala Kossoff et al. (2014) las principales causas de fallas en depósitos de relaves se relacionan con deficiencias en diseño y monitoreo, lo que refuerza la necesidad de fortalecer los marcos normativos y los sistemas de monitoreo, especialmente en contextos con alta sismicidad y pasivos ambientales históricos. En línea con esto, Mancini y Sala (2018) evidencian que la percepción social y la participación comunitaria siguen siendo limitadas, lo que incrementa la desconfianza hacia la industria minera y debilita su licencia social para operar. Finalmente, Villachica et al. (2021) y Kinnunen et al. (2022) subrayan que la adopción de estrategias de economía circular en la gestión de relaves depende no solo del desarrollo tecnológico, sino también de políticas públicas que incentiven la innovación y prioricen la sostenibilidad. Abordar estas brechas se debe **implementar** un enfoque multifacético que incorpore innovación tecnológica, marco regulatorio mejorado y una participación comunitaria proactiva. **para** la mejora de la gestión de riesgos de relaves.

Los entrevistados además identifican la falta de una gestión integrada como un desafío clave, especialmente en la pequeña y mediana minería, donde se subraya la necesidad de estandarizar las prácticas en todas las etapas del ciclo de vida de los relaves. Respecto de esta ausencia percibida en gestión integrada, estos hallazgos están parcialmente de acuerdo con lo que sostiene la literatura. En efecto se indica que se requiere abordar la falta de un enfoque integrado de gestión de riesgos en la gestión de relaves es fundamental para la seguridad y sostenibilidad de las operaciones mineras, especialmente en la pequeña y mediana minería (Adiansyah et al., 2015). La implementación de marcos integrales (Edraki et al., 2014), evaluaciones de riesgo específicas por sitio y tecnologías avanzadas puede mitigar significativamente los riesgos asociados a la gestión de relaves (Zhi et al., 2023). Para abordar la brecha detectada se propone que la pequeña y mediana minería debe **modificar** planes de trabajo actuales de pequeña y mediana minería, así como el monto destinado a mejora de incorporación de tecnologías y capacitación del personal **para** hacer frente a la gestión de riesgos.

También se resalta la importancia de implementar modelos estandarizados y unificados que tengan como base la gestión y categorización clasificatoria, la gestión y gobernanza, y la gestión de la emergencia, aplicando estos principios desde el diseño hasta el cierre y postcierre de los depósitos, como enfatizan los informantes. La necesidad de estandarización de las prácticas en todas las etapas del ciclo de vida de los relaves es clave para garantizar una gestión integral del riesgo, especialmente en contextos donde coexisten operadores de distinta escala y capacidades técnicas.

Esta visión es consistente con lo planteado por Adamo et al. (2021) y Zare et al. (2024), quienes destacan que la seguridad de los depósitos de relaves depende en gran medida de sistemas de monitoreo robustos basados en tecnologías y sensores remotos, en combinación con directrices estandarizadas de vigilancia y respuesta. Asimismo, Owen et al. (2020) señalan que la ausencia de protocolos públicos y marcos comunes de clasificación y emergencia ha contribuido a una débil gestión del riesgo en múltiples casos de fallas catastróficas. Por su parte, la Global Industry Standard on Tailings Management establece principios clave para una gestión coherente y responsable del riesgo, promoviendo estándares mínimos globales desde la planificación hasta el cierre de faenas (Global Tailings Review, 2020).

La brecha detectada se refiere a la falta de un marco técnico y normativo unificado que regule de manera coherente la gestión del riesgo a lo largo del ciclo de vida de los depósitos. Para terminar con esta carencia se deben **aumentar** la fiscalización estatal, fragmentando los procedimientos, y estableciendo una coordinación entre actores públicos y privados, para el aumento de la capacidad preventiva y de respuesta frente a posibles fallas estructurales o ambientales.

Otro desafío estratégico de importancia se relaciona con la falta de integración y la fragmentación de tareas, lo cual representa un reto significativo en la coordinación de procesos en la gestión de depósitos de relaves. Esta situación genera duplicación de esfuerzos, ineficiencia técnica y falta de trazabilidad, dificultando la aplicación de estrategias de gestión coherentes en todo el ciclo de vida del depósito.

Estos hallazgos coinciden con la literatura. Edraki et al. (2014) advierten que los enfoques fragmentados dificultan la coordinación entre las fases de diseño, operación y cierre, y que la falta de una visión integrada limita el logro de resultados ambientales y sociales sostenibles. Por su parte, Coffey et al. (2021) destacan que integrar los planes de relaves con la planificación minera es fundamental para optimizar recursos, reducir riesgos y alinear los objetivos estratégicos de largo plazo. Asimismo, Chryss et al. (2012) señala que la fragmentación entre disciplinas técnicas y administrativas debilita la toma de decisiones y la implementación de medidas preventivas eficaces.

Para solventar esta limitación se requiere **fortalecer** los modelos de gobernanza técnica y operativa mediante esquemas colaborativos y plataformas compartidas de información, **para** el logro de una gestión unificada que asegure trazabilidad, integración funcional y coherencia en la toma de decisiones a lo largo de todo el ciclo de vida de los depósitos, desde su planificación hasta la fase final de gestión.

En cuanto al aspecto ambiental, los participantes expresan preocupación por los efectos del cambio climático y la vulnerabilidad de los relaves más antiguos, que fueron construidos sin considerar riesgos actuales como la actividad sísmica o el aumento de volumen de residuos. En particular, expresan inquietud por los efectos del cambio climático sobre la estabilidad de los depósitos que fueron construidos bajo normativas técnicas que no contemplaban eventos climáticos extremos, el aumento progresivo de residuos ni la actividad sísmica actual. Esta preocupación se intensifica en contextos donde la información geotécnica es escasa y los relaves se encuentran en zonas de alta vulnerabilidad ambiental.

En este sentido, estos hallazgos son coherentes con lo que sostiene la literatura, como señala Dinis & Fiúza (2023) los relaves antiguos son particularmente susceptibles al colapso frente a eventos climáticos extremos, exacerbados por el cambio climático y la deficiente caracterización de materiales en el pasado. Del mismo modo, Gustafsson, et al. (2021) y Hancock & Coulthard (2022) subrayan que la falta de adaptación de los diseños originales frente a condiciones climáticas actuales representa una amenaza real para la seguridad estructural y ambiental de estos depósitos. Finalmente, la Global Tailings Review (2020) enfatiza la urgencia de adoptar estándares internacionales que integren explícitamente la resiliencia climática en todo el ciclo de vida de los relaves.

Dado este acuerdo, se propone **actualizar e integrar** estándares técnicos que incluyan variables climáticas en todo el ciclo de vida de los relaves, con énfasis en monitoreo geotécnico, auditorías

ambientales periódicas y planes de adaptación climática en relaves antiguos, para la prevención de fallas estructurales y fortalecimiento de la sostenibilidad frente al cambio climático.

En resumen, si bien se han registrado avances en monitoreo y normativas, persiste la necesidad de una gestión más integrada y proactiva para enfrentar los riesgos y desafíos de manera efectiva.

Un último aspecto refleja no solo el desafío técnico, sino también la importancia de abordar la imagen pública y la percepción social de los depósitos de relaves. En este sentido, estos hallazgos son coherentes con lo que sostiene la literatura. En particular, (Dare et al., 2014; Louzada et al., 2025 y Yu et al., 2025) sostienen que la aceptación social y la comunicación transparente son componentes esenciales de una gestión sostenible de relaves, destacando que la licencia social para operar es un proceso continuo que depende del compromiso activo de las comunidades. La gestión participativa, la comunicación pública y la inclusión ciudadana fortalecen la resiliencia frente a fallas y son fundamentales para reducir la desconfianza y aumentar la legitimidad institucional.

Entonces se propone **fortalecer** la gestión de relaves mediante estrategias de comunicación efectiva, participación comunitaria continua y monitoreo público, **para** la reconstrucción, mantención y mejora de la confianza y licencia social asegurando una gobernanza más robusta y sostenible.

### 3.4 Discusión de resultados cuantitativos

Los resultados cuantitativos obtenidos a partir de la encuesta aplicada a profesionales del ámbito minero revelan percepciones claras respecto a las principales fortalezas y debilidades del sistema de gestión de riesgos en depósitos de relaves en Chile. En términos generales, los entrevistados identifican una alta percepción sobre el riesgo estructural y ambiental asociado a los depósitos de relaves, lo que se refleja en que más del 79% considera ambos aspectos como altamente críticos. Esta preocupación no solo está relacionada con el potencial de fallas físicas, sino también con los impactos ecológicos y sociales que pueden derivarse de eventos adversos. En este sentido, Edraki et al. (2014) sostiene que una gestión integral de relaves debe considerar desde el diseño hasta el postcierre para garantizar seguridad física y sostenibilidad ambiental. Además, Franks et al. (2011) destaca que los depósitos de relaves representan uno de los mayores pasivos de la minería moderna, requiriendo principios de desarrollo sostenible en su disposición. Finalmente, Mancini & Sala (2018) subrayan que la percepción pública sobre la peligrosidad de estos depósitos incide directamente en la licencia social para operar, y por ello debe gestionarse activamente mediante monitoreo, transparencia y participación.

Para abordar la brecha detectada se propone **incluir** en los marcos de gestión de riesgo no solo criterios técnicos, sino también instrumentos de evaluación y comunicación de forma clara de la peligrosidad percibida **para** facilitar la confianza pública y reforzando la prevención de fallas estructurales y ambientales.

Se tiene además que los hallazgos muestran claramente que se reconoce la necesidad de abordar los riesgos de relaves desde una perspectiva integral que combine los factores técnicos, ambientales y organizacionales. Esta comprensión transversal trasciende el diseño físico, y enfatiza que la gestión efectiva de los depósitos exige una mirada sistémica.

En este sentido, estos hallazgos concuerdan con lo que la literatura especializada indica. En particular, Juutinen et al. (2023), Edraki et al. (2014) y Adiansyah et al. (2015) sostienen que la evolución geoquímica y mineralógica de los relaves bajo condiciones ambientales variables afecta directamente su estabilidad y el riesgo asociado, y que una gestión efectiva debe integrar monitoreo técnico, análisis ambiental y estructuras organizacionales robustas.

Es por ello por lo que se propone **desarrollar e implementar** un modelo de gestión de relaves integral que combine monitoreo técnico avanzado, evaluación ambiental periódica y fortalecimiento institucional, **para** la anticipación y mitigación de riesgos estructurales y ambientales de manera coherente y sostenible.

Por otro lado, si bien los resultados reflejan avances en materia de regulación y monitoreo, también evidencian limitaciones estructurales en la capacidad instalada del sector, particularmente la baja proporción de especialistas y técnicos en gestión de relaves, así como la prevalencia de profesionales con menor experiencia laboral. Esta situación podría obstaculizar la implementación efectiva de prácticas avanzadas de mitigación y monitoreo.

Los entrevistados advierten que la escasez de especialistas y técnicos calificados representa una barrera crítica para aplicar buenas prácticas en gestión de relaves. Estos hallazgos están en línea con lo reportado por Meggyes et al. (2008) y Kemp & Owen. (2024), quienes concluyen que existen vacíos significativos en habilidades técnicas, acompañados de una reticencia a compartir información crítica relacionada con la seguridad y la operación de relaves. Asimismo, Spencer et al. (2022) destacan que la demanda por expertos capacitados ha superado ampliamente a la oferta formativa disponible, señalando que la mayoría de los programas de capacitación son recientes, poco accesibles o no están estandarizados.

Para abordar esta brecha, se propone **establecer** estándares nacionales de competencias y certificaciones profesionales, a través de programas de formación especializada, educación continua y alianzas entre universidades, organismos reguladores y el sector industrial. Esto **para** el aseguramiento de que quienes gestionan depósitos de relaves cuenten con las capacidades técnicas y prácticas necesarias que les permita un desempeño seguro, sostenible y alineado con estándares internacionales.

A esto se suma una percepción crítica respecto al marco regulatorio vigente en materia de depósitos de relaves, considerado por muchos como poco adecuado o insuficiente para enfrentar los desafíos actuales de seguridad, sostenibilidad y gobernanza (Owen et al., 2020). Esta visión es respaldada por evidencia que apunta a fallas estructurales en los sistemas de fiscalización y en la adopción de tecnologías de monitoreo que garanticen una evaluación continua del riesgo (Zare et al., 2024). Además, desde una perspectiva más amplia, se ha advertido que la legitimidad de la normativa en América Latina depende de su capacidad para responder a las demandas sociales y ambientales emergentes, lo que exige una revisión periódica de sus fundamentos y mecanismos de implementación (Ehrnström-Fuentes & Kröger, 2016).

Para abordar esta limitación, se sugiere **revisar y actualizar** el marco normativo vigente con énfasis en la fiscalización técnica independiente, el fortalecimiento institucional de los entes reguladores y la incorporación de estándares internacionales adaptados a los contextos locales, para el aumento de la confianza pública y mejora de la efectividad regulatoria.

Se destaca además la falta de actualización normativa, la fiscalización deficiente y la escasez de personal técnico capacitado. Si bien existe un reconocimiento del valor de las tecnologías de monitoreo, su implementación práctica aún es baja, lo cual sugiere que los avances técnicos disponibles no están siendo plenamente aprovechados, ya sea por falta de exigencia normativa, limitaciones presupuestarias o vacíos en la capacitación técnica, evidenciando que factores como la presión por cumplir metas de producción, la estabilidad geoquímica del material, la hidrología local o la gobernanza interna de las operaciones son aspectos que influyen de manera significativa en la estabilidad de los depósitos, pero que no siempre son abordados con la profundidad que requieren.

Los entrevistados identifican que la ausencia de marcos normativos actualizados limita la incorporación de tecnologías de monitoreo y prevención en la gestión de depósitos de relaves, contribuyendo a la persistencia de vulnerabilidades estructurales (Boada et al., 2023; Owen et al., 2020). Asimismo, estudios recientes advierten que una fiscalización poco especializada, carente de personal técnico y herramientas digitales, impide la detección temprana de inestabilidades geotécnicas (Zare et al., 2024; Rana et al., 2024). La literatura también muestra que los bajos niveles de inversión en monitoreo estructural se explican por prioridades presupuestarias centradas en la productividad más que en la prevención del riesgo (Ouellet et al., 2022; Cacciuttolo et al., 2024). A ello se suma que las competencias técnicas en organismos reguladores no se han actualizado al ritmo del desarrollo tecnológico, lo que dificulta la evaluación crítica de los depósitos (Clarkson et al., 2020). Finalmente, la gobernanza interna de muchas operaciones continúa fragmentada, sin una articulación clara entre ingeniería, medio ambiente y seguridad, lo que reduce la capacidad de respuesta y aprendizaje organizacional (Ehrnström-Fuentes & Kröger, 2017).

Se sugiere **actualizar** el marco normativo incluyendo requisitos técnicos mínimos de monitoreo continuo, fortaleciendo la fiscalización con personal especializado y herramientas digitales, e implementando incentivos financieros y regulaciones **para** la capacitación continua del personal en tecnologías emergentes, con un enfoque preventivo y territorialmente contextualizado.

Asimismo, entre los hallazgos, se destaca una discrepancia relevante entre el compromiso discursivo de las compañías mineras con la sostenibilidad y la implementación efectiva de prácticas sostenibles en terreno. Esta brecha se manifiesta, por ejemplo, en el retraso en la adopción de tecnologías limpias, en la falta de mecanismos transparentes de monitoreo ambiental y en la escasa incorporación de comunidades locales en la toma de decisiones. En este sentido, estos hallazgos son coherentes con lo que plantea la literatura, en particular (Araya et al., 2021; Araujo et al., 2022 y Mancini et al., 2024) quienes sostienen que la falta de alineación entre las políticas de sostenibilidad declaradas y su aplicación real debilita la credibilidad de la industria, compromete la licencia social para operar y perpetúa conflictos socioambientales no resueltos. Debido a esto se recomienda **desarrollar** mecanismos independientes de verificación de cumplimiento sostenible, incorporando auditorías sociales y ambientales periódicas, y fortaleciendo políticas de rendición de cuentas **para** el cierre de esta brecha y el avance hacia una gobernanza minera más coherente y confiable.

Se tiene además una percepción generalizada entre los encuestados respecto a la insuficiencia de las medidas actuales de mitigación implementadas por la industria minera. Esta percepción se traduce en una preocupación constante por la débil integración de principios de sostenibilidad en la gestión de depósitos de relaves, lo que pone en duda el compromiso real de las empresas con una gestión segura y responsable. En este sentido, estos hallazgos son coherentes con lo que sostiene la literatura,

en particular (Suppes, & Heuss-Aßbichler., 2021; Beylot et al., 2022; Cacciuttolo & Pulido., 2022 y Adewuyi et al., 2024) quienes argumentan que la sostenibilidad en la gestión de relaves requiere no solo tecnologías adecuadas, sino también voluntad política, fiscalización efectiva, participación de las comunidades y fortalecimiento institucional. Dado esto, se propone **actualizar e implementar** marcos normativos vinculantes que promuevan estándares de sostenibilidad ambiental, social y técnica, junto con auditorías independientes y sistemas de monitoreo público **para** la reducción de la distancia entre el compromiso declarado con la sostenibilidad y su implementación efectiva en terreno.

En conjunto, estos resultados refuerzan la necesidad de avanzar hacia un modelo de gestión de riesgos más robusto, que combine herramientas tecnológicas, capacidades técnicas, criterios ambientales y un marco normativo coherente con los desafíos actuales del país. Esta visión integrada, propuesta en esta tesis, resulta imprescindible para garantizar la seguridad estructural, la protección ambiental y la sostenibilidad social en la gestión de depósitos de relaves en Chile.

### 3.5 Modelo propuesto

Considerando las respuestas a las preguntas del instrumento propuesto en la sección 2 del presente documento, el decreto supremo DS N°248, la discusión de resultados desarrollada en este estudio y referencias especializadas ya citadas en el texto es posible la siguiente propuesta para un “*modelo integrado de gestión de riesgos*”, donde se integran tres bloques esenciales en la estructura, *clasificación y evaluación del riesgo, gobernanza y gestión técnica y gestión de la emergencia y preparación* (figura 20).

Este modelo contempla la actualización normativa permanente que funciona como columna vertebral y orienta todos los componentes a operar conforme a estándares actualizados y flexibles, adaptables a contextos técnicos, sociales y ambientales, así como el soporte transversal basado en monitoreo inteligente, auditorías técnicas externas y sistemas de mejora continua, los cuales alimentan de manera sistemática la toma de decisiones.

Cada componente integra de manera sinérgica los principales ejes que deben regir la gestión de riesgos en depósitos de relaves, bajo un enfoque de mejora continua, sostenibilidad territorial y adaptación normativa. Está articulado por una lógica de flujo secuencial y retroalimentación, donde cada bloque funcional se encuentra conectado con los demás por medio de relaciones dinámicas que aseguran la trazabilidad y consistencia del sistema.

Descripción estructurada del modelo propuesto de gestión de riesgos en depósitos de relaves:

#### 1. Clasificación y evaluación del riesgo

Este bloque inicial organiza los procesos fundamentales para identificar, valorar y anticipar los riesgos asociados a los depósitos de relaves. A través de un despliegue progresivo, se caracteriza la infraestructura y sus contextos territoriales

- Caracterización de diseño y tipo de relave: Identifica el diseño constructivo, tipo de construcción (aguas arriba, aguas abajo, centro), tipo de material y tecnología empleada. Esta caracterización entrega la base técnica para evaluar estabilidad estructural y comportamiento en condiciones adversas.
- Evaluación de daño potencial considerando variables territoriales y sociales: Integra elementos del contexto, como cercanía a poblaciones, presencia de infraestructura crítica o ecosistemas sensibles, con el fin de estimar la magnitud del daño en caso de falla.
- Clasificación por consecuencias (químicas, físicas y sociales): Permite jerarquizar los depósitos con base en los efectos que tendrían en el medioambiente y la población, considerando toxicidad, dispersión, vulnerabilidad humana y nivel de exposición.
- Indicadores de presión (hídrica, sísmica y pasivos históricos): Evalúa condiciones geográficas, climatológicas y estructurales que puedan aumentar el riesgo, incluyendo carga hídrica, actividad sísmica o historial de incidentes pasados.

Este bloque alimenta directamente a la gobernanza técnica, brindando la información técnica y contextual necesaria para una evaluación normativa ajustada a la realidad operativa del depósito, donde la caracterización del riesgo no se limite a ser un diagnóstico aislado, sino que se transforma en un insumo activo para la mejora del marco regulatorio. Las brechas normativas o técnicas no se

definen en abstracto, sino a partir de los riesgos concretos identificados en el territorio, generando así una retroalimentación funcional entre el análisis técnico y la gobernanza.

## **2. Gobernanza y gestión técnica**

Este eje integra la dimensión normativa, institucional y técnica del modelo, asegurando coherencia entre diagnóstico, planificación y acción:

- Evaluación del cumplimiento regulatorio actualizado: Revisa si el depósito cumple con la normativa vigente y los estándares internacionales. Se apoya en auditorías y documentación técnica para garantizar alineación regulatoria.
- Identificación de brechas normativas y técnicas: Detecta vacíos en el marco legal y técnico, especialmente en contextos de pequeña y mediana minería, donde suelen existir asimetrías en recursos, capacidad y fiscalización.
- Indicadores de desempeño integrados (ambientales, sociales y económicos): Proporcionan una visión multidimensional del comportamiento del depósito, permitiendo su monitoreo en tiempo real y facilitando decisiones informadas.
- Coordinación institucional y transparencia pública: Promueve la interoperabilidad entre agencias, empresas, fiscalizadores y comunidades. Garantiza la trazabilidad de la información, el acceso público y la vigilancia compartida.

Este bloque se nutre de las etapas previas de caracterización del riesgo, y a su vez retroalimenta el sistema al recibir datos del monitoreo post-cierre, fortaleciendo los estándares normativos a partir de aprendizajes prácticos.

## **3. Gestión de la emergencia y preparación**

Este eje operacionaliza la capacidad de anticipar, enfrentar y contener eventos críticos

- Planes de contingencia validados con simulacro: Documentos técnicos operativos que deben someterse a validación mediante ejercicios prácticos para asegurar su funcionalidad y corregir debilidades.
- Capacitación continua por tipo de relave: Programa formativo adaptado a la naturaleza del depósito. Refuerza capacidades técnicas del personal y la comunidad, asegurando respuestas eficaces ante eventos críticos.
- Sistema de notificación de emergencias con base comunitaria: Sistema de alerta temprana centrado en la comunidad local, promoviendo tiempos de reacción rápidos, confianza institucional y vigilancia participativa.

El circuito cerrado de flechas dentro del bloque de emergencias representa el funcionamiento continuo entre planes de contingencia, capacitación diferenciada y el sistema de notificación con base comunitaria. Se conectan ejes distintos, revelando cómo el conocimiento generado (riesgo) informa la gobernanza y, a su vez, permite operacionalizar la preparación ante emergencias. Así, el modelo asegura que las decisiones técnicas no sean aisladas, sino interdependientes y dinámicas.

Este bloque extiende además el enfoque preventivo hacia etapas de cierre o abandono, abordando aspectos tanto ambientales como de valorización de minerales, estos dos componentes son:

- Medidas ambientales de post-cierre y monitoreo prolongado: Incluyen estabilización física y química, control de drenajes, monitoreo estructural y recuperación ecológica progresiva. Estas acciones buscan evitar deterioros, prevenir desastres y restaurar el entorno en línea con el marco legal vigente.
- Valorización de pasivos mineros: recuperación de minerales y control ambiental: Se propone el reaprovechamiento de relaves antiguos con potencial económico, integrándolos en un circuito de remediación bajo condiciones seguras. Esta estrategia permite aplicar el modelo también a depósitos inactivos o abandonados.

La retroalimentación desde la gestión post-cierre hacia la evaluación regulatoria sugiere un ciclo virtuoso de mejora continua: las lecciones aprendidas en el monitoreo de relaves refuerzan los estándares aplicables a depósitos activos. La relación bidireccional entre la gestión post-cierre y valorización de pasivos mineros hacia los sistemas de emergencia implica que estas etapas comparten aprendizajes, protocolos y necesidades de vigilancia comunitaria. También se vincula con el bloque de emergencia por medio del monitoreo comunitario y vigilancia post-cierre, y extiende su aplicación no solo a depósitos operativos, sino que también puede aplicarse a contextos de pasivos mineros inactivos o abandonados, lo que amplía su alcance estratégico y permite diseñar intervenciones integradas de recuperación minera, ambiental y social incluso en contextos donde no existe una operación vigente.

#### **Soporte transversal: Monitoreo, auditorías y mejoras**

- Monitoreo inteligente: Uso de sensores, sistemas remotos y analítica predictiva para detectar desvíos de comportamiento del depósito en tiempo real.
- Auditorías externas: Revisión técnica imparcial por terceros especializados, asegurando que las evaluaciones y operaciones cumplan con criterios técnicos y regulatorios.
- Sistema de mejora continua: Estructura que transforma datos en decisiones. Convierte la evidencia del monitoreo y auditorías en ajustes normativos, operacionales o estructurales que fortalecen el sistema.

Estos tres elementos no se limitan a un bloque específico, sino que interactúan con todos los componentes, reforzando su capacidad de adaptación, fiscalización y respuesta oportuna ante nuevos riesgos.

Este modelo propuesto constituye una herramienta integral, robusta y flexible, capaz de enfrentar los desafíos ambientales, técnicos y sociales que presentan los depósitos de relaves en Chile. Su diseño escalable permite su aplicación tanto en faenas activas como en pasivos mineros, fortaleciendo así una gestión sostenible y preventiva.

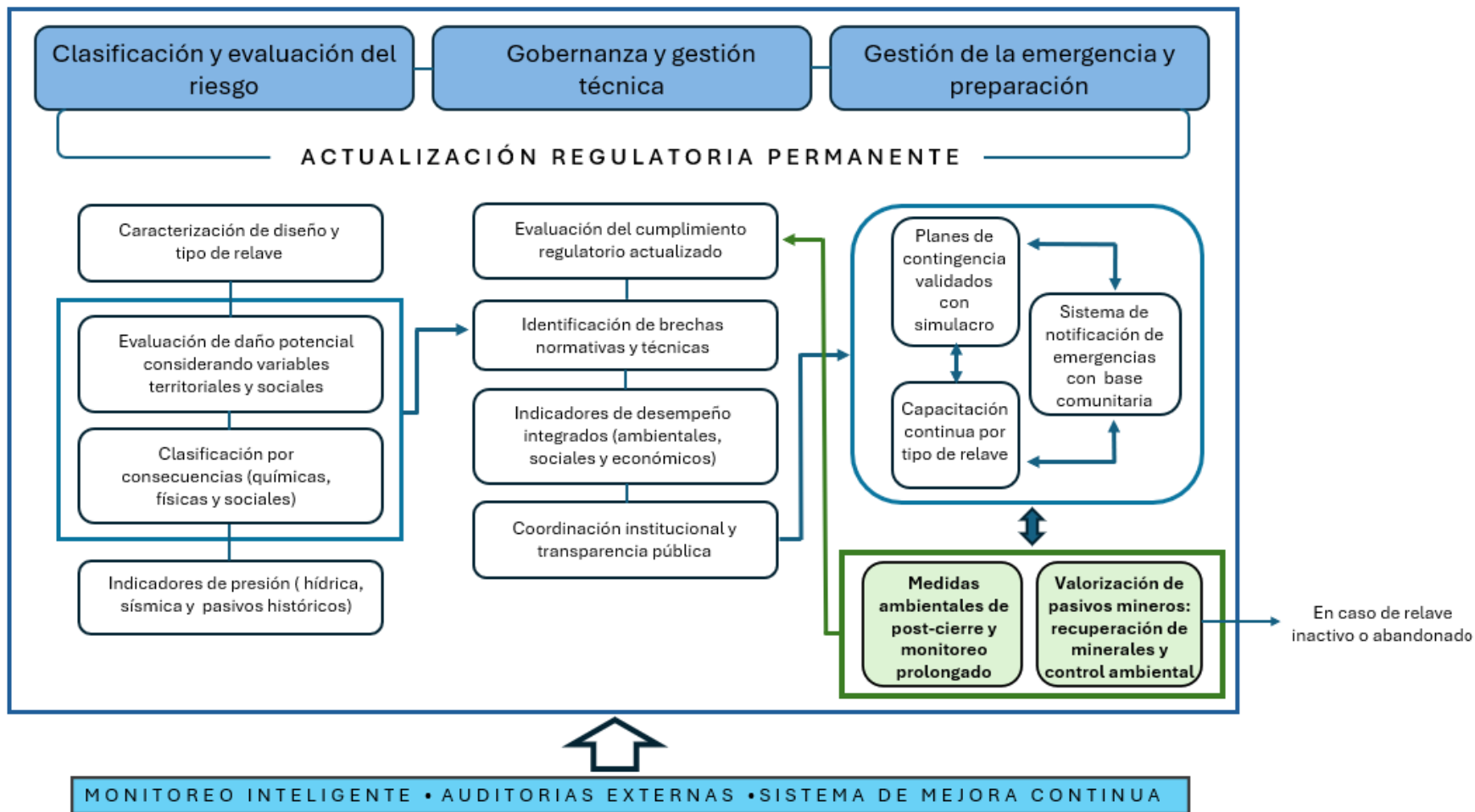


Figura 20: Modelo integrado de gestión de riesgos (fuente: Elaboración propia)

El modelo propuesto puede ampliarse mediante la incorporación de métricas e indicadores que permitan evaluar su desempeño y facilitar su implementación operativa. Entre las métricas estructurales destacan el factor de seguridad, la evolución de deformaciones, la presión de poros y los niveles piezométricos. En el ámbito ambiental, se incluyen el potencial de generación de drenaje ácido, calidad de aguas, balance hídrico y huella de agua. A nivel de gestión, el modelo puede monitorear cumplimiento del DS 248, frecuencia de inspecciones, auditorías independientes y mecanismos de transparencia con comunidades.

Asimismo, la integración de sensores geotécnicos, sistemas GNSS, plataformas digitales y análisis satelital permite avanzar hacia un monitoreo continuo y predictivo. Estos indicadores permiten transformar el modelo conceptual en una herramienta evaluable, replicable y adaptable a la operación real.

Al comparar el modelo propuesto con los marcos internacionales existentes, se identifican similitudes y diferencias relevantes. El modelo propuesto comparte elementos con TSM y GISTM, especialmente en la integración de estabilidad estructural, aspectos ambientales y monitoreo. No obstante, se diferencia por su adaptación directa al contexto chileno, incorporando variables geológicas y operacionales específicas, así como exigencias del DS 248. El modelo desarrollado en este estudio articula dimensiones técnicas, normativas y de percepción experta local, mejorando su aplicabilidad para faenas nacionales.

### 3.5.1 Contraste entre el enfoque regulatorio actual y el modelo de gestión de riesgos

A continuación, se presenta un cuadro comparativo entre el Decreto Supremo N° 248, que regula actualmente los depósitos de relaves en Chile, y el modelo integrado de gestión de riesgos propuesto en esta investigación. Este análisis permite visualizar las principales diferencias en cuanto al enfoque del riesgo, la integración institucional, la participación social y el tratamiento de aspectos como la post-operación y la valorización de pasivos mineros.

*Tabla III: Cuadro comparativo: DS n° 248 vs modelo de gestión de riesgos de relaves (fuente: Elaboración propia)*

<b>Eje /Tema</b>	<b>DS 248 (Reglamento oficial)</b>	<b>Modelo integrado (Estudio)</b>
<b>Propósito general</b>	Regular y aprobar proyectos de diseño, construcción, operación y cierre de depósitos de relaves.	Proponer una gestión integrada de riesgos estructurales y ambientales con enfoque preventivo y adaptativo.
<b>Enfoque del riesgo</b>	Enfoque técnico centrado en seguridad estructural y protección ambiental básica.	Multidimensional, considera riesgo técnico, social, ambiental y normativo.
<b>Evaluación técnica</b>	Altamente detallada en requisitos geotécnicos, hidrológicos y estructurales. Auditorías periódicas por SERNAGEOMIN.	Integra evaluación técnica con indicadores territoriales, sociales y ambientales. Valora contexto operativo.
<b>Participación comunitaria</b>	No contempla participación comunitaria activa.	Fomenta participación local, transparencia y monitoreo comunitario.

<b>Normativa y fiscalización</b>	Obligación de cumplimiento con fiscalización a cargo del SERNAGEOMIN.	Identifica brechas normativas y promueve actualización y articulación institucional.
<b>Tipos de depósito considerados</b>	Tranques, embalses, relaves espesados, filtrados y en pasta.	Incluye todos los tipos, pero con énfasis en condiciones de riesgo local.
<b>Monitoreo post-cierre</b>	Requiere plan de cierre, pero con monitoreo limitado post-cierre.	Monitoreo prolongado e integración de aprendizajes del post-cierre al sistema.
<b>Innovación tecnológica</b>	No exige explícitamente uso de nuevas tecnologías.	Promueve sensores, sistemas predictivos y análisis en tiempo real.
<b>Aplicabilidad a pequeña minería</b>	No diferencia capacidades de pequeña o mediana minería.	Enfatiza adaptabilidad del modelo según escala minera. Propone apoyo a pequeña minería.
<b>Gestión de emergencias</b>	Obligación de contar con plan de emergencias, pero sin simulacros comunitarios.	Planes validados con simulacros y alertas comunitarias.
<b>Valorización de pasivos</b>	No lo contempla.	Incluye recuperación ambiental y económica de relaves antiguos.

Como se observa en el cuadro comparativo (Tabla III), el modelo integrado propuesto no solo incorpora los aspectos técnicos del reglamento vigente, sino que amplía su alcance hacia una gestión más preventiva, participativa y adaptativa. A través de la integración de variables sociales, ambientales y regulatorias, se busca abordar las limitaciones estructurales del DS N° 248, especialmente en lo referente a la fiscalización, la inclusión de comunidades y la gestión post-cierre. Este contraste permite justificar la necesidad de contar con un enfoque más amplio, contextualizado y dinámico, que responda a los desafíos actuales de los depósitos de relaves en Chile.

En la siguiente sección se presenta la validación del modelo con expertos, instancia clave para evaluar su aplicabilidad, funcionalidad y legitimidad frente al contexto real.

### 3.6 Validación del modelo

Validar un modelo conceptual mixto implica un proceso riguroso, multietapa, donde el grupo focal con expertos no solo es pertinente, sino que actúa como un puente entre la teoría y la práctica, fortaleciendo la credibilidad y aplicabilidad del modelo en entornos reales (Liu et al., 2011; Bagur-Pons, et al., 2021). Para este caso, la validación del modelo se realizó en 4 niveles:

- **Validación teórica:** Se comprobó la consistencia lógica y la fundamentación teórica del modelo. Para esto se realizó un estudio cualitativo con expertos en el área disciplinar (tabla I) para la determinación de etapas, variables y dimensiones del modelo entre otros.
- **Validación empírica:** Se aplicó un instrumento cuantitativo (encuestas), de los que se obtuvieron análisis estadísticos basales, con las que se construyeron justificadamente los flujos, relaciones o interacciones entre dimensiones del modelo y sus variables.
- **Validación funcional:** Se verificó a través de un grupo focal (Tabla IV), si el modelo tiene utilidad práctica y aplicabilidad en el entorno de desempeño de este. Esto incluyó consideraciones de casos complejos establecidos por los expertos.
- **Validación participativa:** Consistió en presentar el modelo a actores clave (académicos, técnicos, gestores) para recoger retroalimentación cualitativa (también a través del grupo focal).

#### 3.6.1 Realización del grupo focal y validación participativa

- 1) **Selección de participantes:** Se convocó a 4 expertos que representaron la diversidad dentro del campo de dominio relevante, donde se incluyeron tanto académicos como profesionales del sector.

Tabla IIV: Muestra de expertos y académicos del grupo focal (fuente: Elaboración propia)

Nº Participante	Perfil del participante	Perfil experto/académico
1	Experto	Ingeniero Civil en Minas, MSc
2	Experto	PhD en minería
3	Académico	Académico en investigador universitario, PhD
4	Académico	Académico en investigador universitario, PhD

2) **Presentación inicial del modelo:** Se dedicaron 10–15 minutos a presentar de manera sintética, al grupo de expertos, el modelo conceptual, sus componentes y cómo fue construido, así como las definiciones que permiten su operación.

3) **Guion de preguntas abiertas:** Se utilizó un protocolo moderado que incluyó preguntas como:

- ¿Este modelo refleja adecuadamente la realidad del proceso?
- ¿Qué variables faltan o están sobrerrepresentadas?
- ¿Considera que la relación entre las distintas etapas y componentes del modelo es clara y coherente? ¿Dónde podría mejorar la articulación?
- ¿Qué ajustes haría usted para mejorar su aplicabilidad?

- ¿Considera útil el modelo para apoyar la toma de decisiones en contextos reales de minería?

**4) Registro y análisis:** Se grabó y transcribió la sesión, aplicando codificación temática para sintetizar las observaciones y retroalimentación, y evaluar qué ajustes se debió realizar al modelo propuesto inicialmente.

#### 3.6.2 Principales aportes del grupo focal, opiniones expertas y participativa

- El modelo fue percibido como más coherente y adecuado con las necesidades del mundo minero actual, y si bien puede sobrepasar los requerimientos de la pequeña minería, es necesario para abarcar los distintos tipos de relaves y sus diferentes caracterizaciones.
- Si bien se entiende la inclusión el concepto de valorización de pasivos, se debe tener cuidado con las expectativas que pueda causar la idea de valorizar dichos pasivos mineros, en particular pues hasta ahora, no se ha logrado de manera plena a nivel global.
- A nivel de monitoreo inteligente, se expresó que la necesidad de diferenciar el monitoreo sistemático de la herramienta misma, la cual podría ser o no inteligente. Sin embargo, se reconoció que la mayor parte de las actuales herramientas, dado el desarrollo tecnológico imperante, probablemente sean del tipo inteligente.
- Como futuro desarrollo, la posibilidad de presentar un proyecto (tipo FONDEF, por ejemplo) para sensar y monitorear algunos relaves, incluyendo inteligencias que faciliten la aplicación de este modelo (en particular, dados los últimos acontecimientos meteorológicos acontecidos en la zona centro norte).

## 4 Conclusiones

Este trabajo establece que las variables clave para la gestión integrada de riesgos, basado en ingeniería geológica y procesos mineros, que permiten mejorar la seguridad y sostenibilidad en los depósitos de relaves en Chile, son: la estabilidad física y química del depósito; el diseño y evaluación geotécnica considerando la sismicidad y el comportamiento del drenaje; y la implementación de tecnologías de monitoreo con respuesta anticipada que permitan prever posibles fallas estructurales. Además, se identifican como fundamentales el uso de herramientas de análisis de riesgos proactivos, la incorporación de estándares técnicos actualizados, la adecuada capacitación del personal técnico, la integración del ciclo de vida del depósito (desde el diseño hasta el cierre y post-cierre), y la recuperación de relaves en el marco de una economía circular. A esto se suma la necesidad de fortalecer el marco regulatorio, fomentar la coordinación entre disciplinas técnicas, ambientales y regulatorias, e incorporar la percepción social como un componente esencial para la legitimidad y aceptación de este tipo de proyectos. Estas variables, interrelacionadas, permiten construir un modelo de gestión que responda de manera más eficaz y preventiva a los desafíos que presentan los depósitos de relaves en el contexto geológico y minero de Chile

La influencia de la implementación de tecnologías avanzadas de monitoreo geotécnico y procesos mineros en la optimización de la gestión de riesgos en depósitos de relaves en Chile es significativa, ya que estas herramientas permiten aumentar la capacidad de detección temprana de inestabilidades estructurales y anticiparse a eventos críticos reduciendo la incertidumbre en la toma de decisiones. Tecnologías como sensores en tiempo real, sistemas de alerta temprana, modelación numérica, drones y plataformas de análisis predictivo, contribuyen al fortalecimiento del control operacional y la vigilancia continua de variables críticas como, desplazamientos, deformaciones y filtraciones. Sin embargo, los resultados muestran que su uso sigue siendo limitado en muchos contextos, especialmente fuera del ámbito de la gran minería, y que su efectividad depende tanto del nivel de inversión como de la formación técnica del personal encargado de su análisis e implementación. Estas tecnologías, además, deben estar respaldadas por un marco regulatorio actualizado que incentive su adopción sistemática y obligatoria, como parte de una gestión de riesgos moderna, preventiva y alineada con la sostenibilidad ambiental y la seguridad de las comunidades cercanas.

Para ello se desarrolló un modelo integrado de gestión de riesgos para depósitos de relaves en Chile, que combina la ingeniería geológica y minera con un marco regulatorio actualizado para la mejora de la seguridad y mitigación de los impactos ambientales. Este modelo se basa en la lógica de mejora continua y en la actualización regulatoria permanente, proponiendo una estructura dinámica que acompaña el ciclo de vida del depósito desde su caracterización hasta el cierre y post-cierre.

En efecto, los resultados muestran una fuerte percepción sobre la necesidad de mejorar la integración entre los componentes técnicos, normativos, ambientales y sociales en la gestión de riesgos de depósitos de relaves en Chile. El modelo desarrollado responde a los principales vacíos identificados en el diagnóstico, como la insuficiente fiscalización, la escasa aplicación de tecnologías avanzadas, y la débil articulación entre la normativa vigente, las condiciones operacionales reales y los impactos ambientales asociados. En particular, se evidencia una significativa brecha entre los avances tecnológicos disponibles y su implementación efectiva en faenas, especialmente en lo relativo al monitoreo geotécnico y ambiental. También se destacó la importancia de contar con equipos

profesionales especializados en riesgos, geotecnia, gestión ambiental y participación territorial, junto con la necesidad de actualizar y unificar los criterios normativos para avanzar hacia una gestión más preventiva e integrada. Los expertos coinciden en la relevancia de incorporar criterios de estabilidad estructural desde la ingeniería geológica, articulados con procesos mineros responsables y estrategias de mitigación ambiental, para evitar la acumulación de riesgos y reducir impactos negativos sobre los ecosistemas y comunidades cercanas. Asimismo, validan la urgencia de actualizar las metodologías de evaluación, fortaleciendo las capacidades técnicas y promoviendo una regulación coherente con las condiciones geotécnicas y ambientales del territorio. En conjunto, el modelo propuesto representa una herramienta aplicable y adaptable que contribuye a la toma de decisiones informadas, y además ofrece una estructura clara integrando el conocimiento técnico con el mejoramiento de la gestión ambiental y operacional, orientada a reforzar la seguridad, reduciendo vulnerabilidades y avanzando hacia una minería más responsable y sostenible.

En este contexto, el modelo propuesto no solo ofrece una estructura aplicable y adaptable para la toma de decisiones informadas, sino que integra de manera explícita las etapas de post-cierre y valorización de pasivos mineros, permitiendo su implementación también en relaves inactivos o abandonados. Esta dimensión amplía significativamente el alcance del modelo, ya que propone el tratamiento ambiental y el aprovechamiento económico de estos depósitos, hasta ahora poco abordados de forma sistemática debido a vacíos legales o escasa fiscalización. La valorización de pasivos mineros, mediante la recuperación de minerales remanentes bajo estándares ambientales, representa una oportunidad concreta para la reducción de riesgos, remediando impactos acumulados y generando beneficios para las comunidades cercanas.

Además, el modelo se presenta como una herramienta particularmente útil y factible de implementar en el contexto de la pequeña y mediana minería, sectores que concentran una gran proporción de los depósitos existentes en Chile y que enfrentan mayores limitaciones técnicas y normativas. Mientras que la gran minería ha comenzado con la aplicación de estándares como el *Global Industry Standard on Tailings Management*, la realidad de los actores de menor escala requiere de herramientas adaptadas, claras y operativas. En este sentido, el modelo propuesto ofrece una guía técnica, ambiental y normativa, promoviendo prácticas sostenibles, fortaleciendo la gobernanza del riesgo y contribuyendo a cerrar brechas estructurales, lo que favorece una gestión más equitativa y eficiente de los depósitos de relaves en todo el país.

Durante el desarrollo de este estudio, se abordaron diversas dimensiones que permitieron cumplir con los objetivos específicos planteados. En primer lugar, se realizó un análisis detallado de los riesgos asociados a los depósitos de relaves en Chile, incorporando aspectos geológicos, mineros y ambientales que influyen directamente en su estabilidad física y química, así como en su potencial de afectación socioambiental. Esta revisión integró antecedentes sobre sismicidad, comportamiento geotécnico, condiciones hidrogeológicas y ubicación territorial, lo que permitió construir una base sólida para comprender las debilidades estructurales del sistema actual de gestión de relaves.

Complementariamente, se exploraron las percepciones de mejora recogidas desde la experiencia de profesionales del área de geología y minería, a través de un instrumento de encuesta diseñado para identificar brechas, avances y propuestas concretas en la gestión de riesgos. Los resultados permitieron relevar coincidencias significativas en torno a la necesidad de modernizar la normativa vigente, fortalecer las capacidades técnicas, e incorporar tecnologías de monitoreo predictivo. Estas

percepciones aportaron elementos clave para contrastar el diagnóstico técnico con la realidad práctica en terreno, reforzando así la aplicabilidad del enfoque propuesto.

En relación con la reproducibilidad del análisis cualitativo, se implementaron medidas para asegurar consistencia metodológica. La reproducibilidad se garantizó mediante la documentación completa del proceso de codificación manual: criterios de inclusión, construcción de categorías, justificación temática y relación entre subcategorías. Esto permite que otro investigador, siguiendo la misma secuencia analítica, pueda obtener interpretaciones comparables. La convergencia temática y la saturación observada fortalecieron la consistencia y confiabilidad del análisis.

Finalmente, a partir de la integración entre el análisis técnico y las percepciones recogidas, se establecieron relaciones entre variables consideradas estratégicas para la construcción de un modelo integrado de gestión de riesgos. Este modelo articula componentes técnicos, normativos y sociales, abarcando todas las etapas del ciclo de vida del depósito de relaves, desde su diseño hasta el cierre y postcierre. La propuesta busca fortalecer una gestión preventiva, adaptable y coherente con los desafíos estructurales y ambientales del país, ofreciendo una herramienta útil para orientar decisiones en distintos contextos y escalas de la minería chilena.

En conjunto, el modelo integrado de gestión de riesgos presentado no solo aporta a la comprensión sistémica del problema, sino que ofrece una herramienta concreta y replicable para avanzar hacia una minería más segura, responsable y ambientalmente sostenible, especialmente en un país con una alta densidad de depósitos de relaves activos, inactivos y abandonados como Chile.

## 4.1 Trabajos futuros

Como parte de los trabajos que exceden el alcance de este proyecto de grado y que requieren de una investigación adicional tendiente a nuevos proyectos, se plantean los siguientes trabajos:

- Actualizar e implementar marcos normativos vinculantes que promuevan estándares de sostenibilidad ambiental, social y técnica, junto con auditorías independientes y sistemas de monitoreo público.
- Implementar un enfoque multifacético que incorpore innovación tecnológica, marco regulatorio mejorado y una participación comunitaria proactiva.
- Modificar planes de trabajo actuales de pequeña y mediana minería, así como el monto destinado a mejora de incorporación de tecnologías y capacitación del personal.
- Aumentar la fiscalización estatal, fragmentando los procedimientos, y estableciendo una coordinación entre actores públicos y privados.
- Fortalecer los modelos de gobernanza técnica y operativa mediante esquemas colaborativos y plataformas compartidas de información.
- Actualizar e integrar estándares técnicos que incluyan variables climáticas en todo el ciclo de vida de los relaves, con énfasis en monitoreo geotécnico, auditorías ambientales periódicas y planes de adaptación climática en relaves antiguos.
- Fortalecer la gestión de relaves mediante estrategias de comunicación efectiva, participación comunitaria continua y monitoreo público.
- Incluir en los marcos de gestión de riesgo no solo criterios técnicos, sino también instrumentos de evaluación y comunicación de forma clara de la peligrosidad percibida.
- Desarrollar e implementar un modelo de gestión de relaves integral que combine monitoreo técnico avanzado, evaluación ambiental periódica y fortalecimiento institucional.
- Establecer estándares nacionales de competencias y certificaciones profesionales, a través de programas de formación especializada, educación continua y alianzas entre universidades, organismos reguladores y el sector industrial.
- Revisar y actualizar el marco normativo vigente con énfasis en la fiscalización técnica independiente, el fortalecimiento institucional de los entes reguladores y la incorporación de estándares internacionales adaptados a los contextos locales.
- Actualizar el marco normativo incluyendo requisitos técnicos mínimos de monitoreo continuo, fortaleciendo la fiscalización con personal especializado y herramientas digitales, e implementando incentivos financieros y regulaciones.
- Desarrollar mecanismos independientes de verificación de cumplimiento sostenible, incorporando auditorías sociales y ambientales periódicas, y fortaleciendo políticas de rendición de cuentas.

## 5 Referencias

- Adamo, N., Al-Ansari, N., Sissakian, V., Laue, J., & Knutsson, S. (2021). Dam safety: Monitoring of tailings dams and safety reviews. *Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering*, 11(1), 249–289. <https://doi.org/10.47260/jesge/1117>
- Adewuyi, S. O., Anani, A., & Luxbacher, K. (2024). Advancing sustainable and circular mining through solid-liquid recovery of mine tailings. *Process Safety and Environmental Protection*, 189, 31–46. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.06.086>
- Adiansyah, J. S., Rosano, M., Vink, S., & Keir, G. (2015). A framework for a sustainable approach to mine tailings management: Disposal strategies. *Journal of Cleaner Production*, 108, 1050–1062. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.139>
- Aracena, I., & Triviño, T. (2019). *Manual de uso público: Técnicas de perforación, muestreo y caracterización para la recuperación de elementos de valor desde relaves* [Manual técnico]. JRI Ingeniería & Ecometales Limited. [https://relavesconvalor.cl/MANUAL\\_USO\\_PUBLICO.pdf](https://relavesconvalor.cl/MANUAL_USO_PUBLICO.pdf)
- Araya, N., Ramírez, Y., Cisternas, L. A., & Kraslawski, A. (2021). Use of real options to enhance water-energy nexus in mine tailings management. *Applied Energy*, 303, 117626. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117626>
- Araujo, F. S. M., Taborda-Llano, I., Nunes, E. B., & Santos, R. M. (2022). Recycling and Reuse of Mine Tailings: A Review of Advancements and Their Implications. *Geosciences*, 12(9), 319. <https://doi.org/10.3390/geosciences12090319>
- Beylot, A., Bodéan, F., Guezennec, A.-G., & Muller, S. (2022). LCA as a support to more sustainable tailings management: Critical review, lessons learnt and potential way forward. *Resources, Conservation and Recycling*, 183, 106347. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106347>
- Bagur Pons, S., Rosselló Ramón, M. R., Paz Lourido, B., & Verger, S. (2021). El enfoque integrador de la metodología mixta en la investigación educativa. *RELIEVE*, 27(1), art. 3. <http://doi.org/10.30827/relieve.v27i1.21053>
- Boada, G., Pasten, C., & Heresi, P. (2022). Analytical fragility curves for abandoned tailings dams in North-Central Chile. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 162, 107637. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2022.107637>
- Cacciuttolo, C., & Atencio, E. (2022). Past, present, and future of copper mine tailings governance in Chile (1905–2022): A review in one of the leading mining countries in the world. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(20), 13060. <https://doi.org/10.3390/ijerph192013060>

- Cacciuttolo Vargas, C., & Marinovic Pulido, A. (2022). Sustainable Management of Thickened Tailings in Chile and Peru: A Review of Practical Experience and Socio-Environmental Acceptance. *Sustainability*, 14(17), 10901. <https://doi.org/10.3390/su141710901>
- Cacciuttolo, C., Guzmán, V., Catriñir, P., & Atencio, E. (2024). Sensor Technologies for Safety Monitoring in Mine Tailings Storage Facilities: Solutions in the Industry 4.0 Era. *Minerals*, 14(5), 446. <https://doi.org/10.3390/min14050446>
- Carneiro, A., & Fourie, A. (2020). Assessing the impacts of uncertain future closure costs when evaluating strategies for tailings management. *Journal of Cleaner Production*, 247, 119173. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119173>
- Chalkley, R., Crane, R. A., Eyre, M., Hicks, K., Jackson, K. M., & Hudson-Edwards, K. A. (2023). A multi-scale feasibility study into acid mine drainage (AMD) monitoring using same-day observations. *Remote Sensing*, 15(1), 76. <https://doi.org/10.3390/rs15010076>
- Clarkson, L., Williams, D., & Seppälä, J. (2020). Real-time monitoring of tailings dams. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*. <https://doi.org/10.1080/17499518.2020.1740280>
- Consejo Minero. (2024). *Reporte anual 2023* [PDF]. Consejo Minero. <https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2024/04/Reporte-Anual-CM-2023.pdf>
- Cox, B., Innis, S., Mortaza, A., Kunz, N. C., & Steen, J. (2022). A unified metric for costing tailings dams and the consequences for tailings management. *Resources Policy*, 78, 102862. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.102862>
- Das, S., Priyadarshana, A., & Grebby, S. (2024). Monitoring the risk of a tailings dam collapse through spectral analysis of satellite InSAR time series data. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 38, 2911–2926. <https://doi.org/10.1007/s00477-024-02713-3>
- Dare, L., Schirmer, J., & Vanclay, F. (2014). Community engagement and social licence to operate. *Impact Assessment and Project Appraisal*, 32(3), 188–197. <https://doi.org/10.1080/14615517.2014.927108>
- Dinis, M. L., & Fiúza, A. M. (2023). Tailings dams: The environmental risks and failures management (cap. 40). En M. de Lurdes Dinis & A. Fiúza (Eds.), *Advances in Geoengineering* (pp. 400–420). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-25986-9\\_40](https://doi.org/10.1007/978-3-031-25986-9_40)
- Edraki, M., Baumgartl, T., Manlapig, E., Bradshaw, D., Franks, D. M., & Moran, C. J. (2014). Designing mine tailings for better environmental, social and economic outcomes: A review of alternative approaches. *Journal of Cleaner Production*, 84, 411–420. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.079>

- Ehrnström-Fuentes, M., & Kröger, M. (2017). In the shadows of social licence to operate: Untold investment grievances in Latin America. *Journal of Cleaner Production*, 141, 346–358. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.112>
- Franks, D. M., Boger, D. V., Côte, C. M., & Mulligan, D. R. (2011). Sustainable development principles for the disposal of mining and mineral processing wastes. *Resources Policy*, 36(2), 114–122. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2010.12.001>
- Global Tailings Review. (2020). *Global industry standard on tailings management*. International Council on Mining and Metals (ICMM); United Nations Environment Programme (UNEP); Principles for Responsible Investment (PRI). <https://globaltailingsreview.org/global-industry-standard/>
- Gustafsson, M.-T., Rodriguez-Morales, J. E., & Dellmuth, L. M. (2021). Private adaptation to climate risks: Evidence from the world's largest mining companies. *Climate Risk Management*, 34, 100386. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2021.100386>
- Hassan, S., Bhadwal, S. S., Khan, M., Sabreena, N., Nissa, K.-U., Shah, R. A., Bhat, H. M., Bhat, S. A., Lone, I. M., & Ganai, B. A. (2024). Revitalizing contaminated lands: A state of the art review on the remediation of mine tailings using phytoremediation and genomic approaches. *Chemosphere*, 356, 141889. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141889>
- Hancock, G., & Coulthard, T. J. (2022). Predicting the long-term erosional stability of valley-fill tailings dams using a landscape evolution model. En A. B. Fourie, M. Tibbett & G. Boggs (Eds.), *Mine Closure 2022: Proceedings of the 15th International Conference on Mine Closure* (pp. 1013–1024). Australian Centre for Geomechanics. [https://doi.org/10.36487/ACG\\_repo/2215\\_74](https://doi.org/10.36487/ACG_repo/2215_74)
- Hou, X., Zhang, Y., Liu, X., Zhou, C., Li, J., & Ke, M. (2024). Preparation and application of soil conditioner using iron ore tailings-biochar composite material. *Alexandria Engineering Journal*, 94, 219–225. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.03.067>
- Hudson-Edwards, K. A., Kemp, D., Torres-Cruz, L. A., Macklin, M. G., Brewer, P. A., Owen, J. R., Franks, D. M., Marquis, E., & Thomas, C. J. (2024). Tailings storage facilities, failures and disaster risk. *Nature Reviews Earth & Environment*, 5, 612–630. <https://doi.org/10.1038/s43017-024-00576-4>
- Juutinen, T., Seitsonen, J., & Sarala, P. (2023). Geochemical and mineralogical characterization of mine tailings at the Rautuvaara mine site and aspects to environmental conditions and resource potential. *Bulletin of the Geological Society of Finland*, 95(1), 59–78. <https://doi.org/10.17741/bgsf/95.1.005>
- Kemp, D., Sharma, V., Harris, J., Blitz, N., & Williams, D. (2024). Disclosure hesitancy and disaster risk: A survey of tailings professionals in the global mining industry. *Minerals Engineering*, 215, 108821. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2024.108821>

- Kinnunen, P., Karhu, M., Yli-Rantala, E., Kivikytö-Reponen, P., & Mäkinen, J. (2022). A review of circular economy strategies for mine tailings. *Cleaner Engineering and Technology*, 8, 100499. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100499>
- Kossoff, D., Dubbin, W. E., Alfredsson, M., Edwards, S. J., Macklin, M. G., & Hudson-Edwards, K. A. (2014). Mine tailings dams: Characteristics, failure, environmental impacts, and remediation. *Applied Geochemistry*, 51, 229–245. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.09.010>
- Lindsay, M. B. J., Moncur, M. C., Bain, J. L., Jambor, J. L., Ptacek, C. J., & Blowes, D. W. (2015). Geochemical and mineralogical aspects of sulfide mine tailings. *Applied Geochemistry*, 58, 45–63. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2015.01.009>
- Liu, J., Yu, Y., Zhang, L., & Nie, C. (2011). An overview of conceptual model for simulation and its validation. *Procedia Engineering*, 24, 152–158. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.470>
- Louzada, D. M., de Mendonça, M. B., & Zêzere, J. L. (2025). Community participation in disaster risk management due to tailings dam failures: The case of Conceição do Mato Dentro (MG). *GeoHazards*, 6(2), 21. <https://doi.org/10.3390/geohazards6020021>
- Lupo, J. F. (2019). Geotechnical risk-informed decision-making in mining. En J. Wesseloo (Ed.), *MGR 2019: Proceedings of the First International Conference on Mining Geomechanical Risk* (pp. 61–68). Australian Centre for Geomechanics. [https://doi.org/10.36487/ACG\\_rep/1905\\_0.5\\_Lupo](https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1905_0.5_Lupo)
- Mancini, L., & Sala, S. (2018). Social impact assessment in the mining sector: Review and comparison of indicators frameworks. *Resources Policy*, 57, 98–111. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.02.002>
- Mancini, S., Casale, M., Tazzini, A., & Dino, G. A. (2024). Use and Recovery of Extractive Waste and Tailings for Sustainable Raw Materials Supply. *Mining*, 4(1), 149-167. <https://doi.org/10.3390/mining4010010>
- Meggyes, T., Niederleithinger, E., Witt, K. J., Csövári, M., Kreft-Burman, K., Engels, J., ... Roehl, K. E. (2008). Enhancing the Safety of Tailings Management Facilities. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 17(4), 323–345. <https://doi.org/10.1080/15320380802143922>
- Ministerio de Minería. (2007). Decreto Supremo N.º 248: Reglamento para la aprobación de proyectos de diseño, construcción, operación y cierre de los depósitos de relaves. *Diario Oficial de la República de Chile*. <https://www.bcn.cl/leychile/n?i=259928>
- Moncur, M. C., Ptacek, C. J., Lindsay, M. B. J., Blowes, D. W., & Jambor, J. L. (2015). Long-term mineralogical and geochemical evolution of sulfide mine tailings under a shallow water cover. *Applied Geochemistry*, 57, 178–193. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2015.01.012>

- Morrison, K. F. (Ed.). (2022). Tailings management handbook: a lifecycle approach. Society for Mining, Metallurgy & Exploration. 1–1026.
- Ouellet, S. M., Dettmer, J., Olivier, G., DeWit, T., & Lato, M. (2022). Advanced monitoring of tailings dam performance using seismic noise and stress models. *Communications Earth & Environment*, 3(1), 301. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00629-w>
- Owen, J. R., Kemp, D., Lèbre, É., Svobodova, K., & Pérez Murillo, G. (2020). Catastrophic tailings dam failures and disaster risk disclosure. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 42, 101361. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2019.101361>
- Park, I., Tabelin, C. B., Jeon, S., Li, X., Seno, K., Ito, M., & Hiroyoshi, N. (2019). A review of recent strategies for acid mine drainage prevention and mine tailings recycling. *Chemosphere*, 219, 588–606. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.11.053>
- Picullo, L., Storrøsten, E. B., Liu, Z., Nadim, F., & Lacasse, S. (2022). A new look at the statistics of tailings dam failures. *Engineering Geology*, 303, 106657. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106657>
- Rana, N. M., Delaney, K. B., Evans, S. G., Deane, E., Small, A., Adria, D. A. M., McDougall, S., Ghahramani, N., & Take, W. A. (2024). Application of Sentinel-1 InSAR to monitor tailings dams and predict geotechnical instability: Practical considerations based on case study insights. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 83(204). <https://doi.org/10.1007/s10064-024-03680-3>
- Raspini, F., Bianchini, S., Bozzano, F., & Casagli, N. (2024). Satellite InSAR monitoring for structural health assessment of mine tailings dams. *Remote Sensing*, 16(2), 345. <https://doi.org/10.3390/rs16020345>
- Ruan, S., Han, S., Lu, C., & Gu, Q. (2023). Proactive control model for safety prediction in tailing dam management: Applying graph depth learning optimization. *Process Safety and Environmental Protection*, 172, 329–340. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.02.019>
- Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN). (2023). Catastro de depósitos de relaves: Depósitos activos y no activos 2023 [Archivo de datos en Excel]. Servicio Nacional de Geología y Minería. <https://www.sernageomin.cl/datos-publicos-deposito-de-relaves/>
- Silva-Cáceres, M., Guatame-García, A., & Vriens, B. (2024). Aqueous and mineralogical sulfur speciation in legacy tailings with variable redox conditions. *Applied Geochemistry*, 162, 105905. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2024.105905>

- Sordo, B., Rathje, E., & Kumar, K. (2025). Runout of liquefaction-induced tailings dam failure: Influence of earthquake motions and residual strength. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 194, 109371. <https://doi.org/10.1016/j.soildyne.2025.109371>
- Spencer, D. L., Bareither, C. A., Scalia IV, J., Hatton, C. N., & Ward, K. J. (2022). Characterizing tailings professional labor demand. *Mining Engineering*, 74(8), 45–53. <https://smenet.blob.core.windows.net/smecms/sme/media/smeazurestorage/publications/me-aug2022.pdf>
- Suppes, R., & Heuss-Aßbichler, S. (2021). *Resource potential of mine wastes: A conventional and sustainable perspective on a case study tailings mining project*. *Journal of Cleaner Production*, 297, 126446. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126446>
- Villachica, C., Clemente-Jul, C., Villachica, J., Villachica, L., & Llamosas, J. (2021). Circular economy in tailings management. *Mine Water and the Environment*, 40, 23–35. <https://doi.org/10.1007/s10230-020-00701-2>
- Yurisch, T. (2016). Situación de los pasivos ambientales mineros en Chile: El caso de los depósitos mineros en Chile. Fundación Terram. <https://www.terram.cl/wp-content/uploads/2018/04/Situación-de-los-Pasivos-Ambientales-Mineros-en-Chile.pdf>
- Yu, H., Zahidi, I., Fai, C., Liang, D., & Madsen, D. (2025). Tailings dam failures: A critical evaluation of current policies and communication frameworks. *Environmental Policy and Governance*, 35(1), 45–62. <https://doi.org/10.17863/CAM.114701>
- Xiang, C., Xiao, H., He, F., Dai, Z., Huang, W., Zhu, B., & Liu, S. (2024). Prediction of soil heavy metal content around mine tailings using multiple methods combined with transformed hyperspectral reflectance data. *Ore and Energy Resource Geology*, 18(Pt B), 100072. <https://doi.org/10.1016/j.oreoa.2024.100072>
- Zare, M., Nasategay, F., Gomez, J. A., Moayedi Far, A., & Sattarvand, J. (2024). A review of tailings dam safety monitoring guidelines and systems. *Minerals*, 14(6), 551. <https://doi.org/10.3390/min14060551>
- Zhi, M., Zhu, Y., Jang, J.-C., Wang, S., Chiang, P.-C., Su, C., Liang, S., Li, Y., & Yuan, Y. (2023). Analysis of storage capacity change and dam failure risk for tailings ponds using WebGIS-based UAV 3D image. *Sustainability*, 15(19), 14062. <https://doi.org/10.3390/su151914062>

## 6 Anexo 1: Revisión de plagio

(Pendiente para la versión final de biblioteca, luego de recibidas las evaluaciones externas)

## 7 Anexo 2: Artículo propuesto desde esta tesis

Artículo sometido a Mining de MDPI:

Leslie Vinet, Héctor Valdés-González & Mauricio Calderón. *Risk Management Model for Tailings Storage Facilities in Chile: An Approach from Geological and Mining Engineering and the Regulatory Framework*. Mining, MDPI, (sometido Septiembre de 2025).