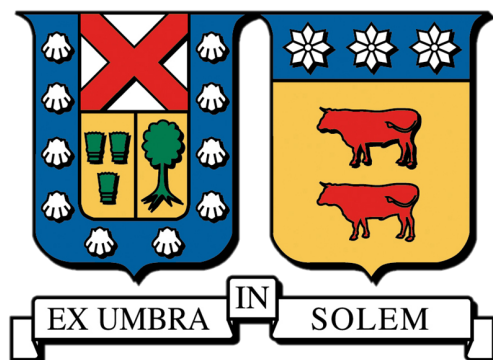




Universidad Técnica Federico Santa María

Departamento de Industrias

Evaluación del impacto de la calidad de datos de monitoreo hídrico subterráneo en el riesgo regulatorio y económico de la industria minera chilena bajo el marco normativo de la DGA

Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil Industrial

Dante Eduardo Poblete Cáceres

PROFESOR GUÍA

Bernardo Pincheira

PROFESOR CORREFERENTE

Esteban Salgado

SANTIAGO DE CHILE, 5 de octubre de 2026



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Evaluación del impacto de la calidad de datos de monitoreo hídrico subterráneo en el riesgo regulatorio y económico de la industria minera chilena bajo el marco normativo de la DGA

Nombre del candidato(a): Dante Eduardo Poblete Cáceres

Carrera / Grado: Ingeniería Civil Industrial

Campus: Campus Vitacura **Departamento:** Departamento de Industrias

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Bernardo Pincheira, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

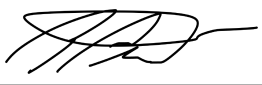
☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 3 de octubre de 2026 **Firma:** 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 3 de octubre de 2026 **Firma:** 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

Resumen

Chile es el primer productor mundial de cobre y sostiene esa posición sobre un consumo hídrico creciente, extraído de acuíferos de la zona centro que la evidencia documenta en descenso sostenido. El endurecimiento del marco normativo de la Dirección General de Aguas (DGA), en particular la Resolución Exenta N.º 1.238 de 2019 y la Ley N.º 21.435 de 2022, impuso obligaciones de monitoreo continuo cuyo cumplimiento depende de la calidad de los datos que generan los propios sistemas de medición, dimensión sobre la que la literatura no ofrece evidencia sistemática para el contexto minero latinoamericano. Esta investigación desarrolla un framework de apoyo a la decisión de inversión en sistemas de monitoreo IoT para la gran y mediana minería de la zona centro, articulando tres insumos metodológicamente independientes: la revisión documental del marco normativo, la modelación paramétrica del riesgo regulatorio y económico mediante simulación de Monte Carlo con distribuciones no informativas, y el análisis costo-beneficio de tres arquitecturas tecnológicas alternativas. El framework se aplica a tres casos de gran minería del cobre: las divisiones Andina y El Teniente de Codelco y la faena Los Bronces de Anglo American. En el plano teórico, el modelo extiende el concepto de *guard band* con un segundo canal de riesgo, el incumplimiento de las obligaciones de instalación, mantención y transmisión, no sujeto al descuento por incertidumbre de medición y que concentra entre el 55 % y el 84 % de la exposición estimada. En el plano económico, la exposición por multas resulta marginal frente al EBITDA operacional, del orden de una diezmilésima de punto porcentual por punto de monitoreo, mientras que las sanciones accesorias por reincidencia la superan entre 2.300 y 141.400 veces; la arquitectura LoRaWAN privada es la más costo-efectiva según Valor Anual Equivalente en los tres casos, de forma robusta a once escenarios de sensibilidad. Se concluye que la justificación económica del monitoreo hídrico no reside en la materialidad de la multa, sino en la cobertura frente a la paralización de faenas y la caducidad del derecho de aprovechamiento.

Palabras clave: riesgo regulatorio, calidad de datos, monitoreo hídrico subterráneo, Internet de las cosas (IoT), minería del cobre, Dirección General de Aguas.

Abstract

Chile is the world's leading copper producer, a position sustained by a growing demand for water drawn from central-zone aquifers that the evidence documents in sustained decline. The tightening of the regulatory framework of the Chilean water authority (Dirección General de Aguas, DGA), in particular Exempt Resolution No. 1,238 of 2019 and Law No. 21,435 of 2022, imposed continuous monitoring obligations whose fulfilment depends on the quality of the data generated by the measurement systems themselves, a dimension for which the literature offers no systematic evidence in the Latin American mining context. This research develops an investment decision-support framework for IoT water monitoring systems in large- and medium-scale mining in central Chile, articulating three methodologically independent inputs: a documentary review of the regulatory framework, parametric modelling of regulatory and economic risk through Monte Carlo simulation with non-informative distributions, and a cost-benefit analysis of three alternative technological architectures. The framework is applied to three large-scale copper mining cases: Codelco's Andina and El Teniente divisions and Anglo American's Los Bronces operation. On the theoretical side, the model extends the *guard band* concept with a second risk channel, non-compliance with installation, maintenance and transmission obligations, which is not subject to the measurement-uncertainty discount and accounts for between 55% and 84% of the estimated exposure. On the economic side, fine exposure proves marginal relative to operating EBITDA, on the order of one ten-thousandth of a percentage point per monitoring point, whereas the accessory sanctions triggered by recidivism exceed it by between 2,300 and 141,400 times; a private LoRaWAN architecture is the most cost-effective by Equivalent Annual Value in all three cases, robustly across eleven sensitivity scenarios. The study concludes that the economic case for water monitoring rests not on the materiality of the fine, but on the coverage it provides against the suspension of operations and the forfeiture of water use rights.

Keywords: regulatory risk, data quality, groundwater monitoring, Internet of Things (IoT), copper mining, Chilean water authority (DGA).

Glosario

Se definen aquí únicamente las siglas y los términos cuyo significado no forma parte del vocabulario habitual de la disciplina: los propios del marco normativo hídrico chileno, de la hidrogeología y de las tecnologías de telemetría empleadas en el monitoreo.

Siglas y acrónimos

DGA. Dirección General de Aguas, organismo del Ministerio de Obras Públicas a cargo de la administración, el otorgamiento y la fiscalización de los derechos de aprovechamiento de aguas en Chile.

EAV. Valor Anual Equivalente (*equivalent annual value*): anualización del VAN sobre la vida útil propia de cada alternativa. Es el criterio válido para comparar proyectos de vida útil desigual, a diferencia del VAN, que premia mecánicamente al de mayor duración. Se emplea la sigla inglesa por consistencia con la fuente metodológica citada.

LoRaWAN. *Long Range Wide Area Network*: protocolo de comunicación inalámbrica de largo alcance y bajo consumo que opera en espectro no licenciado, sin suscripción a un operador de telecomunicaciones. Corresponde a la Arquitectura A evaluada en esta investigación.

LTE-M / NB-IoT. *LTE for Machines* y *Narrowband IoT*: estándares de comunicación celular de bajo consumo que operan sobre la red de un operador móvil. Corresponden a la Arquitectura B.

MEE. Monitoreo de extracciones efectivas: sistema de medición que la DGA exige instalar en las obras de captación para registrar y transmitir caudal, volumen acumulado y nivel freático.

SCADA. *Supervisory Control and Data Acquisition*: plataforma de supervisión y adquisición de datos de procesos industriales. En esta investigación se evalúa en su variante de transmisión satelital, que corresponde a la Arquitectura C.

SINA. Sistema de Información Nacional de Aguas: plataforma de la DGA a la que los titulares deben transmitir de forma continua los datos de sus sistemas de monitoreo.

SMA. Superintendencia del Medio Ambiente, organismo fiscalizador del cumplimiento de las Resoluciones de Calificación Ambiental.

SNIFA. Sistema Nacional de Información de Fiscalización Ambiental: repositorio público de los procedimientos sancionatorios de la SMA, fuente de la evidencia de fiscalización con que se calibró el modelo de riesgo.

Términos técnicos

Artículo 173 ter. Disposición del Código de Aguas, incorporada por la Ley N.º 21.435 de 2022, que gradúa las infracciones en cinco grados según su gravedad y habilita, en casos de reincidencia, las sanciones accesorias de paralización de faenas y caducidad del derecho de aprovechamiento.

Derecho de aprovechamiento de aguas. Título que autoriza a su titular a extraer un caudal determinado de una fuente específica. Su caducidad equivale, para una operación minera, a la pérdida del activo hídrico que sostiene su continuidad productiva.

Guard band (banda de resguardo). Zona de resguardo que se añade a ambos lados de un umbral normativo para absorber la incertidumbre del instrumento de medición. Una extracción que cae dentro de esa zona no permite afirmar el incumplimiento con la confianza estadística exigida, de modo que un instrumento menos preciso amplía la zona y debilita la capacidad probatoria del fiscalizador.

Nivel freático. Profundidad de la superficie libre del agua subterránea en un acuífero. Es una de las tres variables que la normativa obliga a medir y transmitir, junto al caudal instantáneo y al volumen

acumulado.

Obra de captación. Infraestructura mediante la cual se extrae agua de una fuente subterránea (pozo, dren o galería filtrante). Es la unidad sobre la que recae la obligación de instalar el sistema de monitoreo.

Piezómetro. Instrumento que mide el nivel freático en un punto de captación.

Punto de monitoreo genérico. Unidad de análisis empleada en esta investigación: una obra de captación con caudal autorizado de referencia $Q_{aut} = 100$. Se adopta porque no existen caudales autorizados públicos por faena que permitan escalar los resultados al nivel de la operación completa.

Tabla de Contenidos

Índice

Resumen	1
Abstract	2
Glosario	3
1 Problema de Investigación	7
2 Objetivos	9
2.1 Objetivo General	9
2.2 Objetivos Específicos	10
3 Marco Teórico	11
3.1 Escenario mundial: la minería del cobre y la presión sobre el agua subterránea	11
3.2 Escenario chileno: consumo hídrico minero y situación de los acuíferos en la zona centro de Chile	12
3.3 Regulación hídrica aplicable a la minería en Chile	16
3.3.1 Evolución del marco normativo: de 1981 a 2022	17
3.3.2 La Ley N.º 21.435 de 2022 y el régimen sancionatorio	18
3.3.3 Capacidad fiscalizadora de la DGA y asimetría de información	21
3.4 Factores de decisión: calidad de datos, fallas técnicas y capacidad fiscalizadora	22
3.4.1 Calidad de datos: dimensiones y atributos críticos	22
3.4.2 Fallas técnicas: hardware, software y analítica	23
3.4.3 La incertidumbre de medición como fuente de riesgo regulatorio	26
3.5 Incentivos económicos y regulatorios para la inversión en monitoreo	27
3.5.1 Incentivos económicos: el análisis costo-beneficio de la inversión en IoT	28
3.5.2 Incentivos regulatorios: cumplimiento, reputación y acceso a financiamiento	29
3.6 El rol de Chile en la regulación hídrica latinoamericana y en la adopción de IoT en minería	30
3.6.1 Chile en el contexto de la regulación hídrica latinoamericana	30
3.6.2 Adopción de IoT en minería: tendencias y brechas	31

3.6.3	Tipología de arquitecturas IoT alternativas para el monitoreo hídrico minero	31
4	Metodología	35
4.1	Casos de estudio y muestreo	35
4.2	Fuentes y tipos de datos	37
4.3	Procedimiento y herramientas de análisis	38
4.3.1	Análisis normativo	38
4.3.2	Taxonomía de fallas de monitoreo IoT	38
4.3.3	Modelo paramétrico de riesgo	39
4.3.4	Análisis costo-beneficio de arquitecturas IoT	44
5	Resultados	47
5.1	Resultados del análisis normativo	47
5.2	Resultados de la taxonomía de fallas aplicada	50
5.3	Resultados del modelo paramétrico de riesgo	52
5.4	Resultados del análisis costo-beneficio de arquitecturas IoT	59
5.5	Análisis de sensibilidad	63
5.6	Síntesis: el framework de apoyo a la decisión de inversión	69
6	Discusión	71
6.1	Interpretación de los resultados a la luz del marco teórico	71
6.2	Implicancias para la toma de decisiones de inversión y para el diseño regulatorio	73
6.3	Limitaciones metodológicas	75
6.4	Comparación con la experiencia regulatoria latinoamericana e internacional	75
7	Conclusiones	76
7.1	Cumplimiento de los objetivos específicos y respuesta a las preguntas de investigación . . .	77
7.2	Contribuciones de la investigación	78
7.3	Líneas de trabajo futuro	78
	Referencias	80

1 Problema de Investigación

Chile es el mayor productor mundial de cobre, con más del 25 % de la producción global, y concentra las mayores reservas de litio del planeta (Comisión Chilena del Cobre, 2025). Esta posición estratégica exige un consumo intensivo de agua: el sector minero extrajo 18,8 m³/s en 2023, con una proyección de crecimiento hasta los 22,1 m³/s en 2034 (Comisión Chilena del Cobre, 2025). La zona centro del país (conformada en esta investigación por las regiones de Valparaíso (V), Metropolitana (RM) y del Libertador General Bernardo O'Higgins (VI), articuladas por las cuencas hidrológicas del Aconcagua, el Maipo y el Cachapoal) constituye el foco geográfico de esta investigación. Esta delimitación coincide con la macrozona centro reconocida por el INE y la SUBDERE, y concentra tres operaciones de gran minería del cobre de escala y perfil hídrico contrastantes: Codelco División Andina (Región de Valparaíso, cuenca del Aconcagua), Anglo American Sur (Los Bronces, Región Metropolitana, cuenca del Maipo) y Codelco División El Teniente (Región de O'Higgins, cuenca del Cachapoal), el yacimiento subterráneo de cobre más grande del mundo con más de 4.500 kilómetros de galerías (Comisión Chilena del Cobre, 2025). Allí coexisten además operaciones de mediana minería del cobre con dependencia crítica del recurso hídrico subterráneo: la gran minería, por la escala y continuidad de sus procesos, genera mayores volúmenes de extracción y una exposición regulatoria más elevada; la mediana minería, en cambio, acusa brechas tecnológicas más pronunciadas al carecer de sistemas de monitoreo automatizados (Genova Alonso et al., 2022). Ambas impactan directamente los acuíferos a través de procesos de deshidratación que reducen el nivel freático y pueden contaminar fuentes adyacentes; sin regulación efectiva, la competencia entre usuarios deriva en deterioro ambiental irreversible (Donoso et al., 2020; Sloan et al., 2023).

La regulación del recurso recae en la Dirección General de Aguas (DGA), cuyo marco legal se origina en el Código de Aguas de 1981 (Ministerio de Justicia, 1981), cuerpo normativo concebido para aguas superficiales que dejó vacíos significativos en la regulación subterránea (Donoso et al., 2020). La Ley N.º 21.064 de 2018 constituyó la primera actualización sustantiva: amplió el marco de fiscalización y dotó a la DGA de herramientas sancionatorias más precisas (Ministerio de Obras Públicas, 2018). Al amparo de esa ley, la DGA emitió la Resolución Exenta N.º 1.238 de 2019, que fijó las condiciones técnicas y plazos para instalar y mantener sistemas de monitoreo de extracciones efectivas (MEE) en obras de captación subterránea, clasificando a los titulares por volumen de extracción y estableciendo la obligación de transmitir continuamente al Sistema de Información Nacional de Aguas (SINA) los datos de caudal, volumen y nivel

freático (Dirección General de Aguas, 2019). El Decreto Supremo N.º 53 de 2020 extendió ese régimen a las extracciones superficiales (Ministerio de Obras Públicas, 2020). La Ley N.º 21.435 de 2022 representó el quiebre normativo más profundo en cuatro décadas: endureció las exigencias de monitoreo continuo, reforzó las obligaciones de transmisión al SINA e introdujo un régimen sancionatorio graduado en cinco grados según la gravedad de la infracción (Ministerio de Obras Públicas, 2022). Para efectos de exposición y de la modelación desarrollada en esta investigación, esos cinco grados se agrupan en tres tramos: infracciones *leves* (primer grado, 10–50 UTM) por incumplimientos de reporte o calibración; *graves* (segundo y tercer grado, 51–500 UTM) por falla en la instalación o mantención de sistemas de medición de caudal, nivel freático o volumen acumulado, o por retraso en la transmisión al SINA; y *muy graves* (cuarto y quinto grado, 501–2.000 UTM) por extracción no autorizada o sobre el volumen permitido (Ministerio de Obras Públicas, 2022). La estructura completa de los cinco grados se detalla en la Sección 3.3.2, y el criterio de agrupación se justifica en la Sección 4.3.3. En casos de reincidencia, la DGA puede ordenar la paralización de faenas o la caducidad del derecho de aprovechamiento (Ministerio de Obras Públicas, 2022). Lo crítico es que las obligaciones son mensuales y continuas: una empresa con un caudalímetro descalibrado puede acumular infracciones durante meses sin ser detectada, dado que la DGA fiscaliza cientos de puntos remotos con recursos limitados. Gray y Shimshack (2011) demuestran que la disuasión regulatoria solo opera cuando la autoridad tiene capacidad real de detectar y sancionar infracciones de forma oportuna. El riesgo económico regulatorio se mide como la probabilidad de incurrir en sanciones multiplicada por su costo esperado (multas, auditorías forzadas, honorarios legales y paralización de faenas), una combinación que puede comprometer la viabilidad de proyectos mineros, en particular en sus etapas tempranas (Oliveros-Sepúlveda et al., 2025).

La brecha central de esta investigación reside en la calidad de los datos que generan los sistemas de monitoreo. Los errores de medición en caudalímetros industriales oscilan entre el 5 % y el 15 %, atribuibles a deriva del sensor, acumulación de sedimentos o calibración deficiente (American Water Works Association, 2021); estos márgenes se amplifican en las condiciones climáticas extremas propias de las faenas mineras. Cuando los datos transmitidos al SINA contienen errores no cuantificados, la DGA pierde la capacidad de distinguir entre una infracción deliberada y un fallo técnico de medición (Wang et al., 2024). La brecha opera en tres dimensiones tecnológicas interdependientes: *hardware*: sensores de nivel freático (piezómetros electrónicos), medidores de caudal (electromagnéticos o ultrasónicos) y equipos de transmisión (LoRaWAN, redes móviles, satelital); *software*: plataformas SCADA, sistemas de gestión de datos en la nube y protocolos de reporte al SINA; y *analítica*: modelos de detección de anomalías, algoritmos de predicción de fallo de

sensor y marcos cuantitativos de riesgo regulatorio. Essamlali et al. (2024) y Sowndharya y Duraisamy (2024) demuestran que la integración de IoT con modelos de calidad de datos reduce los errores de medición y genera alertas automáticas ante desviaciones. Cohen-Manrique et al. (2025) verifican una tendencia creciente en el despliegue de IoT para monitoreo subterráneo en regiones áridas, aunque sin evidencia sistemática de su impacto sobre el riesgo regulatorio en el contexto normativo de la DGA, ni marcos teóricos que articulen las tres dimensiones tecnológicas con modelos cuantitativos de riesgo aplicables a la minería de la zona centro. Esa es precisamente la brecha que esta investigación busca abordar desde una perspectiva teórica, sentando las bases para una futura implementación práctica en el sector.

A partir de la problemática descrita, se plantean las siguientes preguntas de investigación:

1. ¿De qué manera las brechas de calidad de datos en las dimensiones de hardware, software y analítica de los sistemas de monitoreo hídrico subterráneo inciden en el riesgo regulatorio (medido por la frecuencia de infracciones y montos sancionatorios) y en el riesgo económico (medido por el impacto sobre el EBITDA) de la gran y mediana minería de la zona centro de Chile, bajo el actual marco normativo de la Dirección General de Aguas (DGA)?
2. ¿Qué modelo teórico de riesgo regulatorio permite cuantificar la exposición económica de las operaciones mineras de la zona centro ante sanciones por incumplimiento hídrico de la DGA, considerando la calidad de datos como variable central?
3. ¿En qué medida la integración de soluciones IoT en sus dimensiones de hardware, software y analítica podría reducir teóricamente las brechas de calidad de datos y el riesgo regulatorio en la gran y mediana minería de la zona centro de Chile?

2 Objetivos

2.1 Objetivo General

Desarrollar un framework de apoyo a la decisión de inversión en sistemas de monitoreo IoT para la gran y mediana minería de la zona centro de Chile, mediante la revisión documental del marco normativo de la DGA, la modelación paramétrica del riesgo regulatorio y económico, y el análisis costo-beneficio de arquitecturas tecnológicas alternativas, con el fin de orientar decisiones de inversión que minimicen la exposición económica ante sanciones hídricas.

2.2 Objetivos Específicos

1. Analizar el marco regulatorio hídrico vigente en Chile aplicable a la gran y mediana minería de la zona centro, identificando las obligaciones específicas de medición de caudal, nivel freático y volumen acumulado, los tipos de infracciones y las sanciones económicas asociadas a su incumplimiento, mediante revisión documental de la normativa DGA, con el fin de parametrizar las variables regulatorias que servirán de entrada al modelo de riesgo económico del framework.
2. Analizar las dimensiones de calidad de datos en sistemas de monitoreo hídrico industrial para la gran y mediana minería de la zona centro, evaluando las brechas de hardware, software y analítica, con el fin de construir una taxonomía de fallas técnicas con su probabilidad de ocurrencia estimada a partir de evidencia bibliográfica, que sirva de base para la cuantificación del riesgo regulatorio en el framework de decisión.
3. Construir un modelo de riesgo regulatorio y económico que cuantifique la exposición financiera de operaciones mineras tipo de gran y mediana minería de la zona centro, integrando las probabilidades de falla técnica identificadas en OE2 y los parámetros normativos de OE1, mediante el desarrollo de escenarios paramétricos con indicadores de frecuencia esperada de infracciones, monto de multas acumuladas e impacto sobre el EBITDA operacional, para dimensionar cuantitativamente la relación entre calidad de datos y riesgo regulatorio.
4. Evaluar económicamente la efectividad de arquitecturas IoT en sus dimensiones de hardware, software y analítica para la reducción de brechas de calidad de datos en el monitoreo hídrico subterráneo de la gran y mediana minería de la zona centro, mediante un análisis costo-beneficio que compare el costo de implementación de cada configuración tecnológica contra la reducción del riesgo regulatorio esperado cuantificada en OE3, con el propósito de identificar las configuraciones con mayor rentabilidad en la mitigación del riesgo ante la DGA.

3 Marco Teórico

El presente marco teórico estructura la literatura en seis ámbitos que articulan el problema de investigación y sustentan el framework de decisión propuesto. Los subtemas que se desarrollan son los siguientes:

1. Escenario mundial: la minería del cobre y la presión sobre el agua subterránea.
2. Escenario chileno: consumo hídrico minero y situación de los acuíferos en la zona centro de Chile.
3. Regulación hídrica aplicable a la minería en Chile: evolución normativa, régimen sancionatorio y capacidad fiscalizadora de la DGA.
4. Factores de decisión: calidad de datos, fallas técnicas y capacidad fiscalizadora.
5. Incentivos económicos y regulatorios para la inversión en monitoreo.
6. El rol de Chile en la regulación hídrica latinoamericana y en la adopción de IoT en minería.

La secuencia avanza de lo general a lo particular: se caracteriza primero el escenario mundial de la minería del cobre y su relación con el agua subterránea; se describe luego la situación chilena en términos de consumo hídrico y estado de los acuíferos de la zona centro; se desarrolla el marco regulatorio de la DGA como eje normativo central; se analizan los factores técnicos que determinan el riesgo regulatorio; se identifican los incentivos económicos y normativos que justifican la inversión en monitoreo; y, finalmente, se sitúa a Chile en el contexto latinoamericano de regulación hídrica y adopción de IoT en minería.

3.1 Escenario mundial: la minería del cobre y la presión sobre el agua subterránea

El cobre es el metal de base más relevante para la transición energética global. La electrificación del transporte, el despliegue de energías renovables y la expansión de infraestructura digital han impulsado una demanda sostenida que la Agencia Internacional de Energía proyecta que casi se duplicará hacia 2040, con una brecha significativa de oferta ya visible en 2035 donde la producción minera anunciada cubriría solo el 70% de los requerimientos bajo el escenario de compromisos climáticos globales (International Energy Agency, 2024). Esta presión sobre la oferta tiene consecuencias directas sobre la gestión de recursos naturales en los países productores, dado que la extracción de cobre es intensiva tanto en energía como en agua.

A escala global, la industria minera consume cerca del 20% de las extracciones industriales de agua dulce, ubicándose solo por detrás del sector agrícola (United Nations, 2024). En el caso específico del

cobre, el agua interviene en cada etapa del proceso productivo: perforación, flotación de minerales sulfurados, lixiviación de óxidos y supresión de polvo en caminos y tronaduras. La participación del agua subterránea en el abastecimiento minero es creciente, pues muchas operaciones se emplazan en zonas áridas o semiáridas donde las fuentes superficiales son escasas o se encuentran sobreotorgadas (Sloan et al., 2023).

La presión sobre los acuíferos se ha intensificado en las últimas décadas. Gleeson et al. (2020) revisaron el estado de los sistemas de agua subterránea a escala global en el Antropoceno y concluyeron que su sobreexplotación constituye uno de los desafíos de sostenibilidad más críticos del siglo XXI, documentando que las tasas de extracción superan sistemáticamente las de recarga natural en los principales acuíferos del mundo, con descensos sostenidos del nivel freático en regiones áridas donde se concentra la minería de metales base. El agotamiento progresivo genera efectos en cadena: eleva los costos de bombeo, incrementa el riesgo de subsidencia, reduce la disponibilidad para otros usuarios y, en entornos regulatorios más estrictos, aumenta la probabilidad de infracciones por extracción sobre el volumen autorizado (Oliveros-Sepúlveda et al., 2025). La gestión sostenible del agua subterránea en minería ha dejado de ser una externalidad ambiental para convertirse en un factor de riesgo estratégico con incidencia directa sobre la continuidad operacional y la valoración financiera de los proyectos (Oliveros-Sepúlveda et al., 2025).

Esta realidad global adquiere una dimensión singular en Chile, donde la condición de primer productor mundial de cobre se combina con un marco regulatorio hídrico en proceso de endurecimiento acelerado. La sección siguiente analiza precisamente esa dimensión nacional, caracterizando el consumo hídrico del sector minero y el estado de los acuíferos en la zona centro del país.

3.2 Escenario chileno: consumo hídrico minero y situación de los acuíferos en la zona centro de Chile

Comisión Chilena del Cobre (2025) reportan que Chile produce más del 25 % del cobre mundial y concentra las mayores reservas de litio del planeta. La extracción de agua en minería alcanzó los 18,8 m³/s en 2023, con una proyección de crecimiento hasta los 22,1 m³/s en 2034, impulsada principalmente por el cambio hacia el procesamiento de minerales sulfurados mediante flotación, proceso más intensivo en uso de agua (Comisión Chilena del Cobre, 2025). La participación del agua de mar en el abastecimiento minero ha crecido aceleradamente: representaba el 36 % en 2023 y se proyecta que alcanzará el 66 % en 2034, evidenciando la creciente sustitución de fuentes continentales por agua desalinizada ante la escasez hídrica estructural del norte de Chile (Comisión Chilena del Cobre, 2025).

La zona centro de Chile (definida en esta investigación como las regiones de Valparaíso (V), Metropolitana (RM) y del Libertador General Bernardo O'Higgins (VI), articuladas por las cuencas del Aconcagua, el Maipo y el Cachapoal) concentra tres operaciones emblemáticas de gran minería del cobre que constituyen los casos ancla de esta investigación. La Figura 1 ilustra la distribución geográfica de estas tres operaciones en relación con las cuencas hidrográficas que articulan la zona centro.

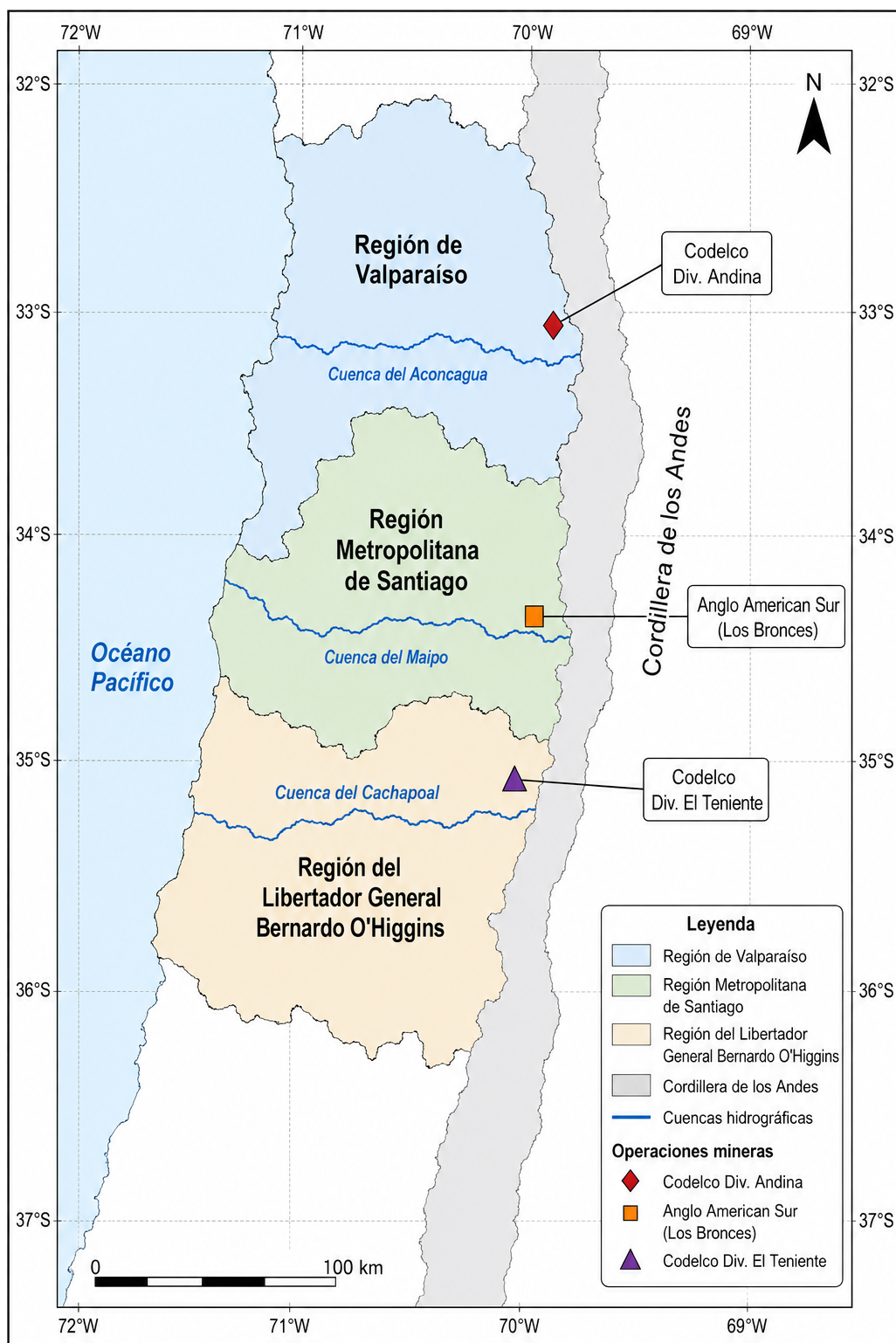


Figura 1. Macrozona centro: cuencas hidrográficas y operaciones de gran minería bajo fiscalización de la DGA. Los trazados de cuencas corresponden a los límites hidrológicos referenciales de las cuencas del Aconcagua, el Maipo y el Cachapoal.

Nota. Elaboración propia basada en límites administrativos del Instituto Geográfico Militar y datos hidrológicos de la Dirección General de Aguas.

Codelco División Andina opera en la cuenca alta del Aconcagua en la Región de Valparaíso, donde sus derechos de aprovechamiento subterráneo están bajo monitoreo continuo de la DGA. Anglo American Sur (Los Bronces) opera en la cuenca del Maipo, también en la Región Metropolitana, y fue objeto del caso sancionatorio que se describe más adelante. Codelco División El Teniente, ubicado en la Región de O'Higgins en la cuenca del Cachapoal a 50 kilómetros de Rancagua, es el yacimiento subterráneo de cobre más grande del mundo y reutiliza aproximadamente el 70 % del agua en sus procesos, complementando su abastecimiento mediante captación subterránea (Comisión Chilena del Cobre, 2025). Junto a estas operaciones coexiste mediana minería del cobre con brechas tecnológicas más pronunciadas por carecer de sistemas de monitoreo automatizados (Genova Alonso et al., 2022). Todas estas operaciones impactan los acuíferos de la zona a través de procesos de deshidratación que reducen el nivel freático y pueden contaminar fuentes adyacentes; sin regulación efectiva, la competencia entre usuarios deriva en deterioro ambiental irreversible (Donoso et al., 2020; Sloan et al., 2023).

Los acuíferos de las cuencas del Aconcagua, el Maipo y el Cachapoal (sistema hídrico que articula las regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins conformando el corazón minero de la zona centro) abastecen tanto a las operaciones de cobre como a más de ocho millones de habitantes. La evidencia empírica sobre su estado de deterioro es contundente. Alvarez-Garreton et al. (2023) documentaron que el nivel freático del acuífero del Aconcagua ha descendido hasta seis metros por década en los sectores de mayor extracción, que el sistema del Maipo registra 89 pozos con descenso sostenido del nivel freático entre 1960 y 2020 con proyecciones de agotamiento en horizontes de mediano plazo, y que el Cachapoal es el único de los tres sistemas con estrés hídrico moderado, atribuible a su menor dependencia relativa de aguas subterráneas. Esta degradación tiene una causa dual: el aumento sostenido del consumo (los usos consuntivos se han duplicado en las últimas seis décadas en la zona central) y una reducción de la disponibilidad hídrica superficial vinculada a la megasequía, cuyo origen combina variabilidad climática natural con una señal de cambio climático de largo plazo (Alvarez-Garreton et al., 2023). Las proyecciones climáticas del Atlas de Riesgo Climático de Chile indican que la zona cordillerana y precordillerana de la zona centro es la que presenta mayor amenaza por sequía en escenarios futuros, con condiciones más secas que las actuales en la mayoría de los escenarios analizados (Ministerio del Medio Ambiente de Chile, 2020).

Esta trayectoria climática tiene una consecuencia regulatoria directa que es central para esta investigación: a medida que los acuíferos se alejan de su equilibrio natural y las tasas de extracción se aproximan o superan la recarga, el margen de tolerancia entre el volumen extraído y el volumen autorizado se estrecha

estructuralmente. En ese contexto, un error de medición que en condiciones de abundancia hídrica podría ser regulatoriamente irrelevante (por situarse dentro del margen de tolerancia del instrumento) puede cruzar el umbral de infracción cuando el sistema opera al límite de su recarga. Dicho de otro modo, el cambio climático no solo presiona la disponibilidad hídrica: eleva de manera estructural y creciente la probabilidad de que fallas técnicas de monitoreo sean interpretadas como infracciones por la DGA, incluso en ausencia de extracción deliberada por sobre lo autorizado (Donoso et al., 2020; Wang et al., 2024). Esta cadena causal (sequía estructural, sobreexplotación de acuíferos, reducción del margen regulatorio, mayor sensibilidad al error de medición) es el argumento que vincula la dimensión ambiental del problema con su dimensión técnica y regulatoria, y constituye una extensión natural del framework de decisión que esta investigación no aborda: incorporar la variabilidad climática como parámetro de escenario explícito del modelo de riesgo, en lugar de mantenerla, como se hace aquí, como contexto no parametrizado (Sección 7.3).

En conjunto, la evidencia sobre el estado de deterioro de los acuíferos de la zona centro y la creciente presión extractiva confirma que el contexto hídrico no es estático: es un escenario dinámico en el que los márgenes regulatorios se estrechan y la calidad del monitoreo adquiere una relevancia creciente. Comprender el marco normativo que regula esa presión es, por tanto, el paso siguiente indispensable.

Comprender el alcance y la estructura del régimen sancionatorio es, por tanto, el paso previo indispensable para cuantificar el riesgo económico que enfrenta la industria minera de la zona centro. La sección siguiente desarrolla ese marco regulatorio desde sus orígenes en el Código de Aguas de 1981 hasta las reformas más recientes de 2022 y 2025.

3.3 Regulación hídrica aplicable a la minería en Chile

Chile posee uno de los marcos de derechos de agua más singulares del mundo. El Código de Aguas de 1981 (Ministerio de Justicia, 1981) instauró un sistema de mercado de derechos de aprovechamiento, desvinculando la titularidad del agua de la propiedad del suelo y habilitando su transacción en mercados privados (Donoso et al., 2020). Concebido para aguas superficiales, ese diseño dejó vacíos normativos de consideración en la gestión subterránea, cuya dinámica (recarga lenta, interconexión con acuíferos profundos y difícil cuantificación in situ) difiere sustancialmente de la de los cauces superficiales (Genova Alonso et al., 2022). La Figura 2 resume la evolución del marco regulatorio hídrico aplicable al monitoreo subterráneo en minería.

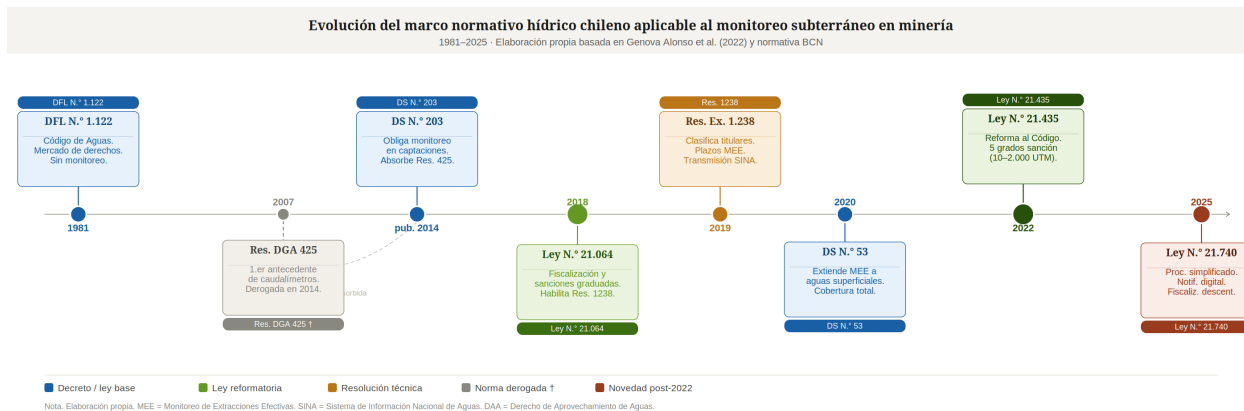


Figura 2. Evolución del marco normativo hídrico chileno aplicable al monitoreo subterráneo en minería, 1981–2025. Los nodos de mayor tamaño representan instrumentos de mayor jerarquía o impacto normativo. MEE = Monitoreo de Extracciones Efectivas. SINA = Sistema de Información Nacional de Aguas.

Nota. Elaboración propia basada en Genova Alonso et al. (2022) y normativa de la Biblioteca del Congreso Nacional de Chile.

3.3.1 Evolución del marco normativo: de 1981 a 2022. La trayectoria regulatoria puede leerse como una sucesión de capas normativas que fueron incorporando obligaciones técnicas a los titulares de derechos de aprovechamiento. El Código de Aguas de 1981 (Ministerio de Justicia, 1981) estableció el derecho de aprovechamiento como bien transable, pero no contempló obligaciones de monitoreo. La Resolución DGA N.º 425 de 2007 constituyó el primer antecedente técnico en materia de caudalímetros para medición subterránea; sin embargo, fue derogada y sus disposiciones fueron absorbidas y superadas por el Decreto Supremo N.º 203 de 2013 (Ministerio de Obras Públicas, 2013), que aprobó el Reglamento de Exploración y Explotación de Aguas Subterráneas e incorporó como condición de ejercicio de los derechos la obligación de instalar sistemas de control y monitoreo en las captaciones y de remitir esa información a la DGA. Esta sucesión normativa refleja la pauta identificada por Genova Alonso et al. (2022): cada actualización regulatoria no reemplazó vacíos de forma anticipatoria, sino que respondió a la insuficiencia demostrada del instrumento anterior.

Un salto cualitativo se produjo con la Ley N.º 21.064 de 2018 (Ministerio de Obras Públicas, 2018), que reformó el marco de fiscalización y otorgó a la DGA facultades explícitas para exigir monitoreo continuo y aplicar sanciones graduadas. Al amparo de esas facultades, la DGA emitió la Resolución Exenta N.º 1.238 de 2019 (Dirección General de Aguas, 2019), instrumento técnico central para esta investigación: clasificó a los titulares en cuatro categorías de exigencia según el volumen de extracción autorizado, determinó los plazos de instalación del sistema de monitoreo de extracciones efectivas (MEE) y fijó la obligación de transmitir

continuamente al SINA los datos de caudal, volumen extraído y nivel freático. El Decreto Supremo N.º 53 de 2020 (Ministerio de Obras Públicas, 2020) extendió el régimen a las extracciones superficiales, completando así la cobertura del sistema de vigilancia hídrica.

La sucesión normativa descrita sentó las bases institucionales sobre las que la Ley N.º 21.435 de 2022 construyó el régimen sancionatorio más exigente de la historia hídrica chilena, cuyo alcance y estructura se analizan en la subsección siguiente.

3.3.2 La Ley N.º 21.435 de 2022 y el régimen sancionatorio. La Ley N.º 21.435 representó la reforma más profunda al Código de Aguas en cuatro décadas (Ministerio de Obras Públicas, 2022). La Figura 3 sintetiza la estructura del régimen sancionatorio que esta ley establece. Endureció las exigencias de medición continua de caudal, nivel freático y volumen acumulado, y estableció la transmisión periódica de datos al SINA. Las obligaciones son mensuales y permanentes: una empresa con un caudalímetro descalibrado puede acumular infracciones durante meses antes de ser detectada. El régimen sancionatorio, graduado en cinco grados según el artículo 173 ter del Código de Aguas, distingue infracciones de primer grado (10–50 UTM) por incumplimientos de reporte o calibración; de segundo grado (51–100 UTM) por falla en la mantención del sistema de medición o transmisión incompleta al SINA; de tercer grado (101–500 UTM) por falla en la instalación del sistema MEE o retraso sistemático en la transmisión; de cuarto grado (501–1.000 UTM) por extracción no autorizada, extracción sobre el volumen concedido o manipulación del sistema de medición; y de quinto grado (1.001–2.000 UTM) por las mismas conductas graves del cuarto grado cuando concurren circunstancias agravantes (Ministerio de Obras Públicas, 2022). En caso de reincidencia, la DGA puede ordenar la paralización de faenas o la caducidad del derecho de aprovechamiento, lo que equivale a la pérdida del activo hídrico de la empresa.

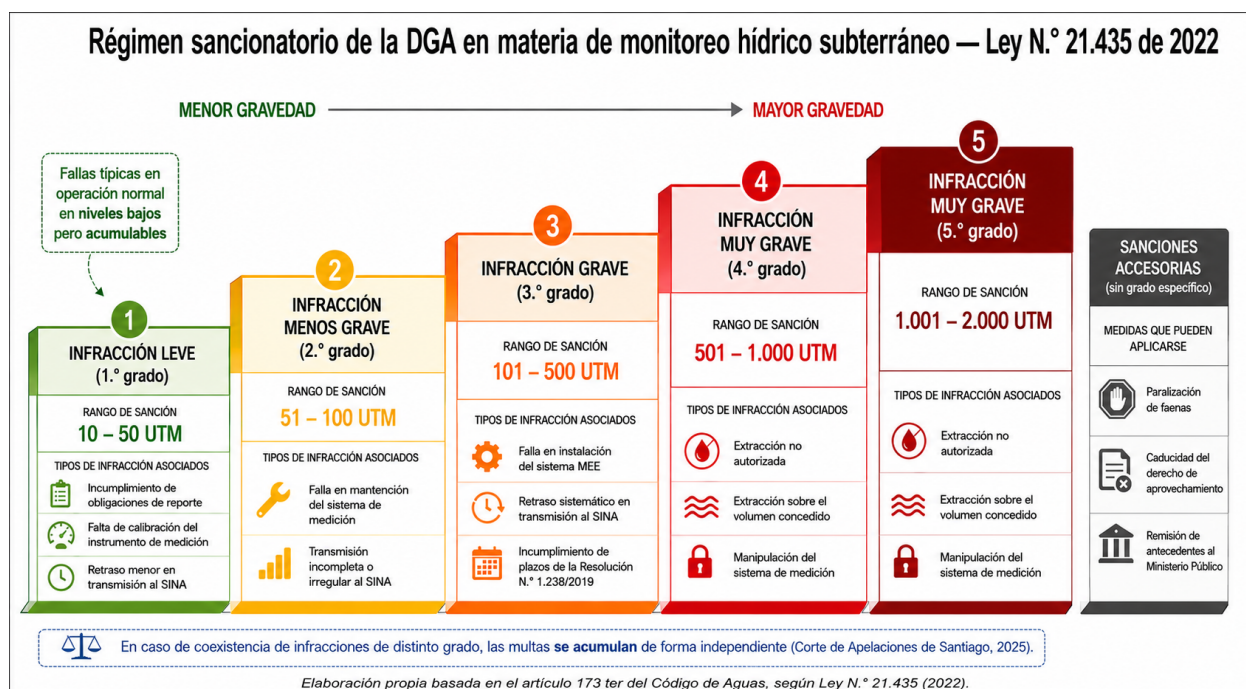


Figura 3. Régimen sancionatorio de la DGA en materia de monitoreo hídrico subterráneo: cinco grados de infracción y sanciones accesorias por reincidencia, conforme al artículo 173 ter del Código de Aguas (Ley N.º 21.435 de 2022). MEE = Monitoreo de Extracciones Efectivas. SINA = Sistema de Información Nacional de Aguas. UTM = Unidad Tributaria Mensual (1 UTM = \$71.506 CLP, valores 2025). En caso de coexistencia de infracciones de distinto grado, las multas se acumulan de forma independiente.

Nota. Elaboración propia basada en el artículo 173 ter del Código de Aguas, según Ministerio de Obras Públicas (2022), y en jurisprudencia comparada aplicable por analogía (Corte de Apelaciones de Santiago, Novena Sala, 2025).

La aplicación de este régimen deja evidencia empírica cuantificable. Durante 2024 la Dirección General de Aguas resolvió 2.256 fiscalizaciones por infracciones al Código de Aguas y cursó 928 multas (Dirección General de Aguas, 2025), por un monto total de \$9.624 millones de pesos (Ministerio de Obras Públicas, 2025a). El desglose por tipo de contravención no aparece en los instrumentos formales de rendición de cuentas; la única fuente que lo identifica es una columna del propio Director General de Aguas, según la cual el incumplimiento del sistema de monitoreo de extracciones efectivas, las obras no autorizadas en cauces y la extracción de aguas no autorizadas fueron las contravenciones más multadas del período (Sanhueza Bravo, 2025). Conviene precisar el alcance de ese dato: la fuente no jerarquiza esas tres categorías entre sí ni informa su frecuencia relativa, de modo que sostiene que el incumplimiento del monitoreo está entre las contravenciones más sancionadas, pero no que desplace a la extracción no autorizada como fuente principal de infracciones. Lo que sí queda establecido, y basta para el argumento de esta investigación, es que la falla del sistema de medición constituye por sí sola una causa sancionatoria de primer orden, con

independencia de que la extracción subyacente haya excedido o no el volumen autorizado.

Tres casos ocurridos en las cuencas de la zona centro ilustran la aplicación del régimen a la gran minería. En el primero, Codelco División Andina fue sancionada por la DGA con una multa de \$327 millones por extracción no autorizada en el río Blanco, y la denuncia fue presentada por la Junta de Vigilancia del río Aconcagua, evidencia directa de que el incumplimiento hídrico minero genera conflictos con otros usuarios de la cuenca (Fundación Terram, 2023). En el segundo, Anglo American Sur fue sancionada en 2025 por la DGA de la Región de Valparaíso por extracciones no autorizadas desde el estero Riecillos, como se describe en el apartado siguiente. El tercer caso corresponde a Codelco División El Teniente, que opera en la cuenca del Cachapoal bajo un esquema de monitoreo continuo de sus derechos de aprovechamiento subterráneo; en períodos de sequía extrema, la división ha debido implementar racionamiento hídrico y complementar su abastecimiento con captación de agua subterránea, lo que eleva su exposición al régimen de fiscalización de la DGA en la Región de O'Higgins (Comisión Chilena del Cobre, 2025). Los tres casos en conjunto evidencian que el riesgo regulatorio hídrico es transversal a las cuencas del Aconcagua, el Maipo y el Cachapoal, y no se circunscribe a una sola operación o cuenca de la zona centro.

En el segundo caso, Anglo American Sur S.A. fue sancionada en 2025 por la DGA de la Región de Valparaíso con 2.452,10 UTM (\$168.329.309) por extracciones no autorizadas desde el estero Riecillos durante fines de semana entre enero y abril de 2023, en plena vigencia de un decreto de escasez hídrica (Dirección General de Aguas, Región de Valparaíso, 2025). La multa base de 700,6 UTM por bocatoma fue incrementada en un 75 % por haberse ejecutado en una fuente declarada agotada y en zona de escasez (Dirección General de Aguas, Región de Valparaíso, 2025). La DGA determinó que los propios registros de captación de la empresa confirmaban las extracciones irregulares, descartando los argumentos de errores de medición que Anglo American alegó, lo que pone de manifiesto el peso probatorio que la autoridad asigna a los datos autorreportados. Además, la DGA remitió los antecedentes al Ministerio Público para investigar un eventual delito de extracción ilegal, mostrando que las consecuencias del incumplimiento hídrico en minería trascienden el ámbito administrativo (Dirección General de Aguas, Región de Valparaíso, 2025).

Aunque no se trata de un caso del sector minero, la jurisprudencia reciente en materia de incumplimiento hídrico refuerza la solidez del régimen sancionatorio descrito. En 2025, la Novena Sala de la Corte de Apelaciones de Santiago, en un recurso de reclamación de un titular de derechos de agua del sector agrícola, confirmó tres multas simultáneas que sumaron 618,2 UTM en un caso de incumplimiento hídrico, rechazando el argumento de que circunstancias externas justificaban la omisión en la instalación de caudalímetros y

sistemas de transmisión al SINA (Corte de Apelaciones de Santiago, Novena Sala, 2025). El fallo consagra que el incumplimiento técnico no exime de responsabilidad regulatoria y que las multas pueden acumularse en tres grados simultáneos cuando coexisten fallas de extracción, medición y transmisión; este criterio, aunque emitido en un contexto agrícola, es directamente aplicable por analogía a la industria minera, dado que ambas actividades están sujetas al mismo artículo 173 ter del Código de Aguas.

El ciclo normativo más reciente es la Ley N.º 21.740, publicada el 23 de abril de 2025, que modifica el Código de Aguas en materia de procedimiento de fiscalización y vigilancia de la DGA (Ministerio de Obras Públicas, 2025b). Sus tres innovaciones operacionales son directamente relevantes para el riesgo regulatorio de las empresas mineras. Primero, instituye un procedimiento sancionatorio simplificado para infracciones de primer a tercer grado (10–500 UTM), que reduce los plazos de tramitación a un máximo de 60 días hábiles desde la formulación de cargos, aumentando así la velocidad efectiva de sanción y, por consiguiente, la probabilidad percibida de consecuencias. Segundo, permite que municipalidades y otros órganos del Estado ejecuten medidas ordenadas por la DGA (incluyendo paralización de obras y cegamiento de pozos) descentralizando la capacidad operativa de fiscalización más allá del personal propio de la institución. Tercero, habilita la notificación por medios electrónicos conforme a la Ley N.º 19.880, eliminando una barrera procedimental que dilataba los expedientes sancionatorios. En conjunto, estas reformas elevan la probabilidad de detección oportuna a que se refiere Gray y Shimshack (2011) como condición necesaria para la disuasión regulatoria efectiva, lo que refuerza el argumento central de esta investigación: la calidad de los datos de monitoreo no es solo un problema técnico, sino un factor determinante del riesgo económico regulatorio en un entorno donde la capacidad de fiscalización de la DGA se incrementa sostenidamente.

La severidad de este régimen sancionatorio solo se traduce en disuasión efectiva si la autoridad tiene capacidad real de detectar infracciones de manera oportuna. La subsección siguiente examina precisamente esa dimensión institucional: la brecha entre las obligaciones impuestas y la capacidad fiscalizadora de la DGA.

3.3.3 Capacidad fiscalizadora de la DGA y asimetría de información. Un elemento estructural del problema es la asimetría entre las obligaciones de monitoreo impuestas a las empresas y la capacidad institucional de la DGA para verificarlas. La DGA fiscaliza miles de puntos de extracción con recursos limitados, dependiendo en gran medida de la información autorreportada (Gómez González y Rivera Bravo, 2022). Gray y Shimshack (2011) demostraron que la disuasión regulatoria solo opera cuando la autoridad

tiene capacidad efectiva de detectar y sancionar infracciones de manera oportuna; en su ausencia, el efecto normativo se diluye. Este hallazgo ha sido confirmado en contextos latinoamericanos de capacidad regulatoria limitada: Chakraborti y Shimshack (2022) demostraron que la fiscalización ambiental de contaminación hídrica en México urbano genera efectos disuasorios significativos solo cuando los mecanismos de detección son robustos, evidencia directamente comparable al desafío que enfrenta la DGA chilena. Frente a esta brecha, la DGA y la Superintendencia de Medio Ambiente (SMA) suscribieron en 2025 un convenio para incorporar teledetección y sensores remotos en los procesos de fiscalización, reconociendo formalmente la insuficiencia del modelo basado en reportes manuales (Superintendencia del Medio Ambiente, 2025).

Esta asimetría es el nodo que vincula la calidad técnica de los datos de monitoreo con el riesgo regulatorio efectivo de las empresas: mientras mayor sea la brecha entre lo que la DGA puede verificar y lo que la empresa reporta, mayor es la probabilidad de que errores técnicos de medición sean interpretados como infracciones deliberadas. En consecuencia, el análisis del riesgo no puede limitarse al texto normativo, sino que requiere identificar con precisión qué factores técnicos degradan la calidad de los datos y de qué manera esa degradación se traduce en exposición regulatoria, lo que constituye el objeto de la sección siguiente.

3.4 Factores de decisión: calidad de datos, fallas técnicas y capacidad fiscalizadora

El riesgo regulatorio de una operación minera no depende únicamente del texto normativo, sino de la interacción entre tres factores determinantes: la calidad de los datos que genera el sistema de monitoreo, la naturaleza y frecuencia de las fallas técnicas que la degradan, y la capacidad de la DGA para detectar y sancionar las desviaciones. La comprensión de estos tres factores es el fundamento sobre el que se construye el modelo de riesgo del framework de decisión.

3.4.1 Calidad de datos: dimensiones y atributos críticos. Wang et al. (2024) definen la calidad de datos como el grado en que las características inherentes de un conjunto de información satisfacen los requisitos de sus usuarios, e identifican cinco dimensiones críticas: precisión, completitud, consistencia, actualidad y trazabilidad. En el contexto del monitoreo hídrico subterráneo, la precisión determina si el caudal o el nivel freático reportado corresponde al valor real; la completitud indica si las series de tiempo presentan vacíos que impiden verificar el cumplimiento en períodos específicos; la consistencia evalúa la coherencia entre lecturas de distintos sensores en un mismo punto; la actualidad refleja si la transmisión al SINA ocurre dentro de los plazos reglamentarios; y la trazabilidad garantiza la existencia de un registro auditable de cada medición. Una deficiencia en cualquiera de estas dimensiones puede activar el régimen sancionatorio de la

DGA, con independencia de si la extracción real superó o no el volumen autorizado (Ministerio de Obras Públicas, 2022).

Las cinco dimensiones de calidad de datos descritas constituyen el marco conceptual que permite clasificar y jerarquizar las fallas técnicas concretas que las degradan. La subsección siguiente desarrolla esa taxonomía en sus tres capas tecnológicas interdependientes.

3.4.2 Fallas técnicas: hardware, software y analítica. La literatura especializada permite construir una taxonomía sistemática de las fallas que degradan la calidad de datos en sistemas de monitoreo IoT.

Teh et al. (2020) realizaron una revisión sistemática de 57 publicaciones sobre calidad de datos en sensores IoT e identificaron ocho tipos de error ordenados por frecuencia de aparición en la literatura: *outliers* (32 publicaciones), *datos faltantes* (16), *sesgo* o *bias* (12), *deriva* o *drift* (12), *ruido* (8), *valor constante* (7), *incertidumbre* (6) y *stuck-at-zero* (6). Esta jerarquía es relevante para el contexto de monitoreo hídrico minero: los outliers, valores que exceden los umbrales normales o se desvían significativamente del comportamiento esperado, son el tipo de error más frecuente y, en el contexto del SINA, corresponden directamente a lecturas que la DGA puede interpretar como extracciones irregulares. Los datos faltantes, segundo tipo más frecuente, son atribuibles a factores como conexión inalámbrica inestable por congestión de red, fallas de energía en dispositivos con batería limitada, e interferencias ambientales; en el marco normativo de la Resolución Exenta N.º 1.238, cada período sin transmisión constituye un potencial incumplimiento de la obligación de reporte continuo.

Las fallas se distribuyen en tres capas tecnológicas interdependientes, tal como se ilustra en la Figura 4.

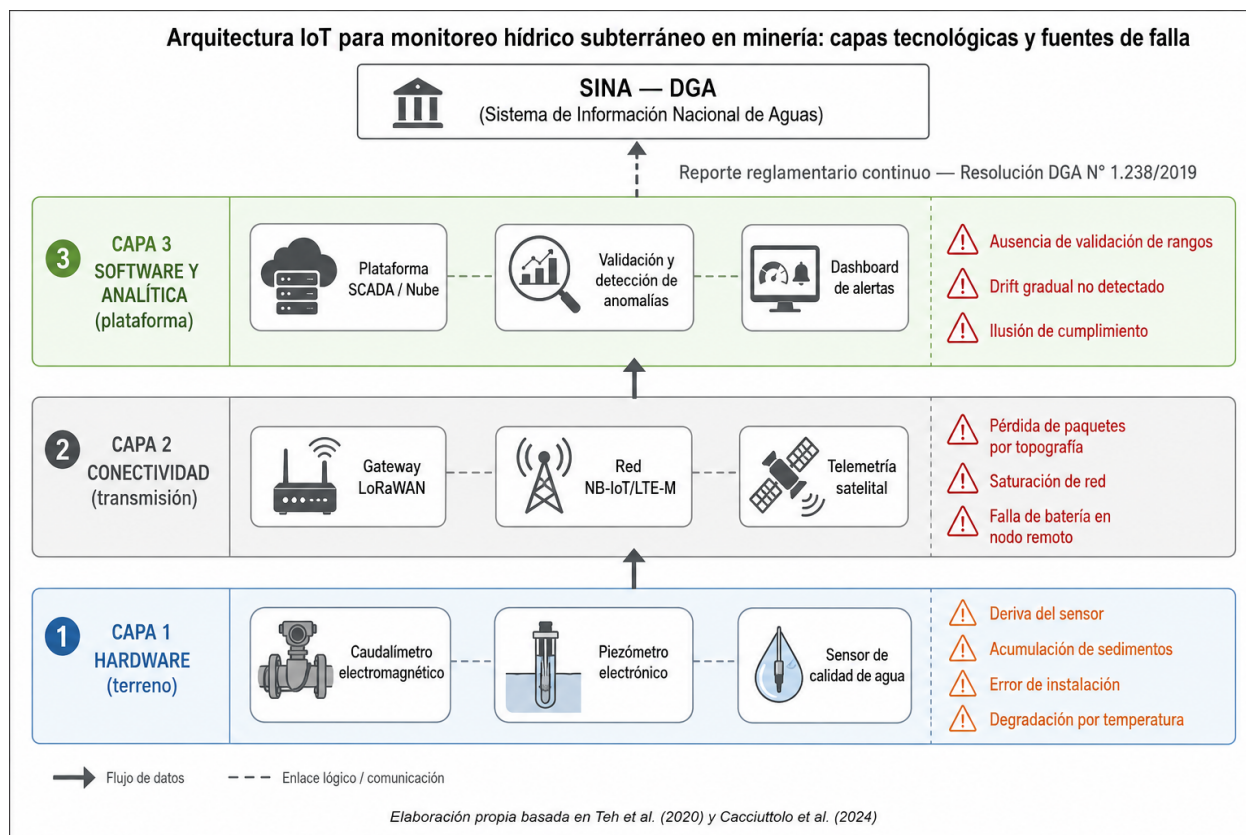


Figura 4. *Arquitectura IoT para monitoreo hídrico subterráneo en minería: capas tecnológicas y taxonomía de fallas.* Las fallas indicadas en cada capa corresponden a los tipos de error identificados en la literatura especializada. SINA = Sistema de Información Nacional de Aguas. LoRaWAN = Long Range Wide Area Network.

Nota. Elaboración propia basada en Teh et al. (2020) y Cacciuttolo et al. (2024).

En la capa de *hardware*, American Water Works Association (2021) documentaron que los errores de medición en caudalímetros industriales oscilan entre el 5 % y el 15 % por deriva del sensor, acumulación de sedimentos y calibración deficiente. Barrientos et al. (2023) confirmaron empíricamente la magnitud de este problema en el contexto minero chileno: en validaciones en terreno mediante el método de radiotrazadores en una planta minera real, solo el 34 % de los caudalímetros instalados registró un error por debajo del 5 %, lo que implica que el 66 % opera con errores superiores, a menudo sin que los operadores lo detecten. Este resultado contrasta con los rangos teóricos admitidos por los estándares AWWA y revela que las condiciones de operación en ambientes mineros (presencia de ácidos, sales, sólidos en suspensión y variabilidad térmica) amplifican sistemáticamente los errores de medición respecto a los valores de laboratorio. Los piezómetros electrónicos para nivel freático presentan derivas análogas en entornos de alta variabilidad térmica, mientras que los sensores de bajo costo (predominantes en la mediana minería por razones presupuestarias) exhiben

mayor susceptibilidad al bias de instalación cuando no se respetan los tramos rectos mínimos exigidos por los protocolos de calibración (American Water Works Association, 2021).

En la capa de *conectividad*, las fallas no dependen de la calidad del dispositivo sino de las condiciones del entorno de transmisión. Musonda et al. (2024) identificaron que la topografía montañosa (característica de las faenas mineras cordilleranas de la zona centro) degrada significativamente la intensidad de señal y la calidad de la transmisión en redes LoRaWAN, que la saturación de red genera colisiones de paquetes cuando múltiples nodos intentan transmitir simultáneamente a través de un mismo gateway, y que la dependencia de batería en nodos remotos sin alimentación eléctrica continua introduce apagados progresivos que generan períodos de datos faltantes. Estos autores señalan que no existe hasta la fecha un estudio sistemático que evalúe la confiabilidad de LoRaWAN considerando las características de tráfico propias del ambiente minero, lo que constituye en sí mismo una brecha de conocimiento que refuerza la pertinencia de este marco de investigación. Las pérdidas de paquetes en entornos con condiciones desfavorables de topografía pueden alcanzar un 11 % incluso bajo condiciones operacionales estándar, lo que en el contexto del SINA equivale a períodos regulares sin transmisión de datos que pueden activar infracciones por incumplimiento de reporte (Musonda et al., 2024).

En la capa de *software y analítica*, Wang et al. (2024) identificaron que la ausencia de protocolos robustos de validación (detección de lecturas fuera de rango, identificación de huecos en series de tiempo, verificación de consistencia entre sensores redundantes) permite que errores de hardware pasen inadvertidos hasta que la DGA los descubre en una fiscalización. Miasayedava et al. (2020) señalaron específicamente el riesgo de lo que denominan una *ilusión de cumplimiento*: sistemas IoT que generan grandes volúmenes de datos pero sin capacidad analítica para detectar drift gradual, crean la percepción de que el monitoreo es correcto cuando en realidad los valores transmitidos se han desviado progresivamente de la realidad física. Esta condición es especialmente peligrosa en el contexto regulatorio de la DGA, pues implica que la empresa reporta datos con confianza, y el regulador los recibe sin señales de alerta, cuando el sistema de medición ya ha cruzado los umbrales de error que invalidarían la transmisión.

La comprensión de esta taxonomía en sus tres capas (hardware, conectividad y software) es el fundamento empírico que sustenta OE2, cuyo propósito es construir una taxonomía de fallas con probabilidades de ocurrencia estimadas a partir de evidencia bibliográfica. La cuantificación de esas probabilidades requiere, a su vez, incorporar una dimensión adicional: el efecto de la incertidumbre de medición sobre la evaluación de cumplimiento regulatorio, que la subsubsección siguiente desarrolla como una fuente de riesgo

conceptualmente distinta pero operativamente vinculada.

Las fallas descritas en hardware, conectividad y software son en principio detectables y mitigables mediante mantenimiento y mejora tecnológica. Existe, sin embargo, una fuente de riesgo conceptualmente distinta que persiste incluso en sistemas correctamente mantenidos: la incertidumbre de medición inherente a todo instrumento físico, que la subsección siguiente desarrolla como factor autónomo de riesgo regulatorio.

3.4.3 La incertidumbre de medición como fuente de riesgo regulatorio. Más allá de la tipología de fallas descrita, existe una dimensión conceptualmente distinta que la literatura reciente ha comenzado a articular con el cumplimiento normativo: la incertidumbre de medición como factor de riesgo intrínseco, independiente de la existencia de fallas detectables. La incertidumbre no es una falla sino una propiedad inherente a toda medición física; según la definición del ISO, es el parámetro que caracteriza la dispersión de los valores que podrían razonablemente atribuirse al mensurando. En el contexto del monitoreo hídrico, esto implica que incluso un caudalímetro correctamente calibrado y sin fallas técnicas reporta un valor que se sitúa dentro de un intervalo de incertidumbre, no un valor puntual exacto, con consecuencias regulatorias que la literatura ha comenzado a cuantificar.

Brandão et al. (2022) analizaron el riesgo de evaluación de cumplimiento en sistemas de monitoreo de calidad de agua en Brasil e introdujeron el concepto de *guard bands*: zonas de incertidumbre en los umbrales regulatorios dentro de las cuales una medición puede clasificarse incorrectamente como conforme o no conforme, no por falla del sensor sino por la incertidumbre inherente al proceso de medición. Sus resultados mostraron que ignorar la incertidumbre en la evaluación de cumplimiento introduce una tasa sistemática de falsas conformidades y falsas no conformidades, cuya magnitud depende de la relación entre la incertidumbre expandida del instrumento y la distancia del valor medido al umbral normativo. En el marco de la DGA, este hallazgo es directamente relevante: una empresa que extrae un caudal próximo al límite de su derecho de aprovechamiento puede ser clasificada como infractora o como conforme dependiendo de la incertidumbre de su caudalímetro, con independencia del volumen real extraído.

La guía EURACHEM/CITAC (Eurachem/CITAC, 2021) formaliza este problema metodológico: establece que la evaluación de cumplimiento en presencia de incertidumbre de medición no puede limitarse a comparar el valor medido con el límite normativo, sino que requiere incorporar la incertidumbre expandida del instrumento para determinar la probabilidad de error de clasificación. Esta aproximación, estándar en metrología industrial y en regulación ambiental europea, no está explícitamente recogida en la normativa DGA

chilena, lo que genera una asimetría: las empresas que reportan datos con alta incertidumbre no cuantificada tienen mayor probabilidad de ser clasificadas incorrectamente, en ambas direcciones, que aquellas que han documentado la incertidumbre de sus instrumentos.

La tensión entre estas perspectivas es relevante para el framework de decisión: Miasayedava et al. (2020) argumentan que el monitoreo continuo IoT puede crear una ilusión de cumplimiento cuando genera grandes volúmenes de datos sin capacidad analítica para cuantificar su incertidumbre, mientras que Brandão et al. (2022) y Eurachem/CITAC (2021) muestran que la cuantificación explícita de la incertidumbre (aunque introduzca mayor complejidad en el reporte) reduce el riesgo de clasificación errónea y fortalece la posición de la empresa ante una fiscalización. Este debate en la literatura señala una dirección técnica clara para OE2: la taxonomía de fallas debe distinguir entre errores detectables y eliminables por mejora del hardware, y la incertidumbre residual que permanece incluso en sistemas correctamente mantenidos, pues ambas requieren estrategias de gestión regulatoria diferentes.

La probabilidad de que una infracción sea detectada y sancionada depende de la capacidad operativa de la DGA. Gray y Shimshack (2011) modelaron el riesgo regulatorio como el producto de la probabilidad de detección por el costo esperado de la sanción, demostrando que incluso regímenes con sanciones severas tienen escaso poder disuasorio cuando esa probabilidad es baja. En el contexto chileno, la DGA fiscaliza miles de puntos de extracción con recursos acotados, lo que genera una probabilidad de detección heterogénea: las operaciones con mayor visibilidad o historial de incumplimientos son inspeccionadas con mayor frecuencia que las ubicadas en zonas remotas (Gómez González y Rivera Bravo, 2022). Esta asimetría de riesgo entre empresas es una variable que un desarrollo futuro del framework de decisión podría incorporar como parámetro de escenario diferenciado por caso, en lugar de la tasa de detección nacional agregada que emplea la calibración de esta investigación (Cuadro 4; Sección 7.3).

Establecidas las fuentes técnicas del riesgo (la degradación de la calidad de datos en sus capas de hardware, software y analítica, combinada con la capacidad fiscalizadora heterogénea de la DGA), la pregunta siguiente es qué incentivos económicos y normativos hacen que la inversión en sistemas de monitoreo de mayor calidad sea racionalmente justificable para las empresas mineras de la zona centro.

3.5 Incentivos económicos y regulatorios para la inversión en monitoreo

La decisión de invertir en mejoras del sistema de monitoreo hídrico obedece a dos tipos de incentivos que operan simultáneamente: los económicos, que hacen rentable la inversión al reducir el costo esperado de

las sanciones, y los regulatorios, que emergen del diseño del régimen de cumplimiento y de las señales que la autoridad emite a través de su política de fiscalización.

3.5.1 Incentivos económicos: el análisis costo-beneficio de la inversión en IoT. La justificación económica de invertir en sistemas IoT de monitoreo descansa en el análisis costo-beneficio, herramienta central de la ingeniería industrial para evaluar proyectos bajo incertidumbre (Boardman et al., 2018). En el contexto de tecnologías de cumplimiento regulatorio, el beneficio de la inversión no es un ingreso directo sino una reducción del costo esperado de sanciones: si la inversión en IoT reduce la probabilidad de infracción de p_0 a p_1 , el beneficio anual esperado es $(p_0 - p_1) \times C_s$, donde C_s representa el costo esperado de una sanción (multas, honorarios legales y costos de paralización de faenas) (Gray y Shimshack, 2011; Oliveros-Sepúlveda et al., 2025). Este marco permite calcular indicadores estándar como el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el período de recuperación de la inversión, comparando arquitecturas tecnológicas según su costo de implementación y su efectividad en la reducción del riesgo regulatorio (Boardman et al., 2018).

La aplicación rigurosa del ACB requiere precisar tres decisiones metodológicas que la literatura identifica como determinantes de los resultados. La primera es el horizonte temporal de análisis. O'Mahony (2021) demostraron empíricamente que el horizonte temporal puede tener un impacto sobre los resultados del ACB incluso mayor que la tasa de descuento (una conclusión contraintuitiva que la práctica profesional tiende a subestimar), dado que los costos y beneficios de proyectos con efectos ambientales de largo plazo se distribuyen de forma asimétrica en el tiempo. En el contexto del monitoreo hídrico minero, el horizonte natural combina la vida útil del sistema IoT (típicamente entre 7 y 15 años según la tecnología) con el período de vigencia de los derechos de aprovechamiento, lo que puede extender el horizonte de análisis a 10-20 años. La segunda decisión es la tasa de descuento, cuya elección afecta la valoración presente de los beneficios futuros evitados; para proyectos de tecnología de cumplimiento ambiental, la literatura recomienda rangos entre el 6% y el 12% según el perfil de riesgo del proyecto y el costo de capital de la empresa (Boardman et al., 2018). La tercera decisión es el tratamiento de la incertidumbre: dado que las probabilidades de infracción p_0 y p_1 son estimaciones paramétricas y no valores ciertos, el ACB debe incorporar análisis de sensibilidad que evalúe la robustez de los resultados ante variaciones en los parámetros críticos.

Sköld et al. (2022) aplicaron este marco metodológico al contexto específico de tecnologías de tratamiento de agua, combinando evaluación cuantitativa de riesgo con ACB y expresando la incertidumbre

de los resultados en percentiles 5, 50 y 95 para el VAN calculado a un horizonte de 50 años con tasa de descuento del 3,5 %. Su enfoque es metodológicamente análogo al que esta investigación propone para las arquitecturas IoT de monitoreo hídrico en minería: en ambos casos el objeto de evaluación es una tecnología que reduce un riesgo (de contaminación en su caso, de incumplimiento regulatorio en el nuestro) cuya probabilidad solo puede estimarse paramétricamente en ausencia de datos de empresa específicos.

Espinoza Ortiz et al. (2023) documentaron que sistemas IoT de monitoreo piezométrico de bajo costo pueden implementarse por menos de USD 500 por punto de medición, incluyendo sensor, gateway LoRaWAN y plataforma de gestión de datos; el costeo específico para minería que esta investigación desarrolla en la Sección 5.4 (Cuadro 7) resulta entre 3 y 6 veces superior, diferencia atribuible a supuestos más conservadores de amortización del *gateway* e instalación en terreno, y no a una discrepancia sobre la tecnología en sí. Aun bajo ese costeo más alto, frente a multas que pueden alcanzar las 2.000 UTM por infracción muy grave (equivalente a aproximadamente \$140 millones de pesos a valores de 2025), el retorno esperado de la inversión en monitoreo continuo resulta favorable incluso ante probabilidades de infracción relativamente bajas. El cálculo se vuelve aún más relevante cuando se incorpora el costo de paralización de faenas, que Oliveros-Sepúlveda et al. (2025) estiman puede representar entre el 2 % y el 8 % del EBITDA anual de una operación minera mediana. La comparación entre arquitecturas alternativas (que difieren en costo de inversión, vida útil y efectividad en la reducción de fallas) requiere, adicionalmente, homologar los horizontes temporales cuando las vidas útiles no son equivalentes, aplicando criterios de valor anual equivalente o truncamiento al período más corto, conforme a las recomendaciones metodológicas de Boardman et al. (2018).

3.5.2 Incentivos regulatorios: cumplimiento, reputación y acceso a financiamiento. Más allá del cálculo directo, el cumplimiento regulatorio genera incentivos de segundo orden que refuerzan la decisión de inversión. Primero, el historial de infracciones es un factor que la DGA considera al graduar sanciones futuras: una empresa reincidente enfrenta penalidades más severas y mayor probabilidad de fiscalización, lo que eleva su perfil de riesgo de forma acumulativa (Ministerio de Obras Públicas, 2022). Segundo, la integración creciente de criterios ambientales, sociales y de gobernanza (ESG) en las decisiones de los grandes fondos de inversión implica que las empresas con sanciones ambientales reiteradas soportan mayores costos de capital (Oliveros-Sepúlveda et al., 2025). Tercero, los procedimientos sancionatorios y sus resoluciones son de acceso público a través del Sistema Nacional de Información de Fiscalización Ambiental

(SNIFA) (Superintendencia del Medio Ambiente, 2026), lo que convierte el historial de cumplimiento hídrico de cada faena en información verificable por terceros y, con ello, en un factor de reputación corporativa con incidencia sobre la licencia social para operar.

La convergencia de estos incentivos económicos y regulatorios no es exclusiva de Chile: se enmarca en una tendencia global de endurecimiento de la gobernanza hídrica. Para comprender el posicionamiento del país en ese contexto y extraer lecciones de experiencias comparadas donde la adopción de IoT para monitoreo hídrico está más avanzada, la sección siguiente sitúa a Chile en el escenario latinoamericano y tecnológico más amplio.

3.6 El rol de Chile en la regulación hídrica latinoamericana y en la adopción de IoT en minería

Chile ocupa una posición singular en el contexto latinoamericano, tanto por su tradición regulatoria hídrica como por el nivel de desarrollo tecnológico de su industria minera. Situar ese posicionamiento en perspectiva comparada permite identificar las brechas propias y extraer lecciones de los contextos donde la adopción de IoT para monitoreo hídrico está más avanzada.

3.6.1 Chile en el contexto de la regulación hídrica latinoamericana. América Latina concentra aproximadamente el 30 % de las reservas mundiales de agua dulce, pero enfrenta desafíos severos de gestión hídrica en sus regiones mineras (Naciones Unidas, 2022). Los marcos regulatorios de la región difieren sustancialmente: Perú opera bajo un sistema de concesiones administrativas fiscalizado por organismos sectoriales independientes (ANA, OEFA); Brasil cuenta con la Agencia Nacional de Aguas dotada de facultades de monitoreo satelital; Chile, en cambio, mantiene el sistema más orientado al mercado de la región, lo que genera fortalezas (eficiencia en la asignación de derechos) pero también debilidades estructurales en la capacidad de monitoreo y fiscalización (Donoso et al., 2020).

La reforma de 2022 sitúa a Chile en una trayectoria de convergencia hacia estándares internacionales más exigentes, aunque la velocidad de esa convergencia depende de la capacidad técnica de las empresas para cumplir con las nuevas obligaciones de monitoreo continuo. Genova Alonso et al. (2022) documentaron que la evolución regulatoria hídrica en Chile desde 1900 ha sido reactiva antes que anticipatoria, respondiendo a crisis de escasez o conflictos sociales en lugar de planificación técnica prospectiva. Esta pauta sistémica subraya la importancia de que las empresas desarrollen capacidades de monitoreo que superen los mínimos exigidos, anticipando el endurecimiento regulatorio que la tendencia global hace previsible.

3.6.2 Adopción de IoT en minería: tendencias y brechas. La adopción de arquitecturas IoT en el monitoreo hídrico industrial ha crecido de forma acelerada en la última década. Cohen-Manrique et al. (2025) realizaron una revisión sistemática de la literatura sobre tendencias emergentes del IoT en sistemas acuáticos y verificaron un incremento sostenido en publicaciones sobre monitoreo subterráneo con sensores inteligentes, con especial concentración en regiones áridas de Australia, Medio Oriente y América del Sur. Una arquitectura IoT para monitoreo hídrico integra sensores de campo (piezómetros, caudalímetros electromagnéticos, sensores de calidad), gateways de comunicación de baja potencia y largo alcance (LoRaWAN, NB-IoT, LTE-M), plataformas de procesamiento en la nube y tableros de visualización con capacidad de alerta. Cacciuttolo et al. (2024) demostraron que redes LoRaWAN en entornos mineros complejos transmiten datos en tiempo real a través de barreras físicas sin necesidad de cableado, reduciendo los costos de instalación frente a los sistemas tradicionales.

En el caso australiano, Office of the Auditor General of Western Australia (2022) identificaron que la verificación independiente mediante sensores remotos elevó la tasa de detección de incumplimientos declarados incorrectamente, sin requerir un aumento de la dotación de fiscalizadores en terreno. WaterNSW, la autoridad reguladora hídrica de Nueva Gales del Sur, exige que los programas de monitoreo incluyan puntos de muestreo aguas arriba y aguas abajo de cada operación minera, con transmisión continua de datos como condición de validez regulatoria (WaterNSW, 2026). Ambos ejemplos son coherentes con el argumento de Gray y Shimshack (2011): la efectividad disuasoria de la regulación ambiental no depende solo de la severidad de las sanciones, sino de la probabilidad percibida de detección, que las tecnologías de monitoreo continuo elevan de manera significativa tanto para el regulador como para la propia empresa.

3.6.3 Tipología de arquitecturas IoT alternativas para el monitoreo hídrico minero. Para que el análisis costo-beneficio de OE4 tenga objetos de evaluación definidos, es necesario establecer en el marco teórico la tipología de arquitecturas tecnológicas alternativas que serán comparadas. Khairullah et al. (2025) revisaron sistemáticamente las aplicaciones de LoRaWAN en gestión hídrica entre 2017 y 2024, e identificaron que las principales tecnologías LPWAN (LoRaWAN, NB-IoT, Sigfox) difieren sustancialmente en cuatro dimensiones de decisión: costo de inversión y operación, cobertura en entornos remotos, confiabilidad de entrega de paquetes y dependencia de infraestructura de terceros. Estas dimensiones son precisamente las relevantes para el contexto minero cordillerano de la zona centro.

A partir de esta taxonomía tecnológica y la evidencia disponible, esta investigación define tres archi-

tecturas alternativas como objetos del ACB de OE4. La **Arquitectura A** corresponde a una red LoRaWAN privada con gateways propios: opera en espectro no licenciado, presenta bajo costo de inversión inicial, alta autonomía energética en nodos remotos y cobertura de hasta 15-20 km en condiciones favorables, pero con degradación significativa por topografía cordillerana documentada por Musonda et al. (2024), y sin dependencia de operadores de telecomunicaciones. La **Arquitectura B** corresponde a una red NB-IoT o LTE-M sobre infraestructura de operador licenciado: ofrece mayor confiabilidad de entrega de paquetes que LoRaWAN y menor latencia, pero requiere cobertura celular cuya disponibilidad en la cordillera de la zona centro es limitada o inexistente, y genera costos de operación recurrentes por suscripción a la red del operador (Khairullah et al., 2025). La **Arquitectura C** corresponde a un sistema SCADA con telemetría satelital: presenta el mayor costo de inversión y operación de las tres alternativas, pero ofrece cobertura universal independiente de infraestructura terrestre, constituyendo la solución de referencia actualmente instalada en muchas operaciones mineras remotas y el punto de comparación natural para evaluar el desplazamiento hacia arquitecturas IoT de menor costo.

Comparación de arquitecturas IoT alternativas para monitoreo hídrico subterráneo en minería			
DIMENSIÓN DE COMPARACIÓN	Arquitectura A — Red LoRaWAN privada	Arquitectura B — Red NB-IoT / LTE-M sobre operador	Arquitectura C — SCADA con telemetría satelital
Costo de inversión inicial	● Bajo (< USD 500/punto)	● Medio (USD 800–1.500/punto)	● Alto (> USD 3.000/punto)
Costo de operación recurrente	● Muy bajo (espectro no licenciado)	● Medio (suscripción a operador)	● Alto (suscripción satelital)
Cobertura en zonas remotas cordilleranas	● Limitada (topografía degrada señal)	● Muy limitada (depende de celular)	● Universal (independiente de infraestructura terrestre)
Confiabilidad de entrega de paquetes	● Media (hasta 11% de pérdida en condiciones adversas)	● Alta (red licenciada con QoS)	● Muy alta (cobertura garantizada)
Dependencia de infraestructura de terceros	● Ninguna (red propia)	● Alta (operador móvil)	● Media (proveedor satelital)
Autonomía energética en nodos remotos	● Alta (bajo consumo, batería larga duración)	● Media (mayor consumo energético)	● Baja (requiere alimentación continua o batería grande)
Vida útil estimada del sistema	● 7–10 años	● 5–8 años	● 10–20 años (solución de referencia industrial)
Riesgo de incumplimiento SINA por falla de conectividad	● Alto (pérdida real de paquetes documentada: hasta 11%, Musonda et al., 2024)	● Alto (sin cobertura celular en cordillera)	● Bajo (cobertura garantizada)

NIVEL DE DESEMPEÑO: ● Alto / Muy alto (favorable) ● Medio (aceptable) ● Bajo / Muy bajo (desfavorable)

Elaboración propia basada en Khairullah et al. (2025) y Musonda et al. (2024)

Nota. QoS = Quality of Service. SINA = Sistema de Información Nacional de Aguas.

Figura 5. Comparación de arquitecturas IoT alternativas para monitoreo hídrico subterráneo en minería: dimensiones de decisión relevantes para el análisis costo-beneficio. El nivel de desempeño refleja la adecuación de cada arquitectura al contexto minero cordillerano de la zona centro. QoS = *Quality of Service*. SINA = Sistema de Información Nacional de Aguas.

Nota. Elaboración propia basada en Khairullah et al. (2025) y Musonda et al. (2024).

La diferenciación entre estas tres arquitecturas no es solo técnica sino económico-regulatoria: cada una presenta un perfil distinto de costos de inversión, vida útil esperada, probabilidad de fallas de conectividad y, en consecuencia, riesgo diferenciado de incumplimiento del reporte continuo al SINA, tal como sintetiza la Figura 5. Aunque las Arquitecturas A y B presentan ambas riesgo alto de incumplimiento del reporte continuo al SINA por falla de conectividad, las causas son distintas: en A el riesgo es mitigable mediante redundancia de gateways, mientras que en B depende de infraestructura de terceros no controlable por la empresa operadora. El ACB de OE4 aplicará el marco de Boardman et al. (2018), O'Mahony (2021) y Sköld et al. (2022) para comparar las tres arquitecturas en términos de VAN de la inversión bajo escenarios paramétricos de probabilidad de infracción, tasa de descuento y horizonte temporal, identificando las configuraciones con mayor rentabilidad en la mitigación del riesgo regulatorio ante la DGA.

Cohen-Manrique et al. (2025) advierten, no obstante, que la mayor parte de la evidencia disponible

proviene de marcos regulatorios maduros y que persiste una brecha empírica en la cuantificación del impacto del IoT sobre el riesgo regulatorio en el contexto específico de la normativa DGA. Los marcos teóricos existentes tampoco articulan las tres dimensiones tecnológicas con modelos cuantitativos de riesgo aplicables a la minería latinoamericana. Esa es precisamente la brecha que esta investigación aborda mediante el diseño de un framework de decisión de inversión con escenarios paramétricos, orientado a la gran y mediana minería de la zona centro de Chile.

4 Metodología

Los procedimientos descritos en esta sección operacionalizan los cuatro objetivos específicos que, en conjunto, constituyen el framework de apoyo a la decisión de inversión planteado como objetivo general de esta investigación. La sección se organiza en tres partes: los casos de estudio y el criterio de muestreo empleado, las fuentes y tipos de datos utilizados, y el procedimiento y las herramientas de análisis aplicadas a cada objetivo específico.

4.1 Casos de estudio y muestreo

Los tres casos de estudio se evalúan bajo un marco analítico común, estructurado en torno a los cuatro objetivos específicos de la investigación: el cumplimiento normativo vigente, la incidencia de fallas de monitoreo, los parámetros de riesgo regulatorio y económico, y el costo-beneficio de arquitecturas de monitoreo IoT. Este marco se aplica de manera uniforme a cada caso, lo que permite comparar sus resultados entre sí a pesar de tratarse de operaciones con características productivas y geográficas distintas, dado que los tres comparten una exposición equivalente al régimen regulatorio de la Dirección General de Aguas y de la Superintendencia del Medio Ambiente en materia de monitoreo hídrico.

Los casos de estudio corresponden a tres operaciones de gran minería del cobre ubicadas en la macrozona centro de Chile: División Andina de Codelco, en el acuífero asociado a la cuenca del río Aconcagua, Región de Valparaíso; Los Bronces de Anglo American, en el acuífero asociado a la cuenca del río Maipo, Región Metropolitana; y División El Teniente de Codelco, en el acuífero asociado a la cuenca del río Cachapoal, Región de O'Higgins. La ubicación geográfica de estas tres operaciones respecto de las cuencas hidrográficas de la zona centro fue presentada en la Figura 1 (Sección 3.2); el Cuadro 1 sistematiza a continuación sus atributos operacionales y regulatorios.

Cuadro 1. *Casos de estudio: empresas, ubicación y cuencas asociadas.*

Empresa	Faena / División	Comuna(s)	Región	Cuenca / acuífero asociado	Tipo de explotación
Codelco	División Andina	Los Andes	Valparaíso	Aconcagua (cuenca alta, sector Río Blanco)	Subterránea y rajo abierto
Anglo American Sur S.A.	Los Bronces	Lo Barnechea	Metropolitana	Maipo	Rajo abierto (con expansión subterránea en desarrollo)
Codelco	División El Teniente	Machalí	O'Higgins	Cachapoal	Subterránea

Nota. Elaboración propia a partir de antecedentes públicos de las Resoluciones de Calificación Ambiental y del Sistema Nacional de Información de Fiscalización Ambiental (SNIFA) de cada proyecto.

El muestreo utilizado es de carácter no probabilístico e intencional. La selección de estos tres casos no busca representatividad estadística del total de la industria minera chilena, sino que responde a su relevancia como operaciones de gran escala con exposición significativa al marco regulatorio señalado. Los tres casos cuentan, además, con antecedentes públicos y verificables de fiscalización ambiental disponibles en el SNIFA, aunque su relación con el objeto de estudio no es homogénea, y esa asimetría forma parte del diseño. División Andina y Los Bronces registran procedimientos sancionatorios asociados directamente a deficiencias en la reportabilidad de monitoreos comprometidos y a incumplimientos en la transmisión oportuna de datos exigidos por la normativa vigente para el componente agua. El Teniente, en cambio, no registra antecedentes caso-específicos de falla de monitoreo hídrico, y se incorpora precisamente como caso de contraste: permite examinar cómo se comporta el modelo cuando la calibración debe apoyarse en la literatura general en lugar de en evidencia de fiscalización propia, situación que corresponde a la mayoría de las operaciones mineras del país. Las implicancias de esta asimetría se desarrollan en la Sección 5.2.

Más allá de su exposición regulatoria, las tres operaciones concentran una fracción relevante de la actividad minera del país, lo que descarta que se trate de casos marginales. División Andina produjo 182.000 toneladas de cobre fino en 2025 (Codelco, 2026) y Los Bronces 164.600 toneladas (Redimin.cl, 2026); en conjunto, ambas faenas representan más del 6% de las 5,3 millones de toneladas que Chile produjo ese año, cifra que por sí sola mantiene al país como primer productor mundial de cobre (Reporte Minero,

2026). División El Teniente, por su parte, fue en 2024 la división de mayor producción de cobre fino de todo Codelco (El Tipógrafo, 2025), además de operar el yacimiento subterráneo de cobre más grande del mundo, con más de 4.500 kilómetros de galerías (Sección 3.2). Esta escala productiva, sumada a que las tres faenas registran procedimientos de fiscalización activos o recientes de la DGA y la SMA (Sección 4.3.1), confirma que los casos seleccionados concentran, dentro de la macrozona centro, la mayor exposición conjunta al riesgo regulatorio hídrico que esta investigación busca modelar.

4.2 Fuentes y tipos de datos

La investigación se nutre exclusivamente de fuentes secundarias y de análisis documental, sin recolección de datos primarios mediante encuestas o entrevistas. Esta decisión responde a la naturaleza del objeto de estudio, que se sustenta en información normativa, técnica y financiera de carácter público.

Las fuentes normativas comprenden el Código de Aguas, la Ley N.º 21.435, la Ley N.º 21.740, y las resoluciones emitidas por la Dirección General de Aguas en materia de monitoreo de extracciones efectivas, incluyendo sus actualizaciones técnicas más recientes. A estas se suma la Ley N.º 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente, la Ley Orgánica de la Superintendencia del Medio Ambiente, y las Resoluciones de Calificación Ambiental correspondientes a cada uno de los tres casos de estudio, en tanto instrumento que establece exigencias específicas de monitoreo hídrico a nivel de proyecto individual.

Las fuentes técnicas corresponden a literatura especializada y reportes sobre sistemas de monitoreo IoT aplicados a la extracción de aguas subterráneas, incluyendo fichas técnicas de equipamiento de medición, transmisión y almacenamiento de datos, empleadas para la construcción de la taxonomía de fallas.

Las fuentes cuantitativas secundarias incluyen el historial de fiscalizaciones y sanciones registradas en el Sistema Nacional de Información de Fiscalización Ambiental (SNIFA), tanto de la Dirección General de Aguas como de la Superintendencia del Medio Ambiente, para cada uno de los tres casos de estudio, así como memorias financieras y reportes de sustentabilidad de las empresas asociadas. Complementariamente, se recurre a antecedentes de costos de mercado de arquitecturas de monitoreo IoT, obtenidos de proveedores del sector y literatura especializada en evaluación de este tipo de tecnología.

Cabe señalar que ciertos datos de mayor especificidad, tales como la frecuencia real de falla de los sistemas de monitoreo instalados en los casos de estudio y los parámetros financieros requeridos para la evaluación costo-beneficio, no se encuentran disponibles públicamente al momento de esta investigación. Su tratamiento metodológico se define en la sección siguiente.

4.3 Procedimiento y herramientas de análisis

El procedimiento de análisis se organiza en torno a los cuatro objetivos específicos, aunque no de manera estrictamente secuencial. El análisis normativo y la taxonomía de fallas de monitoreo IoT constituyen dos insumos independientes que convergen en la construcción del modelo paramétrico de riesgo regulatorio y económico: el primero aporta los criterios de incumplimiento y sus umbrales sancionatorios; el segundo, la probabilidad y frecuencia de fallas técnicas. A su vez, la exposición a riesgo cuantificada por ese modelo constituye el insumo monetario del análisis costo-beneficio de arquitecturas IoT. Esta lógica de dependencias resuelve explícitamente el vínculo entre la cuantificación del riesgo y su traducción en decisiones de inversión.

4.3.1 Análisis normativo. El análisis normativo revisa cronológicamente el marco regulatorio ya sistematizado en el Marco Teórico (Código de Aguas de 1981, Decreto Supremo N.º 203 de 2013, Ley N.º 21.064 de 2018, Resolución Exenta N.º 1.238 de 2019, Decreto Supremo N.º 53 de 2020, Ley N.º 21.435 de 2022 y Ley N.º 21.740 de 2025) y, sobre esa base, construye para cada uno de los tres casos de estudio una matriz de cumplimiento que registra tres elementos: las obligaciones de monitoreo aplicables según la categoría de exigencia asignada por la Resolución Exenta N.º 1.238; el historial de fiscalizaciones y sanciones de cada caso registrado en el SNIFA, identificado en la sección anterior como fuente cuantitativa secundaria; y la correspondencia entre cada sanción registrada y el grado de infracción del artículo 173 ter del Código de Aguas (primer a quinto grado). Esta matriz constituye el insumo normativo de entrada para el modelo de riesgo desarrollado en la subsección siguiente.

El procedimiento se apoya en dos referentes metodológicos comparados. El primero es la auditoría de desempeño de la Office of the Auditor General de Australia Occidental sobre cumplimiento de condiciones ambientales mineras (Office of the Auditor General of Western Australia, 2022), que aporta un protocolo de verificación independiente aplicable a la construcción de la matriz de cumplimiento. El segundo son las directrices de monitoreo hídrico de WaterNSW para actividades mineras subterráneas en áreas especiales (WaterNSW, 2026), que sirven de referencia para contrastar la exigencia normativa chilena (puntos de muestreo, frecuencia de medición, transmisión continua) con un estándar internacional comparable, sin que ello implique que dicho estándar sea aplicable en Chile.

4.3.2 Taxonomía de fallas de monitoreo IoT. La taxonomía se construye sobre las tres capas tecnológicas ya identificadas en el Marco Teórico (hardware, conectividad y software/analítica) operacionalizando las cinco dimensiones de calidad de datos definidas por Wang et al. (2024) (precisión, completitud,

consistencia, actualidad y trazabilidad) como criterio de clasificación: cada tipo de falla reportado en la literatura se mapea a la dimensión de calidad de datos que degrada. Sobre esa base se sistematiza la jerarquía de errores identificada por Teh et al. (2020) en su revisión de 57 publicaciones sobre calidad de datos en sensores IoT (*outliers*, datos faltantes, sesgo, deriva, ruido, valor constante, incertidumbre y *stuck-at-zero*), ponderada con evidencia empírica específica del contexto minero: las tasas de error de caudalímetros industriales (American Water Works Association, 2021; Barrientos et al., 2023), la pérdida de paquetes en redes LoRaWAN por topografía cordillerana (Musonda et al., 2024), y el fenómeno de *ilusión de cumplimiento* por ausencia de capacidad analítica para detectar deriva gradual (Miasayedava et al., 2020).

Se incorpora evidencia complementaria de revisiones recientes sobre IoT en sistemas acuáticos (Cohen-Manrique et al., 2025) y sobre integración de aprendizaje automático e IoT para calidad de agua (Essamlali et al., 2024), con el fin de verificar que la taxonomía capture tendencias tecnológicas emergentes y no solo fallas ya documentadas en el contexto minero chileno. La probabilidad de ocurrencia de cada tipo de falla se estima a partir de la frecuencia relativa reportada en la literatura especializada, dado que, como se señaló en la sección anterior, no existen datos empíricos propios sobre frecuencia real de falla en los tres casos de estudio.

4.3.3 Modelo paramétrico de riesgo. El modelo integra la matriz normativa construida en el análisis normativo y las probabilidades de falla estimadas en la taxonomía de fallas en un modelo de riesgo regulatorio y económico. Dado que las probabilidades de falla provienen de fuentes heterogéneas (distintos estudios, distintas condiciones de terreno) y que los datos de sanciones del SNIFA no siguen distribuciones normales, la estimación se resuelve mediante simulación de Monte Carlo con **distribuciones no informativas** sobre rangos acotados por la evidencia: a cada parámetro se le asigna una distribución uniforme entre los valores mínimo y máximo que la literatura o los antecedentes de fiscalización respaldan, en lugar de suponer una forma funcional que concentre probabilidad en algún valor central que ninguna fuente permite privilegiar. La única excepción es la incertidumbre de instrumento de División Andina, que se modela como una mezcla de dos uniformes para reflejar la evidencia de terreno de Barrientos et al. (2023), según se detalla en el Cuadro 4.

A este esquema de estimación se suma el concepto de *guard band*, desarrollado por Eurachem/CITAC (2021) y aplicado por Brandão et al. (2022) a la evaluación de cumplimiento en monitoreo hídrico. Un *guard band* es una zona de resguardo que se añade a ambos lados de un umbral normativo (por ejemplo, el volumen

máximo de extracción autorizado), cuyo ancho se determina a partir de la incertidumbre de medición del instrumento y no de un criterio arbitrario. Su función es evitar que una medición cercana al límite se clasifique como conforme o no conforme basándose únicamente en el valor reportado: si la lectura del caudalímetro cae dentro de esa zona, no es posible afirmar, con la confianza estadística requerida, si la extracción real estuvo por sobre o por debajo del volumen autorizado, dado que el error del instrumento podría explicar la diferencia. Formalmente, para un punto de monitoreo i con volumen autorizado $Q_{aut,i}$ y error relativo de instrumento u_i , el ancho del *guard band* se define como

$$GB_i = k \cdot u_i \cdot Q_{aut,i} \quad (1)$$

donde k es el factor de cobertura de un contraste unilateral al 95 % de confianza ($k = 1,64$), siguiendo el criterio de Eurachem/CITAC (2021). Una lectura m_i se clasifica como *no concluyente* (es decir, estadísticamente indistinguible del cumplimiento) cuando $Q_{aut,i} - GB_i \leq m_i \leq Q_{aut,i} + GB_i$. En el modelo de esta investigación, u_i se calibra a partir del rango de error de caudalímetros industriales ya documentado en el Marco Teórico (entre 5 % y 15 % según American Water Works Association (2021), con hasta un 66 % de instrumentos fuera de ese rango en validaciones de terreno según Barrientos et al. (2023)), lo que permite estimar, para cada caso de estudio, qué proporción de las infracciones registradas por la DGA podría corresponder a error de medición y no a una extracción real por sobre lo autorizado.

El modelo genera escenarios paramétricos combinando la frecuencia esperada de infracciones con el monto de multas asociado, según los rangos UTM del artículo 173 ter ya sistematizados en el Marco Teórico. Se sigue la aproximación de riesgo regulatorio de Gray y Shimshack (2011) (probabilidad de detección multiplicada por el costo esperado de la sanción) y la evidencia de Chakraborti y Shimshack (2022) sobre modelamiento estadístico de cumplimiento ambiental con datos de fiscalización a nivel de planta en contextos latinoamericanos de capacidad regulatoria limitada, directamente comparable al caso chileno.

Agrupación de los grados sancionatorios. El artículo 173 ter gradúa las infracciones en cinco grados, según se detalló en la Sección 3.3.2. Para efectos de la modelación, esos cinco grados se agrupan en los tres tramos definidos en la Sección 1: *leve* (primer grado, 10–50 UTM), *grave* (segundo y tercer grado, 51–500 UTM) y *muy grave* (cuarto y quinto grado, 501–2.000 UTM). La agrupación no es una simplificación de conveniencia sino una consecuencia de la evidencia disponible: como documenta la matriz de cumplimiento

(Sección 5.1), las fuentes públicas no permiten determinar el grado exacto asignado a las sanciones registradas, por lo que calibrar una distribución sobre cinco grados exigiría suponer una desagregación que ningún antecedente respalda. Los tres tramos, en cambio, son distinguibles a partir del tipo de conducta infractora, que sí consta en las fuentes. En lo que sigue, el índice g recorre estos tres tramos.

Formalmente, sea $p_{s,g}$ la probabilidad estimada de incurrir en una infracción del tramo g (leve, grave o muy grave) bajo el escenario s ($s = 0$ para el régimen de monitoreo vigente (*status quo*) y $s = 1$ para el escenario posterior a la inversión en una arquitectura IoT), M_g el monto esperado de la multa asociada al tramo g (el punto medio del rango UTM correspondiente, convertido a pesos según el valor vigente de la UTM, que a agosto de 2026 asciende a \$71.649; Servicio de Impuestos Internos, 2026), y ϕ_s la proporción de infracciones detectadas que el *guard band* clasifica como no concluyentes bajo el escenario s . La exposición a riesgo regulatorio y económico esperada se define como

$$E[R_s] = \sum_g p_{s,g} (1 - \phi_s) M_g, \quad s \in \{0, 1\} \quad (2)$$

El factor $(1 - \phi_s)$ corrige la exposición bruta descontando la fracción de infracciones que, según el *guard band*, no pueden atribuirse con confianza estadística a una extracción real por sobre lo autorizado. Dado que la inversión en una arquitectura IoT reduce tanto la probabilidad de falla técnica (taxonomía, Sección 4.3.2) como la incertidumbre de medición (u_i y, por tanto, ϕ_s), se espera que $E[R_1] < E[R_0]$. Esta diferencia constituye precisamente el beneficio anual evitado por la inversión,

$$B = E[R_0] - E[R_1], \quad (3)$$

que es la magnitud definida en la Sección 4.3.4 como beneficio anual esperado de cada arquitectura IoT, y que constituye el insumo monetario del análisis costo-beneficio. La Figura 6 sintetiza la lógica de dependencias entre la matriz normativa, la taxonomía de fallas, el ajuste por *guard band*, el modelo paramétrico y el análisis costo-beneficio.

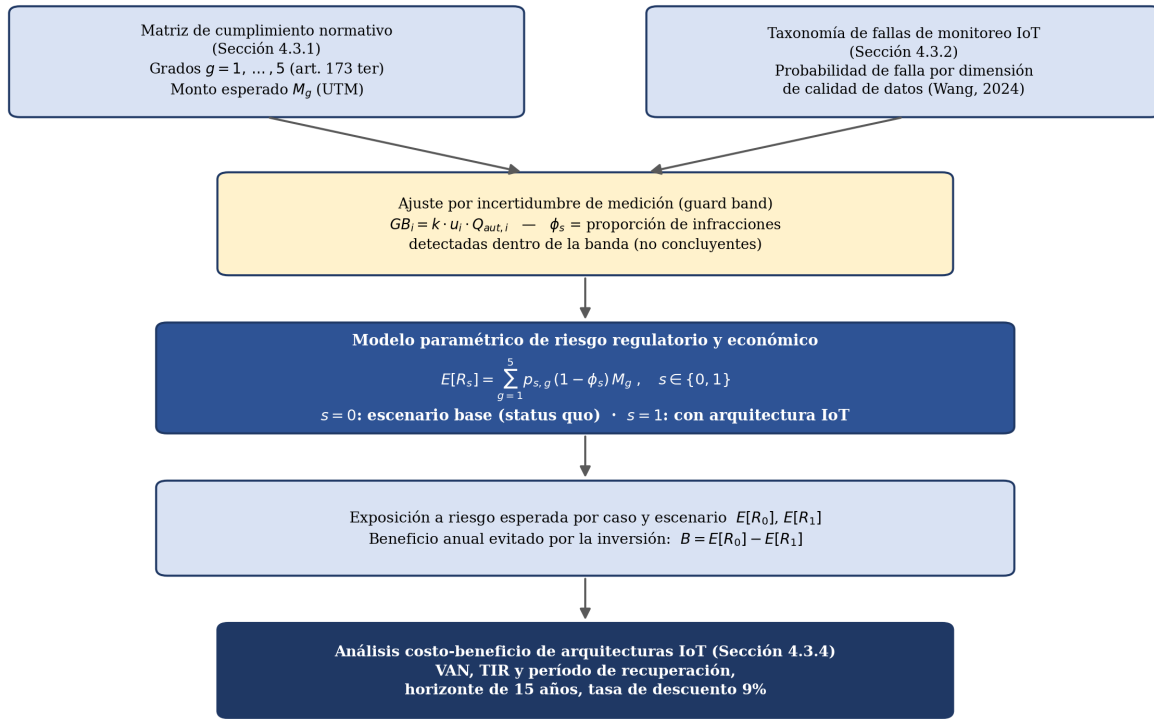


Figura 6. Lógica del modelo paramétrico de riesgo regulatorio y económico. La matriz normativa y la taxonomía de fallas alimentan el ajuste por incertidumbre de medición, que a su vez parametriza el modelo de riesgo. La diferencia de exposición entre escenarios (B) constituye el insumo monetario del análisis costo-beneficio.

Nota. Elaboración propia.

Ejemplo numérico ilustrativo. A modo de ilustración de la mecánica del modelo (no como estimación empírica de un caso específico, dado que, como se señaló en la Sección 4.2, no se dispone de datos primarios de frecuencia de falla ni de parámetros financieros por caso), considérese un punto de monitoreo con volumen autorizado $Q_{aut} = 100$ L/s y un caudalímetro cuyo error de instrumento documentado es $u = 10\%$ (American Water Works Association, 2021). Aplicando la Ecuación 1, el ancho del *guard band* es $GB = 1,64 \times 0,10 \times 100 = 16,4$ L/s, de modo que toda lectura entre 83,6 y 116,4 L/s resulta estadísticamente no concluyente.

Para el escenario base ($s = 0$), se asumen los siguientes parámetros ilustrativos: probabilidad de un evento real de extracción sobre lo autorizado en el período $p_{ext,0} = 0,30$; tasa de sanción efectiva de la DGA, calculada como la proporción de fiscalizaciones resueltas que terminaron en multa durante 2024 (928 de 2.256; Dirección General de Aguas, 2025), $p_{detect} = 928/2256 = 0,411$; distribución de infracciones detectadas

entre grados $\omega = (\text{leve} = 0,50, \text{grave} = 0,40, \text{muy grave} = 0,10)$; y proporción no concluyente por *guard band* $\phi_0 = 0,30$. Con $p_{0,g} = p_{\text{ext},0} \cdot p_{\text{detect}} \cdot \omega_g$ y los montos medios $M_{\text{leve}} = 30$ UTM, $M_{\text{grave}} = 275,5$ UTM y $M_{\text{muy grave}} = 1.250,5$ UTM (puntos medios de los tres tramos definidos en la Sección 1 y justificados más arriba), la Ecuación 2 arroja $E[R_0] = 21,6$ UTM anuales por punto de monitoreo, equivalentes a \$1.548.861 al valor de la UTM de agosto de 2026 (Servicio de Impuestos Internos, 2026).

Si la inversión en una arquitectura IoT reduce la probabilidad de extracción no autorizada a $p_{\text{ext},1} = 0,12$ y la proporción no concluyente a $\phi_1 = 0,10$ (por mejor calibración y trazabilidad de los datos), manteniendo la misma distribución ω , se obtiene $E[R_1] = 11,1$ UTM anuales (\$796.557). El beneficio anual evitado por punto de monitoreo es, según la Ecuación 3, $B = 21,6 - 11,1 = 10,5$ UTM (\$752.304). Estos valores ilustran la mecánica del modelo; los parámetros $p_{\text{ext},s}$, ω y ϕ_s empleados en los tres casos de estudio se calibrarán con la evidencia normativa y de taxonomía de fallas recopilada en la Sección 4.3.1 y 4.3.2, y estarán sujetos al análisis de sensibilidad señalado en la Sección 3.5.

Extensión del modelo: riesgo por incumplimiento de obligaciones de monitoreo. La calibración empírica del modelo con los tres casos de estudio (Sección 5.3) mostró que la Ecuación 2 por sí sola no captura la totalidad del riesgo regulatorio observado. Dos de los tres casos, División Andina y Los Bronces, fueron fiscalizados no por una extracción cuya magnitud resultara ambigua bajo el *guard band*, sino por el incumplimiento directo y verificable del deber de instalar, mantener o transmitir oportunamente los datos del sistema de monitoreo: infracciones que el artículo 173 ter tipifica de forma independiente (*leves*, por incumplimientos de reporte o calibración; *graves*, por falla en la instalación o mantención del sistema, o por retraso en la transmisión al SINA) y que, a diferencia de una extracción cuyo volumen se disputa, no admiten ambigüedad estadística: el sistema estaba instalado y transmitiendo, o no lo estaba. Aplicar el factor $(1 - \phi_s)$ a este tipo de infracción sería conceptualmente incorrecto, porque el *guard band* corrige la incertidumbre de una medición existente, no la ausencia o el retraso de esa medición.

Se incorpora, por tanto, un segundo término al modelo, que cuantifica el riesgo por incumplimiento de las obligaciones de monitoreo sin aplicar el descuento por *guard band*. Sea p_s^{mon} la probabilidad estimada de incurrir en una infracción de este tipo bajo el escenario s , y ω_g^{mon} la distribución de esas infracciones entre los grados *leve* y *grave* (los dos grados a los que la normativa asocia explícitamente fallas de instalación, mantención, calibración o transmisión, según se sistematizó en la Sección 1). El riesgo esperado por incumplimiento de monitoreo es

$$E[R_s]^{\text{mon}} = p_s^{\text{mon}} \sum_{g \in \{\text{leve}, \text{grave}\}} \omega_g^{\text{mon}} M_g \quad (4)$$

y la exposición a riesgo total combina ambos canales,

$$E[R_s]^{\text{total}} = E[R_s] + E[R_s]^{\text{mon}} \quad (5)$$

donde $E[R_s]$ corresponde a la Ecuación 2. El beneficio anual evitado por la inversión (Ecuación 3) se redefine en términos de $E[R_s]^{\text{total}}$ para la calibración empírica de los tres casos de estudio, donde p_s^{mon} se calibra de forma diferenciada por caso a partir de la evidencia de fiscalización sistematizada en la taxonomía de fallas (Sección 4.3.2): alta para División Andina, por el déficit de instrumentación confirmado en tres bocatomas; moderada para Los Bronces, por el cargo vigente de la Superintendencia del Medio Ambiente (D-305-2024) por transmisión tardía de datos de monitoreo hídrico; y baja para El Teniente, donde no se identificó evidencia caso-específica de falla de monitoreo hídrico, por lo que se usa un valor de referencia de la literatura general. Para $s = 1$, p_1^{mon} se reduce de forma uniforme y sustancial en los tres casos, dado que la instalación, calibración y mantención de una arquitectura IoT bajo contrato de servicio ataca directamente la causa raíz de este canal de riesgo, de forma más inmediata incluso que su efecto sobre la ambigüedad de extracción modelada en la Ecuación 2.

La salida del modelo (la exposición a riesgo regulatorio y económico esperado total (Ecuación 5) para cada caso y escenario, y el beneficio B derivado de su diferencia) constituye el insumo monetario del análisis costo-beneficio desarrollado en la subsección siguiente.

4.3.4 Análisis costo-beneficio de arquitecturas IoT. El análisis costo-beneficio aplica el marco ya desarrollado en el Marco Teórico (Boardman et al., 2018) para comparar las tres arquitecturas IoT definidas: Arquitectura A (LoRaWAN privada), Arquitectura B (NB-IoT/LTE-M) y Arquitectura C (SCADA satelital), usando como beneficio anual esperado la reducción de la exposición a riesgo estimada en el modelo paramétrico de riesgo (Sección 4.3.3, Ecuación 3): el beneficio equivale a la reducción de la probabilidad de infracción multiplicada por el costo esperado de la sanción evitada.

Las tres decisiones metodológicas identificadas en el Marco Teórico quedan fijadas de la siguiente manera para efectos del ACB. La primera decisión, el horizonte temporal, se resuelve distinguiendo dos horizontes que la literatura suele tratar como uno solo. El **horizonte de validez del perfil de riesgo** se fija

en **15 años**: es el período durante el cual se asume que el beneficio anual evitado B estimado en el modelo paramétrico se mantiene constante, sin proyectar cambios en el régimen sancionatorio, en la intensidad de fiscalización ni en la exposición hidrológica de las faenas. La cifra corresponde al punto intermedio del rango de 10 a 20 años identificado en el Marco Teórico y al límite superior del rango de vida útil reportado para sistemas IoT (7 a 15 años según la tecnología); extender la proyección más allá supondría sostener la estabilidad de un marco regulatorio que, como documenta la Sección 3.3.1, ha cambiado tres veces en los últimos ocho años. El **horizonte de evaluación de cada alternativa**, en cambio, es la vida útil propia de cada arquitectura, y no un horizonte común: comparar los flujos de arquitecturas con vidas útiles distintas sobre un mismo período exigiría suponer un costo de reemplazo del equipamiento al término de la vida útil más corta, supuesto para el cual no se dispone de evidencia. Se opta, en su lugar, por evaluar cada alternativa sobre su propia vida útil y homologar los resultados mediante el valor anual equivalente, procedimiento que Boardman et al. (2018) recomiendan precisamente para este caso. Esta distinción atiende a la recomendación de O'Mahony (2021) de tratar la definición del horizonte como una decisión de primer orden y no como un residuo del cálculo. La tasa de descuento se fija en **9 %**, punto medio del rango de 6 % a 12 % recomendado por Boardman et al. (2018) para tecnologías de cumplimiento ambiental, y es consistente con estimaciones de costo de capital mediante CAPM para sectores productivos chilenos privados y expuestos a riesgo regulatorio-ambiental: 8,9 % real anual para el sector vitivinícola chileno, estimado por Morán (2007) mediante CAPM y reportado en Lobos y Viviani (2008). La incertidumbre de los resultados se expresa en percentiles 5, 50 y 95 del Valor Actual Neto, siguiendo la metodología de Sköld et al. (2022). Los indicadores de salida son el Valor Actual Neto, la Tasa Interna de Retorno y el período de recuperación de la inversión, homologados mediante criterios de valor anual equivalente cuando las vidas útiles de las arquitecturas comparadas no son equivalentes (Boardman et al., 2018).

Limitaciones del análisis costo-beneficio. La aplicación de este marco metodológico presenta limitaciones que deben declararse explícitamente. En primer lugar, la vida útil asignada a cada arquitectura en la calibración numérica (10 años para LoRaWAN, 8 años para NB-IoT/LTE-M y 12 años para SCADA satelital) constituye un supuesto razonado por analogía tecnológica (los módulos celulares quedan sujetos a los ciclos de renovación de la red del operador, mientras que el hardware satelital de grado industrial exhibe mayor robustez) y no una cifra reportada por un fabricante o estudio específico. Por esta razón, el ordenamiento entre arquitecturas se somete al análisis de sensibilidad de la Sección 5.5, que evalúa explícitamente con-

figuraciones con vidas útiles iguales, invertidas y en los extremos del rango declarado; los resultados allí presentados muestran que el ordenamiento no depende de este supuesto, pero el margen entre las dos primeras alternativas sí lo hace y debe interpretarse en consecuencia. En segundo lugar, el beneficio anual evitado se asume equivalente para las tres arquitecturas, sin diferenciar su efectividad relativa en la reducción del riesgo regulatorio; esta simplificación es consistente con la ausencia de evidencia empírica que permita calibrar cuantitativamente dicha diferencia, pero no es plenamente coherente con la caracterización cualitativa de la Figura 5, donde se documenta que las Arquitecturas A y B presentan mayor riesgo de incumplimiento del reporte continuo por falla de conectividad frente a la cobertura universal de la Arquitectura C. En tercer lugar, algunos componentes de costo, la instalación en terreno y la calibración periódica de instrumentos, no cuentan con una cifra pública específica para el contexto minero chileno, por lo que se estimaron mediante supuestos genéricos idénticos para las tres arquitecturas, y no se identificó en la literatura revisada un estudio que compare cuantitativamente el costo de estas tecnologías para el monitoreo hídrico subterráneo en minería, lo que impide contrastar los resultados obtenidos contra un referente externo. Finalmente, la incertidumbre del beneficio se aproximó mediante una distribución triangular a partir de los percentiles 5, 50 y 95 del modelo paramétrico de riesgo, y los resultados se expresan por punto de monitoreo genérico, sin escalar al número real de puntos de monitoreo por faena, dato que no se encuentra disponible públicamente para los tres casos de estudio.

5 Resultados

Esta sección presenta los resultados obtenidos al aplicar el procedimiento descrito en la Metodología a los tres casos de estudio. Se organiza en seis subsecciones. Las cuatro primeras corresponden, en el mismo orden, a los cuatro objetivos específicos de la investigación: los resultados del análisis normativo (OE1), de la taxonomía de fallas aplicada (OE2), del modelo paramétrico de riesgo (OE3) y del análisis costo-beneficio de arquitecturas IoT (OE4). Las dos últimas evalúan la robustez de esos resultados ante variaciones en los parámetros críticos y articulan los cuatro en el framework de apoyo a la decisión que constituye el objetivo general. Antes de presentar los resultados, cabe advertir que la evidencia pública disponible no es simétrica entre los tres casos: División Andina y Los Bronces cuentan con antecedentes de fiscalización específicos y verificables directamente vinculados al monitoreo hídrico, mientras que El Teniente no registra evidencia caso-específica equivalente. Esta asimetría se reporta explícitamente en cada subsección, en lugar de forzar una simetría artificial entre los tres casos que la evidencia no respalda.

5.1 Resultados del análisis normativo

La aplicación del procedimiento descrito en la Sección 4.3.1 a los tres casos de estudio permitió construir la matriz de cumplimiento que sintetiza el Cuadro 2: para cada caso, los procedimientos de fiscalización activos o recientes registrados en el SNIFA, su vínculo directo o indirecto con el monitoreo hídrico, y su correspondencia con el régimen de infracciones del artículo 173 ter del Código de Aguas cuando esa correspondencia pudo establecerse con la evidencia pública disponible.

Cuadro 2. *Matriz de cumplimiento normativo por caso de estudio (SNIFA, ago-2026).*

Caso	Ficha SNIFA	Procedimientos y sanciones	Vínculo con monitoreo hídrico	Grado art. 173 ter
División Andina	212	Multa DGA sept-2023 (5.166,7 UTM) por extracción no autorizada y falta de medios de medición de caudal en 3 bocatomas; SMA D-083-2020 (11 cargos, reportes de calidad de agua incompletos 2015–2019, suspendido desde feb-2021)	Directo: ausencia de instrumentación y reportes incompletos	No verificable ¹
Los Bronces	229	SMA D-305-2024, cargo 4 de 4 (leve, en curso): no transmitir oportunamente los datos de monitoreo hídrico exigidos por la RE 31/2022; multas DGA por extracción no autorizada desde el estero Riecillos (sept-2023 y ago-2025); antecedente F-054/059-2014 (sancionado 2015, mismo problema de drenaje ácido)	Directo: cargo 4 corresponde exactamente a incumplimiento de transmisión de datos	Leve (cargo 4)
El Teniente	2208	SMA F-090-2024 (leve, programa de cumplimiento en ejecución desde abr-2025): no implementar conexión en línea ni servidor de históricos en la Fundición Caletones	Indirecto: el cargo es sobre monitoreo de emisiones de fundición, no sobre recursos hídricos	Leve (no hídrico)

¹ El monto de la multa a División Andina (5.166,7 UTM) excede el tope de 500 UTM del régimen de tres grados vigente antes de 2022, lo que sugiere la aplicación del régimen de cinco grados de la Ley N.º 21.435, pero ninguna fuente pública (prensa ni ficha SNIFA) cita el número de resolución exenta ni el grado exacto asignado. *Nota.* Elaboración propia a partir de fichas SNIFA 212, 229 y 2208, comunicados de la Dirección General de Aguas y prensa especializada citada en la Sección 3.3.2.

Fichas SNIFA consultadas al 16-08-2026.

La matriz revela una asimetría estructural en la exposición normativa de los tres casos que resulta relevante para las subsecciones siguientes. División Andina y Los Bronces registran, cada una, al menos un procedimiento cuyo objeto es directamente la calidad o la oportunidad del monitoreo hídrico (la ausencia física de instrumentación en el primer caso, la transmisión tardía de datos ya medidos en el segundo), mientras

que el único procedimiento vigente de El Teniente con contenido verificado corresponde a monitoreo de emisiones de una fundición, no a recursos hídricos. Esta diferencia no permite concluir que El Teniente presente un desempeño de monitoreo hídrico superior a los otros dos casos: como se discute en la Sección 5.2, la ausencia de evidencia pública es, en sí misma, una observación que admite más de una explicación. Adicionalmente, el grado de infracción exacto del artículo 173 ter no pudo determinarse con la evidencia pública disponible para la multa de mayor cuantía del conjunto (División Andina), una limitación que se traslada directamente a la calibración del modelo paramétrico de riesgo de la Sección 5.3.

Respecto del primer elemento que la matriz debía registrar (la categoría de exigencia asignada por la Resolución Exenta N.º 1.238 según el volumen de extracción autorizado), no fue posible determinarla de forma verificable para ninguno de los tres casos: la resolución clasifica a los titulares en cuatro categorías a partir del caudal autorizado en sus derechos de aprovechamiento, y esos caudales no se encuentran publicados de manera consolidada por faena. Por la escala productiva de las tres operaciones documentada en la Sección 3.2, es razonable presumir que las tres se ubican en la categoría de mayor exigencia, sujetas por tanto a monitoreo de caudal, volumen acumulado y nivel freático con transmisión continua al SINA; pero se trata de una presunción por escala y no de un dato verificado, por lo que no se incorpora como columna de la matriz ni se emplea para diferenciar los casos en el modelo de riesgo. Esta imposibilidad es, en sí misma, un hallazgo sobre la opacidad del régimen: la categoría de exigencia determina obligaciones técnicas y plazos legalmente vinculantes, y no es públicamente verificable para un tercero.

El contraste con los dos referentes internacionales adoptados como marco de comparación arroja dos diferencias sustantivas. En cuanto al diseño de la obligación, WaterNSW exige que los programas de monitoreo de actividades mineras subterráneas incluyan puntos de muestreo aguas arriba y aguas abajo de cada operación, con transmisión continua como condición de validez regulatoria (WaterNSW, 2026); la Resolución Exenta N.º 1.238, en cambio, centra la obligación en el punto de captación, midiendo lo que el titular extrae pero no el estado del cuerpo de agua que lo circunda. La consecuencia es que el régimen chileno permite verificar el cumplimiento del derecho de aprovechamiento, pero no contrastar de forma independiente el efecto de la extracción sobre el acuífero. En cuanto al mecanismo de verificación, Office of the Auditor General of Western Australia (2022) documentan que la verificación independiente mediante sensores remotos elevó la tasa de detección de incumplimientos declarados incorrectamente sin aumentar la dotación de fiscalizadores en terreno; el sistema chileno continúa descansando de manera predominante en información autorreportada, y el convenio suscrito en 2025 entre la Dirección General de Aguas y la

Superintendencia del Medio Ambiente para incorporar teledetección (Superintendencia del Medio Ambiente, 2025) constituye el primer movimiento en esa dirección, aún sin resultados evaluables. Ambas diferencias son coherentes con la asimetría de información desarrollada en el Marco Teórico y refuerzan por qué la calidad del dato autorreportado concentra el riesgo regulatorio en el caso chileno.

5.2 Resultados de la taxonomía de fallas aplicada

La aplicación del marco de clasificación descrito en la Sección 4.3.2 (capa tecnológica, dimensión de calidad de datos de Wang et al. (2024) y tipo de error de Teh et al. (2020)) a la evidencia normativa sistematizada en el Cuadro 2 permitió clasificar la falla dominante de cada caso, cuando existió evidencia caso-específica para hacerlo. El Cuadro 3 presenta esta clasificación.

Cuadro 3. *Clasificación de fallas de monitoreo por caso, según la taxonomía de la Sección 4.3.2.*

Caso	Capa	Dimensión (Wang, 2024)	Tipo de error (Teh et al., 2020) y evidencia	Probabilidad anual estimada
División Andina	Hardware	Complejidad	Datos faltantes en su forma más extrema: ausencia total de instrumento en 3 bocatomas, no una lectura errónea sino la inexistencia del dato	0,55–0,85
Los Bronces	Conectividad / software	Actualidad	Análogo al patrón de datos rezagados de la literatura: el dato puede haberse medido correctamente, pero no llegó a tiempo al regulador (cargo 4 de D-305-2024)	0,30–0,60
El Teniente	Sin evidencia caso-específica	Sin evidencia caso-específica	Se calibra con tasas de falla de la literatura general (American Water Works Association, 2021; Barrientos et al., 2023) en lugar de evidencia propia	0,05–0,25

Nota. Elaboración propia a partir del Cuadro 2 y de la taxonomía conceptual de la Sección 4.3.2. La *probabilidad anual estimada* corresponde al parámetro p_0^{mon} de la Ecuación 4, expresado como rango uniforme y estimado combinando la frecuencia relativa de cada tipo de error en la revisión de 57 publicaciones de Teh et al. (2020) (donde los datos faltantes son el segundo tipo más frecuente, presente en 16 de las 57) con la severidad de la evidencia de fiscalización de cada caso; constituye el producto cuantitativo de OE2 y el insumo directo del modelo de la Sección 5.3, donde se documenta junto al resto de los parámetros (Cuadro 4). Se excluyen de esta clasificación los cargos de la matriz de cumplimiento cuyo objeto no es una falla de calidad de datos, por ejemplo, los cargos 1–3 de D-305-2024, de naturaleza ambiental-operacional (drenaje ácido, control de infiltraciones), o las multas por extracción no autorizada del estero Riecillos, donde la propia DGA utilizó los registros autorreportados de la empresa como prueba, lo que confirma que el dato existía, era correcto y era trazable.

El contraste entre División Andina y Los Bronces es, para efectos de esta investigación, el hallazgo más informativo del Cuadro 3: ambos casos fueron fiscalizados por fallas de monitoreo hídrico, pero por mecanismos distintos que exigen mitigaciones tecnológicas distintas. Andina requiere primero cerrar una brecha de *hardware* (instrumentación físicamente ausente), mientras que Los Bronces requiere mejorar la *conectividad* y la *latencia de transmisión* de un sistema que, en apariencia, ya mide correctamente. El Teniente, en cambio, no presenta evidencia pública caso-específica de falla de monitoreo hídrico. Esta ausencia de evidencia es en sí misma un resultado, no un vacío que deba ocultarse: puede reflejar, alternativamente, (a) un desempeño de monitoreo efectivamente superior, (b) una intensidad de fiscalización de la DGA relativamente

menor sobre esa división en el período analizado, o (c) el fenómeno de *ilusión de cumplimiento* que describe Miasayedava et al. (2020), en el que un sistema de monitoreo continuo genera la apariencia de cumplimiento sin capacidad analítica para detectar una deriva gradual del instrumento. La evidencia pública disponible no permite distinguir empíricamente entre estas tres hipótesis, por lo que la calibración de El Teniente en la subsección siguiente recurre a tasas de falla de la literatura general en lugar de evidencia propia, y esta asimetría de evidencia entre los tres casos se retoma explícitamente como limitación del estudio.

Conviene además hacer explícita una asimetría de la propia taxonomía. El marco conceptual de la Sección 4.3.2 distingue tres capas (hardware, conectividad y software/analítica), pero la evidencia de fiscalización disponible solo puebla las dos primeras: la falla de División Andina es de hardware y la de Los Bronces de conectividad, mientras que **ningún caso presenta evidencia documentada de falla en la capa analítica**. Esto no significa que esa capa sea irrelevante, sino que su falla característica es, por construcción, la menos observable de las tres: la *ilusión de cumplimiento* que describe Miasayedava et al. (2020) consiste precisamente en un sistema que transmite datos de forma completa y oportuna, y que por tanto no genera ningún incumplimiento detectable de reporte, mientras sus valores se apartan progresivamente de la realidad física. Una falla de hardware deja el dato ausente y una de conectividad lo deja atrasado, y ambas son verificables por el regulador; una falla analítica deja el dato presente, puntual y equivocado. La consecuencia metodológica es que la ausencia de casos en esta capa debe atribuirse al mecanismo de detección y no a la ausencia del fenómeno, y que la exposición estimada en la subsección siguiente, al calibrarse sobre evidencia de fiscalización, probablemente subestima el riesgo asociado a esta tercera capa.

5.3 Resultados del modelo paramétrico de riesgo

El modelo descrito en la Sección 4.3.3 (Ecuaciones 2, 4 y 5) se calibró para los tres casos de estudio combinando la matriz de cumplimiento del Cuadro 2 y la taxonomía de fallas aplicada del Cuadro 3, mediante una simulación de Monte Carlo de 20.000 iteraciones por caso (semilla fija de reproducibilidad), siguiendo el esquema de distribuciones no informativas declarado en la Metodología. Los resultados se expresan por punto de monitoreo genérico ($Q_{aut} = 100$, unidad de referencia consistente con el ejemplo numérico ilustrativo de la Sección 4.3.3), dado que no existen caudales autorizados públicos por caso que permitan escalar el resultado a nivel de faena completa. El Cuadro 4 documenta los parámetros empleados en la calibración, de modo que el resultado sea reproducible y auditable; el Cuadro 5 presenta la mediana y el rango de percentiles 5–95 de la exposición a riesgo total (Ecuación 5) para el escenario base ($s = 0$) y el escenario posterior a la

inversión en IoT ($s = 1$), junto con el beneficio anual evitado B (Ecuación 3).

Cuadro 4. *Parámetros de calibración del modelo paramétrico de riesgo.*

Parámetro	Valor	Origen
<i>Comunes a los tres casos</i>		
p_{detect}	0,411	928 multas sobre 2.256 fiscalizaciones resueltas en 2024 (Dirección General de Aguas, 2025)
$p_{ext,0} / p_{ext,1}$	0,30 / 0,12	Ejemplo ilustrativo, Sección 4.3.3
k	1,64	Contraste unilateral al 95 % (Eurachem/CITAC, 2021)
ϕ_s	mín(0,95; $3u_s$)	Relación supuesta, calibrada para reproducir el ejemplo ilustrativo ($u = 0,10 \Rightarrow \phi = 0,30$); el tope de 0,95 impide que la totalidad de las infracciones resulte no concluyente
ω por tramo (El Teniente)	0,50 / 0,40 / 0,10	Ejemplo ilustrativo, Sección 4.3.3; sin evidencia caso-específica que permita ajustarlo
ω^{mon} leve/grave	0,40 / 0,60	Grados que el art. 173 ter asocia a fallas de instalación, mantenimiento y transmisión
M_g por tramo	30 / 275,5 / 1.250,5 UTM	Puntos medios de los tres tramos de agrupación del art. 173 ter (Sección 4.3.3)
<i>Diferenciados por caso</i>		
u_0 Andina	Mezcla: 66 % U(0,15–0,30); 34 % U(0,05–0,15)	Déficit de instrumentación confirmado; ponderación según validaciones de terreno de Barrientos et al. (2023) sobre el rango nominal de American Water Works Association (2021)
u_0 Bronces y Teniente	U(0,05–0,15)	Rango nominal sin ajuste (American Water Works Association, 2021)
u_1	U(0,02–0,05)	Instrumentación calibrada bajo contrato de servicio
ω por tramo Andina	0,40 / 0,35 / 0,25	Ajuste moderado hacia <i>muy grave</i> ² (Fundación Terram, 2023)
ω por tramo Los Bronces	0,30 / 0,30 / 0,40	Ajuste fuerte hacia <i>muy grave</i> ³ (Dirección General de Aguas, Región de Valparaíso, 2025)
p_0^{mon} Andina	U(0,55–0,85)	Déficit sistémico en tres bocatomas
p_0^{mon} Los Bronces	U(0,30–0,60)	Un cargo vigente, de grado leve
p_0^{mon} El Teniente	U(0,05–0,25)	Valor de referencia; sin evidencia caso-específica
p_1^{mon}	U(0,02–0,08)	Reducción uniforme por contrato de servicio

² Mezcla la causal de extracción no autorizada con la de falta de medios de medición (Cuadro 2), por lo que no se atribuye limpiamente a este canal. ³ Multa base de 700,6 UTM por bocatoma, sin mezcla de causales, dos eventos documentados. *Nota.* Elaboración propia. U(a – b) denota distribución uniforme continua en el intervalo. La simulación usa semilla 2026 y 20.000 iteraciones por caso, fijadas para reproducibilidad. Los parámetros diferenciados por caso se calibran a partir de la evidencia sistematizada en los Cuadros 2 y 3. $p_{ext,s}$ se mantiene común a los tres casos por falta de evidencia que permita diferenciarlo; ω sí se diferencia por caso, según se detalla en las notas 2 y 3 y en `risk_model.py`.

Cuadro 5. Exposición a riesgo regulatorio y económico esperado, por caso de estudio (UTM/año por punto de monitoreo genérico; mediana y percentiles 5–95).

Caso	$E[R_0]^{total}$	$E[R_0]^{total}$ (canal monitoreo)	$E[R_1]^{total}$	B (beneficio)
División Andina	147,4 (116,7–179,3)	124,2 (100,2–148,0)	27,4 (22,6–32,3)	120,0 (94,1–147,0)
Los Bronces	130,8 (104,1–157,8)	79,6 (55,8–103,8)	35,0 (30,1–40,0)	95,7 (74,1–117,8)
El Teniente	48,1 (31,7–65,0)	26,5 (10,6–42,6)	19,9 (15,2–24,7)	28,2 (16,5–40,4)

Nota. Elaboración propia. $E[R_0]^{total}$ y $E[R_1]^{total}$: Ecuación 5. Columna *canal monitoreo*: componente de $E[R_0]^{total}$

atribuible a la Ecuación 4 (incumplimiento de obligaciones de monitoreo), no descontado por *guard band*. B:

Ecuación 3, redefinida en términos de $E[R_s]^{total}$. Simulación de 20.000 iteraciones por caso.

Antes de leer el cuadro conviene advertir una propiedad del modelo que resulta contraintuitiva a primera vista. En el canal de extracción tomado por separado (Ecuación 2), Los Bronces obtiene la mayor exposición de los tres casos (51,2 UTM), muy por encima de Andina (22,7) y de El Teniente (21,7), pese a ser el caso con el *mejor* instrumental documentado de los tres (rango nominal AWWA sin evidencia de déficit de hardware). El resultado se sigue de la lógica del *guard band* combinada con la calibración diferenciada de ω (Cuadro 4): una menor incertidumbre de medición angosta la zona de resguardo, de modo que la severidad de la infracción, cuando existe evidencia limpia de que es de tramo *muy grave* como en Los Bronces, se traslada casi por completo a la exposición esperada. División Andina, en cambio, combina una severidad moderadamente mayor que la del ejemplo ilustrativo (evidencia mezclada entre la causal de extracción y la de falta de medios de medición, Cuadro 2) con un *guard band* mucho más ancho por su déficit de instrumentación confirmado en tres bocatomas; el segundo efecto compensa casi por completo al primero, y el resultado neto es una exposición de extracción similar a la de El Teniente, calibrada enteramente con literatura general y sin ajuste de severidad. Lo que el factor $(1 - \phi_s)$ descuenta no es riesgo real sino *capacidad probatoria*: un instrumento malo protege al titular frente a una imputación por sobreextracción, porque vuelve la evidencia inconcluyente, aun cuando la severidad legal de esa infracción, de detectarse, sea alta. Esta propiedad, lejos de contradecir el planteamiento del problema, es la razón por la cual la Ecuación 4 resulta indispensable: el titular que no puede ser sancionado por lo que extrae sí puede serlo, y de forma directa e indiscutible, por no tener instalado o no mantener operativo el sistema de medición. Los dos canales operan en sentidos opuestos sobre la misma causa, y solo su suma describe la exposición efectiva.

Con esa advertencia, cuatro resultados del Cuadro 5 son relevantes para las subsecciones siguientes. Primero, la exposición a riesgo del escenario base ordena a los tres casos exactamente en el mismo orden que la fuerza de su evidencia de fiscalización en el Cuadro 2: División Andina, con el déficit de instrumentación más severo y confirmado en tres bocatomas simultáneas, presenta la mayor exposición; Los Bronces, con un cargo vigente pero de grado leve, una exposición intermedia; y El Teniente, sin evidencia caso-específica, la menor exposición de los tres. Segundo, en los dos casos con evidencia directa de falla de monitoreo (Andina y Los Bronces), el canal de incumplimiento de obligaciones de monitoreo (Ecuación 4) domina sobre el canal de ambigüedad de extracción (Ecuación 2, columna no desglosada en el cuadro): en Andina representa el 84 % de la exposición total y en Los Bronces el 61 %, mientras que en El Teniente, sin evidencia caso-específica, desciende al 55 % (Figura 7), lo que confirma cuantitativamente el argumento metodológico que motivó la extensión del modelo en la Sección 4.3.3: incluso en Los Bronces, cuyo canal de extracción es ahora el más severo de los tres en términos absolutos, el incumplimiento de monitoreo sigue explicando la mayoría de la exposición total. Tercero, el primer indicador comprometido en OE3, la frecuencia esperada de infracciones, se obtiene directamente de los parámetros del Cuadro 4, sumando la frecuencia del canal de extracción ($p_{ext,0} \cdot p_{detect} = 0,12$ infracciones anuales por punto, común a los tres casos) y la del canal de monitoreo (p_0^{mon} , diferenciada por caso): 0,82 infracciones anuales por punto de monitoreo en División Andina, 0,57 en Los Bronces y 0,27 en El Teniente. El segundo indicador comprometido en OE3, el monto de multas acumuladas, corresponde a la exposición monetaria $E[R_s]^{total}$ ya presentada en este mismo Cuadro 5. Tras la inversión en una arquitectura IoT, la frecuencia converge a aproximadamente 0,10 infracciones anuales por punto en los tres casos. Expresada de este modo, la magnitud es más interpretable que la exposición monetaria: bajo el escenario base, un punto de monitoreo de División Andina acumularía del orden de una infracción detectada por año, mientras que uno de El Teniente lo haría aproximadamente una vez cada cuatro años. Cuarto, la exposición del escenario posterior a la inversión ($E[R_1]^{total}$) ya no converge a un valor único en los tres casos, a diferencia de lo que ocurriría si ω fuera común: Andina queda en 27,4 UTM, Los Bronces en 35,0 UTM y El Teniente en 19,9 UTM. La razón es que ω se mantiene igual entre $s = 0$ y $s = 1$ dentro de cada caso, por diseño: la severidad legal de una infracción, si se detecta, es una propiedad del tipo de conducta y del régimen sancionatorio, no de la calidad del instrumento, de modo que una arquitectura IoT reduce la *frecuencia* de infracción y la incertidumbre de medición, pero no cambia a qué tramo pertenecería una infracción si ocurriera. Los Bronces, cuyo canal de extracción es el más severo de los tres incluso descontada la frecuencia reducida de $s = 1$, conserva por ello la mayor exposición residual. El beneficio anual evitado B ,

que constituye el insumo monetario del análisis costo-beneficio de la subsección siguiente, hereda el mismo ordenamiento que la exposición del escenario base: Andina (120,0 UTM), Los Bronces (95,7 UTM) y El Teniente (28,2 UTM).

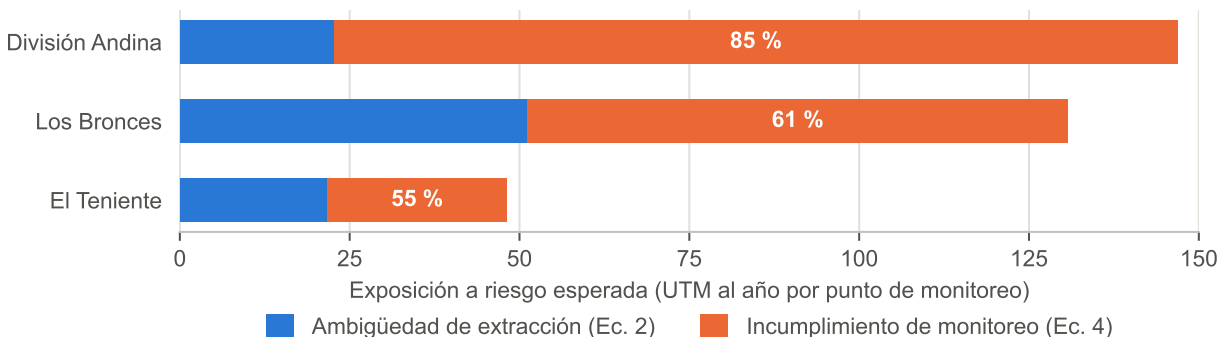


Figura 7. *Composición de la exposición a riesgo del escenario base, por canal de sanción y caso de estudio.* El canal de incumplimiento de monitoreo domina la exposición en los dos casos con evidencia directa de falla, y su participación decrece a medida que se debilita esa evidencia.

Nota. Elaboración propia a partir del Cuadro 5. Los valores corresponden a la mediana de cada canal, expresada en UTM al año por punto de monitoreo genérico. El porcentaje rotulado sobre cada barra indica la participación del canal de incumplimiento de monitoreo (Ecuación 4) en la exposición total. Las medianas de ambos canales no suman exactamente la mediana del total del Cuadro 5, porque la mediana no es un operador aditivo sobre variables aleatorias.

Impacto sobre el EBITDA operacional. El tercer indicador comprometido en OE3 requiere expresar la exposición estimada como fracción del resultado operacional de cada faena, lo que enfrenta una restricción de disponibilidad de datos que debe declararse antes de presentar las cifras. De las tres operaciones estudiadas, solo Los Bronces cuenta con un EBITDA publicado a nivel de faena: Anglo American plc (2026) desglosa el resultado por operación, reportando un EBITDA subyacente de US\$585 millones para el primer semestre de 2026 sobre base 100 %. Codelco, en cambio, publica producción por división pero no resultados por segmento, por lo que Andina y El Teniente solo pueden evaluarse contra el resultado de la corporación completa, que en 2025 alcanzó US\$6.670 millones (Codelco, 2026) y suma seis divisiones. La diferencia entre ambas mediciones no es menor: al dividir la exposición de una faena por el resultado de toda la corporación, el porcentaje obtenido es mucho menor que el que correspondería a la división aislada, en una proporción que no puede determinarse porque el denominador divisional no es público. Los porcentajes de una y otra empresa miden, en consecuencia, cosas distintas: el de Los Bronces expresa el impacto sobre la faena, mientras que los de Codelco constituyen una cota inferior de ese impacto. El Cuadro 6 presenta el resultado bajo esta

advertencia.

Cuadro 6. *Exposición a riesgo regulatorio frente al EBITDA operacional, por canal de sanción.*

Caso	EBITDA de referencia	Multas: % EBITDA por punto de monit.	Puntos para alcanzar 1 % del EBITDA	Paralización: razón vs. multas de un punto
División Andina	US\$6.670 MM (consolidado Codelco, 2025)	0,00017 %	5.768	11.500–46.100×
Los Bronces	US\$1.170 MM (faena, H1 2026 anualizado)	0,00088 %	1.141	2.300–9.100×
El Teniente	US\$6.670 MM (consolidado Codelco, 2025)	0,00006 %	17.674	35.300–141.400×

Nota. Elaboración propia a partir del Cuadro 5, Codelco (2026) y Anglo American plc (2026). Tipo de cambio de referencia 1 USD $\approx$ 913,6 CLP (agosto de 2026). Canal *multas*: exposición de la Ecuación 5. Canal *paralización*: rango de 2 % a 8 % del EBITDA anual estimado por Oliveros-Sepúlveda et al. (2025) para la paralización de faenas de una operación minera mediana, sanción accesoria que el artículo 173 ter contempla para casos de reincidencia. El EBITDA de Los Bronces se anualiza multiplicando el semestre por dos, supuesto declarado.

El resultado más relevante del Cuadro 6 es una asimetría de tres a cinco órdenes de magnitud entre los dos canales de sanción. La exposición por multas de un punto de monitoreo representa una fracción despreciable del EBITDA en los tres casos, del orden de una diezmilésima de punto porcentual, y se requerirían entre 1.141 y 17.674 puntos de monitoreo para que esa exposición alcanzara el 1 % del resultado operacional de referencia, una cifra que excede con holgura cualquier configuración plausible de instrumentación en una faena. La paralización de faenas, en cambio, se sitúa entre 2.300 y 141.400 veces la exposición por multas de un punto.

Esta asimetría tiene dos implicancias. La primera es interpretativa: en términos estrictamente financieros, la multa no es el mecanismo que disciplina el comportamiento de una gran operación minera, sino las sanciones accesorias que el artículo 173 ter habilita en caso de reincidencia (la paralización de faenas y, en el extremo, la caducidad del derecho de aprovechamiento, que equivale a la pérdida del activo hídrico). Este hallazgo es consistente con el argumento de Gray y Shimshack (2011) de que la disuasión regulatoria

no depende de la severidad nominal de la sanción sino de la probabilidad de detección y de la consecuencia efectiva, y explica por qué el endurecimiento de la Ley N.º 21.435 operó tanto sobre las sanciones accesorias como sobre los montos.

Una aparente contradicción que conviene despejar. Los resultados de esta subsección y los de la siguiente admiten una lectura contradictoria si se comparan sin atender a sus denominadores, de modo que conviene resolverla de forma explícita. Aquí se concluye que la exposición por multas es económicamente marginal, del orden de una diezmilésima de punto porcentual del EBITDA. En la Sección 5.4 se concluirá que la inversión en monitoreo presenta Valor Actual Neto positivo y períodos de recuperación inferiores a un año. La pregunta que surge es cómo una exposición irrelevante puede justificar una inversión altamente rentable.

Ambas afirmaciones son verdaderas al mismo tiempo porque miden la misma magnitud contra referencias distintas. Frente al resultado operacional de una faena que produce cientos de miles de toneladas de cobre al año, una multa de algunos millones de pesos es un error de redondeo. Frente al costo de instalar y mantener un caudalímetro con transmisión continua, esa misma multa equivale a varias veces la inversión. Ninguna de las dos comparaciones es incorrecta, porque responden a preguntas distintas. La primera pregunta si el riesgo regulatorio hídrico amenaza la viabilidad financiera de la operación, y la respuesta es que no. La segunda pregunta si conviene destinar dos millones de pesos a evitar una exposición de varios millones anuales, y la respuesta es que sí.

La consecuencia para el argumento de esta investigación es que la justificación económica del monitoreo no puede construirse sobre la materialidad de la multa, porque la multa no es material a escala de faena. Se construye sobre dos elementos distintos: el costo trivial de la prevención frente al costo de la sanción, y la reducción de la probabilidad de escalar hacia la reincidencia, situación en la que el artículo 173 ter habilita la paralización de faenas y la caducidad del derecho de aprovechamiento. Esas sanciones accesorias sí son materiales, entre un 2 % y un 8 % del EBITDA anual la primera y la pérdida completa del activo hídrico la segunda, y constituyen el objeto real de la cobertura que la inversión provee.

5.4 Resultados del análisis costo-beneficio de arquitecturas IoT

El análisis costo-beneficio descrito en la Sección 4.3.4 se aplicó a las tres arquitecturas IoT (A: LoRaWAN privada; B: NB-IoT/LTE-M; C: SCADA satelital) en los tres casos de estudio, utilizando el beneficio *B* del Cuadro 5 como beneficio anual esperado (común a las tres arquitecturas, dado que el modelo

de riesgo no diferencia su efectividad relativa) y los costos de inversión y operación investigados para cada arquitectura. El Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el período de recuperación se calcularon sobre la vida útil propia de cada arquitectura (10, 8 y 12 años para A, B y C, respectivamente), homologando los resultados entre arquitecturas de vida distinta mediante el Valor Anual Equivalente (EAV), conforme al criterio metodológico de Boardman et al. (2018) ya señalado en la Sección 4.3.4. El Cuadro 7 documenta los costos empleados como entrada, y el Cuadro 8 presenta la mediana de cada indicador, expresada en millones de pesos chilenos (MM CLP) por punto de monitoreo genérico.

Cuadro 7. *Costos de inversión y operación por punto de monitoreo, por arquitectura (USD).*

Componente	A (LoRaWAN)	B (NB-IoT/LTE-M)	C (SCADA satelital)
Sensor de nivel y caudalímetro	1.150–1.300	1.150–1.300	1.150–1.300
Módulo de comunicación	42–111 ¹	900–1.200	300–454
Instalación en terreno	200–500 ²	200–500 ²	200–500 ²
CAPEX total	1.392–1.911	2.250–3.000	1.650–2.254
Conectividad anual	8–30 ¹	80–400	60–191
Calibración anual	50–150 ²	50–150 ²	50–150 ²
OPEX total anual	58–180	130–550	110–341
Vida útil supuesta	10 años	8 años	12 años

¹ El *gateway* LoRaWAN (USD 337–889) y el servidor de red se amortizan entre ocho puntos de monitoreo, supuesto declarado ante la ausencia de una cifra de cobertura efectiva por *gateway* específica para terreno minero cordillerano.

² No se identificó una cifra pública específica para minería chilena; se emplea un supuesto genérico idéntico para las tres arquitecturas, de modo de no introducir una diferencia entre ellas que la evidencia no respalde. *Nota.* Elaboración propia a partir de catálogos de proveedores y de tarifas comerciales públicas de operadores de conectividad, consultados en agosto de 2026. Rangos expresados como mínimo–máximo, muestreados uniformemente en la simulación. Tipo de cambio de referencia 1 USD $\approx$ 913,6 CLP.

Cuadro 8. Resultados del análisis costo-beneficio por arquitectura y caso de estudio (mediana, MM CLP por punto de monitoreo genérico).

Caso	Arq.	VAN	EAV	TIR	Payback
División Andina	A	53,1	8,28	565 %	0,18 años
	B	43,6	7,88	347 %	0,29 años
	C	58,5	8,17	473 %	0,21 años
Los Bronces	A	41,9	6,53	448 %	0,22 años
	B	33,9	6,13	274 %	0,37 años
	C	<i>46,0</i>	6,42	374 %	0,27 años
El Teniente	A	10,8	1,69	127 %	0,78 años
	B	7,1	1,29	71 %	1,39 años
	C	<i>11,3</i>	1,58	103 %	0,97 años

Nota. Elaboración propia. VAN, EAV: millones de pesos chilenos (tasa de descuento 9 %). TIR: tasa interna de retorno

anual. Payback: período de recuperación simple, en años. **Negrita:** mayor EAV del caso, indicador válido para comparar arquitecturas de vida útil distinta. *Cursiva:* mayor VAN del caso, que no es comparable entre arquitecturas de vida distinta (ver interpretación). Simulación de 20.000 iteraciones por combinación arquitectura-caso; rangos de percentiles 5–95 disponibles en el material complementario.

Tres resultados del Cuadro 8 requieren interpretación cuidadosa. Primero, las tres arquitecturas resultan económicamente rentables en los tres casos, con VAN positivo, TIR de decenas a cientos por ciento y período de recuperación inferior a un año en División Andina y Los Bronces. Esto no constituye un error de cálculo, pero su origen debe precisarse para no sobreinterpretarlo. El beneficio anual evitado (entre 2,0 y 8,6 millones de pesos según el caso) es del mismo orden de magnitud que el costo de inversión (entre 1,3 y 2,7 millones de pesos según la arquitectura): la razón entre ambos va de 0,84 a 5,70 veces, de modo que en el escenario menos favorable (El Teniente con la Arquitectura B) el beneficio de un solo año no alcanza siquiera a cubrir la inversión inicial. Lo que produce el VAN elevado no es una brecha de órdenes de magnitud en un año, sino la acumulación descontada de ese beneficio a lo largo de los 8 a 12 años de vida útil del sistema, frente a una inversión que se desembolsa una sola vez y a un costo operativo anual que representa una fracción menor del beneficio. El patrón es coherente con lo documentado en la literatura para tecnologías de cumplimiento ambiental (Gray y Shimshack, 2011).

Segundo, y de manera central para responder OE4, **el VAN y el EAV entregan ordenamientos**

distintos, y solo el segundo es válido aquí. Por VAN, la Arquitectura C (SCADA satelital) aparece primera en los tres casos; por EAV, la primera es la Arquitectura A (LoRaWAN privada), también en los tres casos. La divergencia no es un artefacto numérico sino la manifestación exacta del problema metodológico que Boardman et al. (2018) advierten y que la Sección 4.3.4 anticipa: el VAN de un proyecto de vida útil más larga acumula más flujos descontados por el solo hecho de durar más, de modo que comparar los VAN de arquitecturas con vidas útiles de 8, 10 y 12 años premia mecánicamente a la de mayor vida útil, con independencia de su eficiencia económica. El EAV corrige precisamente ese sesgo al anualizar cada VAN sobre la vida útil que le corresponde. Aplicando el criterio que la propia metodología fija para vidas no equivalentes, **la Arquitectura A es la alternativa más costo-efectiva en los tres casos de estudio**, seguida de la Arquitectura C y, en último lugar en todos los escenarios, la Arquitectura B.

Tercero, este ordenamiento es coherente con la estructura de costos subyacente: la Arquitectura A combina el menor costo de inversión por punto de monitoreo (el gateway LoRaWAN se amortiza entre varios puntos, mientras que en B y C el módulo de comunicación es unitario) con el menor costo operativo recurrente, al operar en espectro no licenciado y no requerir suscripción a un operador de telecomunicaciones. La Arquitectura B queda última en los tres casos por la combinación inversa: el mayor costo de inversión unitario y el mayor costo de suscripción anual. La robustez de este ordenamiento frente a variaciones en los parámetros críticos se evalúa en la Sección 5.5.

Por qué una evaluación favorable no se traduce automáticamente en inversión. La magnitud de los indicadores obtenidos plantea una objeción legítima, y anticiparla fortalece el argumento en lugar de debilitarlo: si la inversión es tan claramente rentable, cabe preguntarse por qué las operaciones evaluadas no la han realizado ya. La respuesta no está en el cálculo sino en las condiciones bajo las cuales una organización decide, y el propio Cuadro 6 aporta la explicación principal.

Una empresa que evalúa el monitoreo hídrico contra su resultado operacional observa una exposición del orden de una diezmilésima de punto porcentual del EBITDA. Bajo ese criterio, postergar la inversión es una decisión razonable, porque el problema no es material a escala corporativa. El error de esa evaluación no está en la aritmética sino en el denominador y en el momento de la distribución que se observa: la exposición relevante no es la multa esperada sino la cola, donde se sitúan la paralización de faenas y la caducidad del derecho de aprovechamiento. Una organización que atiende al valor esperado y no a la cola concluye correctamente que el riesgo es menor, y precisamente por eso no invierte.

A esa razón se suman tres condiciones organizacionales que la literatura de evaluación de proyectos reconoce como obstáculos habituales para las inversiones de prevención. La primera es que el beneficio de esta inversión es un costo evitado y no un ingreso: no aparece en el estado de resultados, y su éxito consiste en que no ocurra nada, lo que lo vuelve difícil de atribuir y de defender internamente. La segunda es el racionamiento de capital: en una faena de gran minería, un proyecto de dos millones de pesos por punto de monitoreo compite por atención gerencial con proyectos productivos cuyo Valor Actual Neto es mucho mayor en términos absolutos, aunque su rentabilidad relativa sea inferior, de modo que el tamaño absoluto y no la tasa de retorno determina qué alcanza el comité de inversiones. La tercera es la separación entre quien decide y quien enfrenta la consecuencia, dado que el horizonte de una gerencia suele ser más corto que el período en que la exposición acumulada llega a materializarse.

Estas razones no debilitan el resultado del análisis costo-beneficio, sino que delimitan su aporte con precisión. El framework no descubre una oportunidad económica que las empresas hayan omitido por un error de cálculo. Hace explícito un riesgo que la evaluación corporativa habitual no captura, porque lo mide contra el denominador equivocado y en un horizonte más corto que aquel en el que el riesgo se manifiesta. El aporte del instrumento, entonces, no es señalar que conviene invertir, sino cambiar los términos en que la decisión se plantea.

5.5 Análisis de sensibilidad

El Marco Teórico establece, como tercera decisión metodológica del ACB, que el análisis debe incorporar una evaluación de la robustez de los resultados ante variaciones en los parámetros críticos, dado que las probabilidades de infracción son estimaciones paramétricas y no valores ciertos. Esta subsección desarrolla ese análisis sobre el parámetro identificado como más determinante del ordenamiento entre arquitecturas (la vida útil asignada a cada una, que no proviene de una fuente primaria) y sobre los restantes supuestos que podrían alterar la conclusión: la tasa de descuento y los costos de inversión y operación.

Se evaluaron once escenarios por caso de estudio, incluyendo tres configuraciones que igualan la vida útil de las tres arquitecturas (aislando así el efecto del costo puro), una que invierte el ordenamiento de vidas útiles supuesto, dos que llevan las vidas útiles a los extremos del rango de 7 a 15 años declarado en el Marco Teórico, una favoreciendo deliberadamente a la Arquitectura C y otra a la Arquitectura A, dos que sitúan la tasa de descuento en los extremos del rango de 6% a 12% recomendado por Boardman et al. (2018), y dos que estresan los supuestos de costo. El Cuadro 9 presenta los resultados.

Cuadro 9. Análisis de sensibilidad: ordenamiento de arquitecturas por Valor Anual Equivalente.

Escenario	Parámetro variado	EAV A	EAV B	EAV C	Orden (EAV)
Caso base	Vidas 10/8/12; tasa 9 %	8,27	7,90	8,16	A > C > B
Vidas iguales (10 años)	Aísle el efecto del costo	8,27	7,96	8,14	A > C > B
Vidas iguales (8 años)	Aísle el efecto del costo	8,23	7,90	8,09	A > C > B
Vidas iguales (12 años)	Aísle el efecto del costo	8,29	8,00	8,16	A > C > B
Vidas invertidas	Vidas 12/8/10	8,29	7,90	8,14	A > C > B
Extremo favorable a C	Vidas 7/7/15	8,20	7,86	8,19	A > C > B
Extremo favorable a A	Vidas 15/7/7	8,32	7,86	8,06	A > C > B
Tasa de descuento 6 %	Extremo inferior	8,30	7,95	8,20	A > C > B
Tasa de descuento 12 %	Extremo superior	8,24	7,85	8,12	A > C > B
CAPEX $\times 1,5$	Estrés de inversión	8,15	7,68	8,04	A > C > B
OPEX $\times 2$	Estrés de operación	8,16	7,59	7,95	A > C > B

Nota. Elaboración propia. Valores de EAV en millones de pesos chilenos, correspondientes a División Andina; los otros dos casos presentan magnitudes distintas pero **el mismo ordenamiento en los once escenarios**, por lo que se omiten por economía de espacio. Simulación de 5.000 iteraciones por escenario (frente a 20.000 del caso base del Cuadro 8), dado que el objeto de interés es el ordenamiento entre arquitecturas y no el valor puntual de cada indicador; las diferencias de segundo decimal respecto del Cuadro 8 corresponden a esa variación de tamaño muestral.

El resultado es inequívoco: la Arquitectura A presenta el mayor Valor Anual Equivalente en los treinta y tres pares escenario-caso evaluados, sin una sola excepción, y la Arquitectura B queda última en todos ellos. El ordenamiento no depende, por tanto, del supuesto de vida útil que la Sección 4.3.4 identifica como el punto más débil de la calibración: cuando las tres arquitecturas se evalúan con vidas útiles idénticas, la Arquitectura A conserva la primera posición, lo que confirma que su ventaja proviene de su estructura de costos (menor inversión por punto de monitoreo por la amortización del *gateway* entre varios sensores, y

ausencia de costo de suscripción por operar en espectro no licenciado) y no del horizonte temporal que se le asigne.

El escenario más exigente es el que lleva deliberadamente la vida útil de la Arquitectura C al máximo del rango declarado (15 años) y la de la Arquitectura A al mínimo (7 años): incluso allí la Arquitectura A conserva la primera posición, aunque con un margen que se estrecha hasta la práctica paridad (8,20 frente a 8,19 millones de pesos de EAV). Esta es la única configuración en que la conclusión podría revertirse ante una variación adicional de los parámetros, y conviene declararla como tal: la superioridad económica de la Arquitectura A es robusta, pero su magnitud frente a la Arquitectura C es modesta y depende de la vida útil relativa, mientras que su superioridad frente a la Arquitectura B es amplia y estable en todos los escenarios.

Sensibilidad sobre los parámetros del modelo de riesgo. Los escenarios anteriores varían los parámetros del análisis costo-beneficio, pero no los del modelo de riesgo que produce el beneficio B , que son los que presentan el respaldo empírico más heterogéneo: $p_{ext,s}$ proviene del ejemplo ilustrativo y no de evidencia por caso, ϕ_s depende de un factor de calibración, y ω , aunque ya se diferenció por caso a partir de multas de extracción documentadas (Cuadro 4), descansa en apenas una o dos multas conocidas por caso. Conviene precisar por qué estos parámetros requieren un tratamiento distinto: al escalar el beneficio B de forma idéntica para las tres arquitecturas, no pueden alterar el ordenamiento entre ellas (cualquier variación multiplica los tres valores actuales netos por un factor común), de modo que evaluar su efecto sobre el ordenamiento sería trivial. La pregunta con contenido es otra: cuánto tendría que estar sobreestimado el beneficio para que la inversión dejara de ser rentable. El Cuadro 10 responde ambas cuestiones.

Cuadro 10. Sensibilidad del beneficio anual B a los parámetros del modelo de riesgo, y umbral de rentabilidad por arquitectura.

Panel A. Variación de B respecto del escenario base

Escenario	Andina	Los Bronces	El Teniente
$p_{ext,0}$ bajo (0,15)	-9,8 %	-26,8 %	-38,2 %
$p_{ext,0}$ alto (0,45)	+9,4 %	+26,7 %	+37,9 %
ω benigna	-2,7 %	-19,7 %	-15,1 %
ω severa	+0,5 %	-4,4 %	+36,8 %
ϕ atenuado ($\alpha = 2,0$)	+7,0 %	+6,4 %	+8,8 %
ϕ amplificado ($\alpha = 4,0$)	-6,1 %	-6,4 %	-9,5 %
$p_0^{\text{mon}} - 50\%$	-48,3 %	-36,8 %	-31,2 %
$p_0^{\text{mon}} + 50\%$	+35,9 %	+36,9 %	+30,9 %
Adverso combinado	-55,1 %	-64,0 %	-71,6 %

Panel B. Umbral de rentabilidad: caída de B que tolera cada arquitectura

Arquitectura (B^*)	Andina	Los Bronces	El Teniente
A ($B^* = 4,8$ UTM)	96,0 %	95,0 %	83,0 %
B ($B^* = 10,4$ UTM)	91,3 %	89,1 %	63,1 %
C ($B^* = 6,4$ UTM)	94,7 %	93,4 %	77,4 %

Nota. Elaboración propia. Panel A: variación de la mediana de B al alterar cada parámetro respecto de su valor del

Cuadro 4. *Adverso combinado* sitúa los cuatro parámetros simultáneamente en su valor más desfavorable; no es un escenario probable, pues exige que las cuatro estimaciones estén equivocadas en la misma dirección a la vez, pero constituye la cota inferior del análisis. Panel B: B^* es el beneficio anual que anula el Valor Actual Neto, despejado de $B^* = \text{OPEX} + \text{CAPEX}/\text{FA}(r,n)$, donde FA es el factor de anualidad; los porcentajes indican cuánto puede caer el B estimado de cada caso antes de que la inversión deje de ser rentable. Simulación de 5.000 iteraciones; las diferencias de decimal respecto del Cuadro 5 corresponden a esa variación de tamaño muestral.

Dos lecturas se desprenden del cuadro. La primera es que el parámetro dominante sigue siendo p_0^{mon} , la probabilidad de incumplir las obligaciones de monitoreo, cuya variación de un 50 % mueve el beneficio entre un 31 % y un 48 %. El factor α que gobierna ϕ , heredado en su totalidad del ejemplo ilustrativo, mantiene efectos de un solo dígito porcentual en los tres casos. ω , en cambio, ya no se comporta de manera uniforme entre los dos casos con evidencia directa de falla: en Andina, donde el ajuste por evidencia fue moderado por mezclar dos causales (Cuadro 4), su efecto sigue siendo de un solo dígito (entre -2,7 % y

+0,5 %); en Los Bronces, donde el ajuste fue fuerte por contar con evidencia limpia y específica del canal de extracción, alejar ω hacia el extremo benigno mueve el beneficio en $-19,7\%$. Esto no debilita la calibración sino que es su consecuencia esperable: un parámetro que ahora incorpora evidencia real de fiscalización deja de comportarse como un supuesto de bajo impacto heredado de un ejemplo ilustrativo, y es razonable que su sensibilidad aumente en la misma medida en que aumenta su contenido informativo. El Teniente sigue siendo el caso de mayor sensibilidad a $p_{ext,0}$ y a ω , por la misma razón que antes: al carecer de evidencia caso-específica, su p_0^{mon} es bajo y el canal de extracción pesa relativamente más en su exposición total. La Figura 8 representa esta jerarquía de influencia para los tres casos.

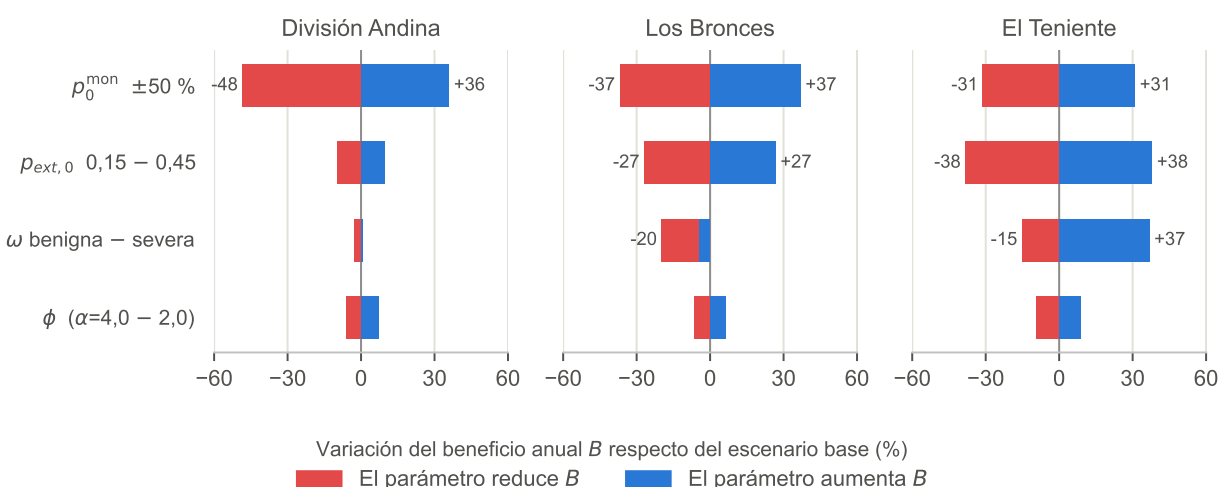


Figura 8. Influencia de cada parámetro del modelo de riesgo sobre el beneficio anual B , por caso de estudio. La longitud de cada barra mide cuánto se desplaza B cuando el parámetro correspondiente se lleva a los extremos de su rango, manteniendo los demás en su valor base.

Nota. Elaboración propia a partir del Panel A del Cuadro 10. Los cuatro parámetros se presentan en el mismo orden en los tres paneles para permitir la comparación entre casos, de modo que la longitud relativa de las barras, y no su posición, indica la jerarquía de influencia dentro de cada caso. Solo se rotulan las variaciones cuya magnitud supera el 10 %. Simulación de 5.000 iteraciones por escenario.

La segunda lectura es que el margen de seguridad es amplio. El beneficio estimado tendría que caer entre un 63 % y un 96 %, según caso y arquitectura, para que la inversión dejara de ser rentable, mientras que la peor variación individual de un solo parámetro la reduce en un 48 %. Sometido al escenario adverso combinado, el resultado se mantiene en **ocho de las nueve combinaciones** de caso y arquitectura. La única excepción es El Teniente con la Arquitectura B, que queda en 8,1 UTM frente a un umbral de 10,4 y arroja por tanto Valor Actual Neto negativo. Esa excepción no debilita la conclusión sino que precisa dónde la

elección de arquitectura tiene consecuencias prácticas: en el caso de menor exposición estimada, y solo si se elige la alternativa que el análisis ya identificaba como la peor de las tres, un escenario adverso simultáneo en los cuatro parámetros podría volver la inversión no rentable. Con la Arquitectura A, ese mismo caso conserva un margen de 1,7 veces sobre el umbral. La Figura 9 sitúa las nueve combinaciones frente a ese umbral, en el escenario base y en el adverso combinado.

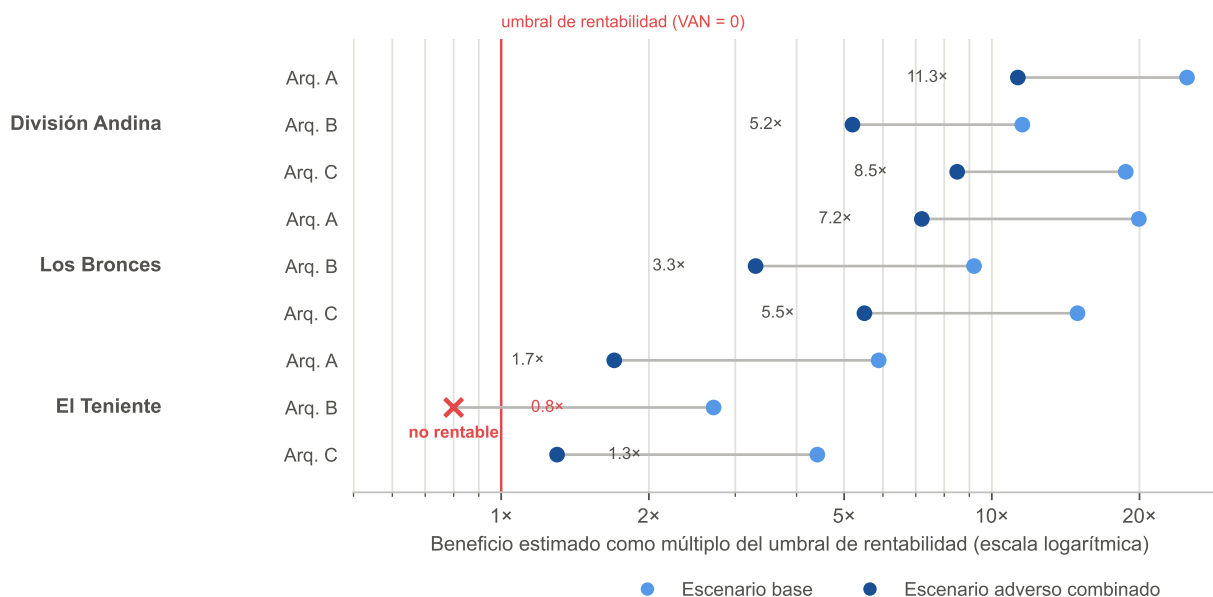


Figura 9. Margen de rentabilidad de cada combinación de caso y arquitectura, en el escenario base y en el adverso combinado. Ocho de las nueve combinaciones se mantienen a la derecha del umbral incluso bajo el escenario adverso combinado.

Nota. Elaboración propia a partir del Cuadro 10. El eje horizontal expresa el beneficio anual estimado como múltiplo del umbral B^* que anula el Valor Actual Neto de cada arquitectura, en escala logarítmica. La línea vertical marca el umbral: a su izquierda la inversión no es rentable. El valor rotulado corresponde al escenario adverso combinado, que es la cota inferior del análisis. La única combinación que cruza el umbral, El Teniente con la Arquitectura B, se señala con una marca y su rótulo.

Cabe subrayar una limitación que este análisis no resuelve: la sensibilidad evaluada es económica, no técnica. El modelo asume que las tres arquitecturas reducen el riesgo regulatorio en igual magnitud, supuesto declarado en la Sección 4.3.4. Si la efectividad difiriera por arquitectura en la dirección que sugiere la caracterización cualitativa de la Figura 5, donde las Arquitecturas A y B presentan mayor riesgo de falla de conectividad que la Arquitectura C, el beneficio de la Arquitectura A sería menor al aquí supuesto y el margen frente a la Arquitectura C podría reducirse o invertirse. La conclusión de esta subsección debe leerse,

en consecuencia, como robusta ante la incertidumbre de costos y horizontes, pero condicionada al supuesto de efectividad equivalente.

5.6 Síntesis: el framework de apoyo a la decisión de inversión

Los resultados de las cuatro primeras subsecciones, sometidos a la prueba de robustez de la anterior, constituyen los componentes del framework que el objetivo general de esta investigación se propone desarrollar. Esta subsección los articula en una secuencia de decisión, que es el producto integrado que el framework aporta por sobre la suma de sus partes.

La secuencia opera en cuatro etapas. La primera es el **diagnóstico normativo**: determinar, mediante la matriz de cumplimiento (Cuadro 2), a qué categoría de exigencia de la Resolución Exenta N.º 1.238 pertenece la operación y qué antecedentes de fiscalización registra. La segunda es la **clasificación de la falla dominante** según la taxonomía (Cuadro 3), que identifica si la brecha se sitúa en la capa de hardware, de conectividad o de analítica; esta clasificación es la que determina qué tipo de inversión ataca la causa raíz, dado que una brecha de instrumentación ausente y una de latencia de transmisión requieren mitigaciones distintas. La tercera es la **cuantificación de la exposición** mediante las Ecuaciones 5 y 3, diferenciando los dos canales de riesgo y contrastando el resultado con el EBITDA operacional (Cuadro 6) para dimensionar su materialidad. La cuarta es la **selección de arquitectura**, que combina el ordenamiento económico establecido en el Cuadro 8 y validado en el Cuadro 9 con un filtro de factibilidad técnica que el criterio económico por sí solo no captura.

Este último punto merece explicitarse, porque es donde el framework integra los resultados cuantitativos con la evidencia cualitativa del Marco Teórico. El análisis costo-beneficio establece que la Arquitectura A es la más costo-efectiva de manera robusta, pero Musonda et al. (2024) documentan que la topografía cordillerana degrada significativamente la confiabilidad de LoRaWAN, y la evidencia de industria indica que la cobertura celular sobre los 3.000 metros de altitud es limitada o inexistente, lo que restringe la aplicabilidad de la Arquitectura B. El criterio de decisión que se desprende no es, por lo tanto, la selección universal de la alternativa de mayor EAV, sino la selección de la alternativa de mayor EAV *entre las técnicamente factibles en el emplazamiento evaluado*: la Arquitectura A donde la topografía permita una cobertura confiable con redundancia de *gateways*; la Arquitectura C donde no la permita, asumiendo un EAV modestamente inferior a cambio de cobertura independiente de infraestructura terrestre. La Arquitectura B no resulta recomendable bajo ninguna de las configuraciones evaluadas, al quedar última en los treinta y tres pares escenario-caso y

depender además de infraestructura de terceros no controlable por la empresa operadora.

Aplicado a los tres casos de estudio, el framework arroja recomendaciones diferenciadas que ilustran su utilidad. Para División Andina, cuya falla dominante es de hardware y cuya exposición es la mayor de las tres, la prioridad es cerrar la brecha de instrumentación antes que optimizar la arquitectura de transmisión: cualquiera de las tres alternativas resulta ampliamente rentable, por lo que el criterio de decisión debiera ser la velocidad de implementación más que el margen económico entre ellas. Para Los Bronces, cuya falla es de conectividad y actualidad sobre un sistema que ya mide correctamente, la decisión sí recae sobre la arquitectura de transmisión y sobre la redundancia necesaria para garantizar la latencia que exige la normativa. Para El Teniente, donde no se identificó evidencia caso-específica de falla, la inversión se justifica de forma preventiva: aun bajo la menor exposición estimada de los tres casos, el período de recuperación de la arquitectura recomendada es inferior a un año (0,78 años para la Arquitectura A). Es también el único caso en que la elección de arquitectura tiene consecuencias prácticas sobre el plazo de recuperación, que se extiende a 1,39 años con la Arquitectura B.

Alcance de los resultados respecto de la mediana minería. El objetivo general y los cuatro objetivos específicos declaran como ámbito de aplicación la gran y *mediana* minería de la zona centro. Los tres casos de estudio, sin embargo, corresponden a operaciones de gran minería, seleccionadas por el criterio de muestreo intencional expuesto en la Sección 4.1: son las únicas de la macrozona que cuentan con antecedentes públicos y verificables de fiscalización hídrica. Los resultados numéricos de esta sección son, en consecuencia, directamente aplicables a la gran minería y transferibles a la mediana minería solo por analogía cualitativa, con dos precisiones sobre la dirección esperada del sesgo. Por el lado de la exposición, Genova Alonso et al. (2022) documentan que la mediana minería presenta brechas tecnológicas más pronunciadas por carecer de sistemas de monitoreo automatizados, lo que sugiere que su frecuencia de falla, y por tanto su exposición por punto de monitoreo, sería *mayor* que la aquí estimada. Por el lado del impacto relativo, el denominador es sustancialmente menor: una multa de magnitud equivalente representa una fracción del resultado operacional mucho mayor en una operación mediana que en las faenas del Cuadro 6, y es precisamente para ese segmento que Oliveros-Sepúlveda et al. (2025) estiman el rango de 2 % a 8 % del EBITDA por paralización. Ambos efectos operan en la misma dirección, por lo que cabe esperar que el caso económico a favor de la inversión en monitoreo sea más favorable en la mediana minería que en los tres casos evaluados, no menos. Verificarlo empíricamente requeriría casos de estudio de ese segmento con antecedentes de fiscalización públicos, que

esta investigación no identificó.

Los resultados presentados en esta sección convergen en una lectura común: la evidencia de fiscalización, la naturaleza técnica de la falla y la magnitud del riesgo económico están alineadas entre sí caso por caso, y la comparación entre arquitecturas IoT confirma que la inversión en monitoreo es económicamente justificable incluso bajo el caso de menor exposición. La discusión de estos resultados a la luz del marco teórico, sus implicancias para la toma de decisiones de inversión y las limitaciones metodológicas que deben acompañar su lectura se desarrollan en la sección siguiente.

6 Discusión

La Sección 5.6 sintetizó los resultados en un framework de cuatro etapas y anunció tres tareas pendientes para completar su interpretación: contrastarlos con el marco teórico, extraer sus implicancias para la toma de decisiones de inversión y de diseño regulatorio, y declarar de forma consolidada las limitaciones metodológicas que deben acompañar su lectura. Esta sección desarrolla esas tres tareas, en ese orden.

6.1 Interpretación de los resultados a la luz del marco teórico

El hallazgo más específico de esta investigación, que un instrumento de peor calidad reduce, en vez de aumentar, la exposición atribuible al canal de ambigüedad de extracción, es una extensión empírica del concepto de *guard band* de Eurachem/CITAC (2021) y de su aplicación al monitoreo hídrico por Brandão et al. (2022). Esos trabajos advierten, en abstracto, que ignorar la incertidumbre de medición introduce una tasa sistemática de falsas conformidades y falsas no conformidades, pero no cuantifican, para un régimen sancionatorio específico, la consecuencia contraintuitiva de que esa misma incertidumbre erosiona la capacidad probatoria del regulador. Los resultados de la Sección 5.3 muestran que ese efecto compensador no es un artefacto de calibración, sino la consecuencia lógica del *guard band* aplicado a evidencia de fiscalización real: donde la severidad legal de una multa conocida es alta pero el instrumento es bueno (Los Bronces), la exposición del canal de extracción se traslada casi íntegra a la exposición esperada; donde la severidad es moderada pero el instrumento es malo (División Andina), el *guard band* absorbe buena parte de esa severidad. Esta propiedad es, en sí misma, la justificación teórica más sólida para la extensión del modelo que esta investigación introduce (Ecuación 4): un marco de riesgo regulatorio construido únicamente sobre el *guard band* de Eurachem/CITAC (2021) subestimaría de forma sistemática el riesgo de los titulares con peor instrumentación, precisamente porque los protege mejor frente a la imputación que menos debería

beneficiarlos desde la perspectiva de la política pública. La Ecuación 4, al sancionar la ausencia o el retraso del sistema de medición sin descuento por incertidumbre, corrige esa asimetría, y explica por qué, en los dos casos con evidencia directa de falla, el canal de monitoreo domina ampliamente sobre el canal de extracción.

La lectura de Gray y Shimshack (2011) que la Sección 5.3 ya aplicó a la asimetría de tres a cinco órdenes de magnitud del Cuadro 6 entre el canal de multas y el canal de paralización se extiende, en el plano del diseño regulatorio, con la evidencia de Chakraborti y Shimshack (2022), quienes muestran que la fiscalización ambiental urbana en México solo genera efectos disuasorios significativos cuando los mecanismos de detección son robustos: el convenio DGA-SMA de 2025 para incorporar teledetección (Superintendencia del Medio Ambiente, 2025) y el precedente de auditoría remota de Office of the Auditor General of Western Australia (2022) en Australia Occidental apuntan en la misma dirección, y esta investigación aporta un primer ejercicio de cuantificación de cuánto podría valer, en términos de riesgo evitado, cerrar esa brecha de detección mediante monitoreo automatizado en el contexto minero chileno.

La taxonomía aplicada (Cuadro 3) operacionalizó las dimensiones de calidad de datos de Wang et al. (2024) y la jerarquía de errores de Teh et al. (2020) sobre evidencia de fiscalización real, y el resultado más informativo no es la clasificación de los dos casos con falla documentada, sino la ausencia total de evidencia en la capa analítica en los tres. Leída a la luz de Miasayedava et al. (2020), esa ausencia no es evidencia de que esa capa funcione mejor, sino evidencia de que su modo de falla característico, la ilusión de cumplimiento, en la que el sistema transmite datos completos y oportunos mientras se aparta silenciosamente de la realidad física, es estructuralmente invisible para un régimen de fiscalización que descansa predominantemente en información autorreportada (Gómez González y Rivera Bravo, 2022). Esto tiene una implicancia directa sobre la lectura de los resultados cuantitativos de esta investigación: el modelo de riesgo, calibrado sobre evidencia de fiscalización, hereda ese punto ciego, y en consecuencia probablemente subestima, no sobrestima, el riesgo regulatorio y económico real de los tres casos.

Finalmente, la divergencia empírica entre el ordenamiento por Valor Actual Neto y por Valor Anual Equivalente documentada en la Sección 5.4 confirma, en un caso aplicado, la advertencia de Boardman et al. (2018) sobre el riesgo de comparar alternativas de vida útil desigual con el criterio equivocado, y la recomendación de O'Mahony (2021) de tratar la definición del horizonte de evaluación como una decisión de primer orden y no como un residuo del cálculo. Que ambos criterios coincidan en relegar a la Arquitectura B pero diverjan sobre cuál arquitectura ocupa el primer lugar no es una curiosidad metodológica: es la evidencia de que, de haberse adoptado el Valor Actual Neto sin más, la recomendación final habría

premiado mecánicamente a la arquitectura de mayor vida útil supuesta, con independencia de su eficiencia económica real.

La elección metodológica de resolver la incertidumbre de los parámetros del modelo de riesgo mediante simulación de Monte Carlo con distribuciones no informativas, en lugar de mediante elicitación estructurada de expertos o actualización bayesiana con una distribución previa, merece justificarse frente a esas dos alternativas y no solo frente a la alternativa determinista que la Sección 4.3.3 ya descartó. La elicitación de expertos habría exigido convocar a especialistas de la DGA o de la industria dispuestos a cuantificar probabilidades subjetivas de infracción por caso, un insumo que esta investigación, restringida a fuentes secundarias (Sección 4.2), no estaba en condiciones de recoger. La actualización bayesiana, por su parte, habría requerido una distribución previa sobre $p_{ext,s}$, ω o p_s^{mon} que algún estudio anterior, específico para el monitoreo hídrico minero chileno, respaldara, y ese estudio previo es precisamente lo que Cohen-Manrique et al. (2025) documentan como inexistente en la región. El enfoque de Sköld et al. (2022), uniforme sobre rangos acotados por evidencia y expresado en percentiles, es en ese sentido el que exige menos supuestos no verificables dado el estado actual de la evidencia disponible, aunque a un costo ya reconocido en la Sección 6.3: una distribución uniforme no informativa no favorece ningún valor dentro del rango, ni siquiera el que un especialista con conocimiento tácito del terreno consideraría más probable, y en ese sentido sacrifica precisión potencial a cambio de no introducir un supuesto que ninguna fuente disponible permite defender.

6.2 Implicancias para la toma de decisiones de inversión y para el diseño regulatorio

Para las empresas, la implicancia central es que el caso de inversión en monitoreo hídrico no debe construirse, ni presentarse internamente, sobre la materialidad de la multa evitada, porque esa materialidad es, como muestra el Cuadro 6, irrelevante a escala de resultado operacional. Construirlo así expone el proyecto a las tres condiciones organizacionales identificadas en la Sección 5.4 que sistemáticamente postergan las inversiones de prevención: un beneficio que es un costo evitado y no un ingreso, el racionamiento de capital frente a proyectos productivos de mayor Valor Actual Neto absoluto, y la separación entre quien decide y quien enfrenta la consecuencia. El framework desarrollado en esta investigación ofrece, en cambio, un argumento distinto y más robusto frente a esos tres obstáculos: la reducción de la probabilidad de escalar hacia la reincidencia, situación en la que el artículo 173 ter habilita la paralización de faenas y la caducidad del derecho de aprovechamiento. Presentar el resultado en esos términos, como cobertura frente a una cola de

baja probabilidad y consecuencia severa y no como ahorro esperado, es una recomendación práctica que se desprende directamente de los resultados y que corresponde comunicar a los comités de inversión y de riesgo de las operaciones evaluadas, y no solo a sus áreas de cumplimiento ambiental.

Para el regulador, la implicancia más relevante surge de un hallazgo negativo de la Sección 5.1: la categoría de exigencia que la Resolución Exenta N.º 1.238 asigna a cada titular según su volumen de extracción autorizado no es públicamente verificable, pese a determinar obligaciones técnicas y plazos legalmente vinculantes. Esa opacidad no solo dificulta la investigación académica, como se declaró en la Sección 4.2; limita, en los mismos términos que documentan Gray y Shimshack (2011) y Chakraborti y Shimshack (2022), la capacidad de terceros (juntas de vigilancia, organizaciones ambientales, la propia comunidad regulada) de verificar de forma independiente si el régimen de fiscalización trata de manera equivalente a titulares equivalentes, que es precisamente el mecanismo mediante el cual Office of the Auditor General of Western Australia (2022) documentan que la auditoría independiente eleva la tasa de detección de incumplimientos sin aumentar la dotación de fiscalizadores en terreno. Publicar la categoría de exigencia y los caudales autorizados por punto de captación, en un formato consolidado y no disperso en resoluciones individuales, sería una medida de bajo costo administrativo con un efecto directo sobre la probabilidad de detección percibida, la misma palanca que esta investigación identifica como determinante de la disuasión efectiva.

Un segundo hallazgo con implicancia directa para el diseño de la fiscalización se desprende de la propia mecánica del *guard band* discutida en la Sección 6.1: si un instrumento deficiente reduce la exposición atribuible al canal de extracción, un fiscalizador que distribuyera sus auditorías en proporción a esa exposición terminaría, contraintuitivamente, auditando con menor frecuencia a los titulares con peor instrumentación, precisamente porque su propio *guard band* los protege estadísticamente de la imputación. La implicancia práctica es que la frecuencia de auditoría no debería derivarse de la exposición esperada del canal de extracción, sino de un criterio independiente de ella: la sola ausencia o antigüedad del certificado de calibración del instrumento, dato que, a diferencia del volumen extraído, no está sujeto a ambigüedad estadística y que el canal de incumplimiento de monitoreo (Ecuación 4) ya trata como verificable de forma directa. Priorizar auditorías de instalación y calibración por sobre auditorías de volumen extraído sería, en ese sentido, una traducción operativa directa de la Sección 6.1 a la práctica de fiscalización de la DGA.

6.3 Limitaciones metodológicas

Las limitaciones de esta investigación se han declarado de forma explícita en el punto en que cada una condiciona un resultado específico; esta subsección las consolida para que su efecto conjunto sobre el alcance de las conclusiones quede a la vista. En primer lugar, el muestreo intencional y no probabilístico de tres casos de gran minería (Sección 4.1) impide la generalización estadística a la industria minera chilena en su conjunto, y en particular a la mediana minería que el objetivo general y los cuatro objetivos específicos declaran como parte de su ámbito de aplicación; la Sección 5.6 argumentó que el sesgo esperado de esa extrapolación favorece, si acaso, el caso económico a favor de la inversión, pero esa dirección no ha sido verificada empíricamente. En segundo lugar, la investigación se nutre exclusivamente de fuentes secundarias (Sección 4.2), sin datos primarios de frecuencia de falla ni de parámetros financieros por caso, lo que obliga a mantener comunes entre los tres casos parámetros como $p_{ext,s}$ y a calibrar ω a partir de las multas de extracción que trascendieron a prensa o a comunicados oficiales (Cuadro 4), fuentes en las que no puede descartarse un sesgo hacia la severidad de lo que se hizo públicamente visible. En tercer lugar, la asimetría de evidencia entre los tres casos, que la Sección 5.2 trató como un hallazgo sustantivo y no como un vacío que deba ocultarse, tiene como contrapartida metodológica que la comparabilidad entre casos es más débil de lo que sugiere la uniformidad del marco analítico aplicado a los tres. En cuarto lugar, el análisis frente al EBITDA operacional (Cuadro 6) compara magnitudes que no son estrictamente homogéneas entre empresas, dado que Los Bronces se mide contra el resultado de la faena y División Andina y El Teniente contra el resultado consolidado de Codelco, de modo que los porcentajes de estas dos últimas constituyen una cota inferior y no una estimación puntual del impacto divisional. Finalmente, el análisis costo-beneficio asume que las tres arquitecturas IoT reducen el riesgo regulatorio en igual magnitud, supuesto ya identificado como el más frágil del análisis de sensibilidad (Sección 5.5). Ninguna de estas limitaciones invalida el ordenamiento robusto entre arquitecturas ni la conclusión de que la inversión en monitoreo es económicamente justificable; todas acotan, sin embargo, la precisión con la que deben leerse las cifras puntuales del framework.

6.4 Comparación con la experiencia regulatoria latinoamericana e internacional

La Sección 5.1 contrastó el diseño de la Resolución Exenta N.º 1.238 con dos referentes internacionales, WaterNSW en Australia y la auditoría de desempeño de Office of the Auditor General of Western Australia (2022) en Australia Occidental, y encontró que el régimen chileno centra la obligación en el punto de captación en lugar de exigir muestreo aguas arriba y aguas abajo, y que continúa descansando predomi-

nantemente en información autorreportada en lugar de verificación remota independiente. Esa comparación admite una lectura adicional a la luz de Cohen-Manrique et al. (2025), quienes advierten que la mayor parte de la evidencia sobre IoT y calidad de datos en sistemas hídricos proviene de marcos regulatorios maduros, y que los marcos teóricos existentes no articulan las tres dimensiones tecnológicas (hardware, conectividad, analítica) con modelos cuantitativos de riesgo aplicables a la minería latinoamericana. Leído en ese contexto, el framework desarrollado en esta investigación no es solo una respuesta al caso chileno: es un primer ejercicio de cierre de esa brecha regional, en la medida en que su lógica, *guard band* más canal de incumplimiento de monitoreo, calibrada mediante simulación de Monte Carlo con distribuciones no informativas precisamente porque los datos públicos de fiscalización son incompletos, fue diseñada para operar bajo escasez de datos, condición que Cohen-Manrique et al. (2025) documentan como la norma y no la excepción en la región.

La comparación con Chakraborti y Shimshack (2022) en México es instructiva en sentido inverso. Mientras que en el contexto urbano mexicano la disuasión ambiental depende críticamente de fortalecer mecanismos de detección todavía débiles, Chile ya cuenta con un régimen sancionatorio graduado en cinco grados (Ley N.º 21.435) y con un convenio de teledetección DGA-SMA en curso (Superintendencia del Medio Ambiente, 2025), elementos que, según Gray y Shimshack (2011), son condiciones necesarias para la disuasión efectiva. La diferencia entre ambos casos no está, entonces, en el diseño normativo, que en Chile es comparativamente más avanzado, sino en la disponibilidad pública de los datos que permitirían auditarlo externamente, la misma opacidad que la Sección 6.2 identificó como la limitación institucional más corregible. Esto sugiere que la transferencia de este framework a otros contextos mineros latinoamericanos, donde Genova Alonso et al. (2022) documentan brechas tecnológicas comparables en la mediana minería de la región, dependería menos de adaptar sus ecuaciones que de que cada jurisdicción cuente con un equivalente al SNIFA chileno: un repositorio público de fiscalizaciones que permita calibrar ω y p_s^{mon} con evidencia local, en lugar de recurrir al ejemplo ilustrativo que esta investigación debió emplear para los parámetros sin evidencia caso-específica disponible.

7 Conclusiones

El objetivo general de esta investigación, desarrollar un framework de apoyo a la decisión de inversión en sistemas de monitoreo IoT para la gran y mediana minería de la zona centro de Chile, se cumplió mediante la integración de tres insumos metodológicamente independientes (la revisión documental del marco normativo, la modelación paramétrica del riesgo regulatorio y económico, y el análisis costo-beneficio

de arquitecturas tecnológicas alternativas) en una secuencia de decisión de cuatro etapas, documentada en la Sección 5.6 y aplicada a los tres casos de estudio con recomendaciones diferenciadas y trazables a la evidencia de cada uno.

7.1 Cumplimiento de los objetivos específicos y respuesta a las preguntas de investigación

El primer objetivo específico, analizar el marco regulatorio hídrico vigente aplicable a la gran y mediana minería, se cumplió mediante la matriz de cumplimiento del Cuadro 2 (Sección 5.1), que sistematizó las obligaciones de monitoreo, el historial de fiscalizaciones y su correspondencia con el régimen de infracciones del artículo 173 ter para cada caso, y que constituyó el insumo normativo de entrada del modelo de riesgo. El segundo, analizar las dimensiones de calidad de datos y construir una taxonomía de fallas técnicas con probabilidad de ocurrencia estimada, se cumplió con el Cuadro 3 (Sección 5.2), que clasificó la falla dominante de cada caso y estimó su probabilidad anual a partir de evidencia de fiscalización y de literatura especializada. El tercero, construir un modelo de riesgo regulatorio y económico con indicadores de frecuencia esperada de infracciones, monto de multas acumuladas e impacto sobre el EBITDA operacional, se cumplió con el modelo paramétrico de las Ecuaciones 2, 3, 4 y 5 y sus tres indicadores explícitamente reportados en la Sección 5.3: la frecuencia esperada (Cuadro 4), la exposición monetaria (Cuadro 5) y su impacto sobre el EBITDA (Cuadro 6). El cuarto, evaluar económicamente la efectividad de arquitecturas IoT mediante un análisis costo-beneficio, se cumplió en la Sección 5.4 y se sometió a prueba de robustez en la Sección 5.5, identificando a la Arquitectura A como la más costo-efectiva de forma estable, condicionada a la factibilidad técnica del emplazamiento.

Las tres preguntas de investigación planteadas en la Sección 1 encuentran, en consecuencia, respuesta directa en estos resultados. La primera, sobre de qué manera las brechas de calidad de datos inciden en el riesgo regulatorio y económico, se responde mostrando que esa incidencia opera por dos canales distinguibles y de comportamiento opuesto frente a la incertidumbre de medición (Ecuaciones 2 y 4), cuya magnitud conjunta es financieramente marginal frente al resultado operacional pero se vuelve material a través de las sanciones accesorias por reincidencia (Cuadro 6). La segunda, sobre qué modelo teórico permite cuantificar esa exposición, se responde con el modelo paramétrico no informativo de simulación de Monte Carlo desarrollado en la Sección 4.3.3, calibrado y validado empíricamente en la Sección 5.3. La tercera, sobre en qué medida la integración de soluciones IoT podría reducir esas brechas y el riesgo regulatorio, se responde con el beneficio anual evitado B y su traducción en indicadores de rentabilidad (Cuadro 8), robustos a once

escenarios de sensibilidad económica y a un escenario adverso combinado sobre los parámetros de riesgo (Sección 5.5).

7.2 Contribuciones de la investigación

Esta investigación aporta tres contribuciones que se distinguen por su naturaleza. La contribución teórica es la extensión del concepto de *guard band* discutido en la Sección 6.1 con un segundo canal de riesgo, el incumplimiento de las obligaciones de instalación, mantención y transmisión, no sujeto al descuento por incertidumbre de medición; esta extensión es la que permite explicar por qué un instrumento deficiente no exime de riesgo regulatorio a su titular aun cuando reduzca su exposición por ambigüedad de extracción. La contribución metodológica es un framework íntegramente reproducible y auditable (Cuadro 4 y el código fuente del modelo de riesgo y del análisis costo-beneficio) que declara cada supuesto en el punto en que se introduce y somete a prueba de sensibilidad, precisamente, los parámetros de menor respaldo empírico, en lugar de presentarlos como si tuvieran la misma certeza que los datos de fiscalización. La contribución práctica es el propio framework de decisión de cuatro etapas (Sección 5.6), que una operación minera con antecedentes de fiscalización propios podría recalibrar con sus datos internos para obtener una estimación específica de su exposición y de la arquitectura de monitoreo más costo-efectiva dada su topografía y su falla dominante.

7.3 Líneas de trabajo futuro

Seis líneas de trabajo futuro se desprenden directamente de las limitaciones declaradas en la Sección 6.3 y de las extensiones ya anticipadas en el Marco Teórico. La primera es extender el framework a casos de mediana minería mediante levantamiento de datos primarios, dado que esta investigación no identificó casos de ese segmento con antecedentes de fiscalización públicos que permitieran verificar empíricamente la dirección del sesgo argumentada en la Sección 5.6. La segunda es incorporar caudales autorizados y número real de puntos de monitoreo por faena, hoy no disponibles públicamente, lo que permitiría escalar los resultados de este framework de la unidad genérica «por punto de monitoreo» a una estimación de exposición a nivel de faena completa. La tercera es diferenciar empíricamente la efectividad relativa de cada arquitectura IoT en la reducción del riesgo regulatorio, hoy asumida como equivalente por ausencia de evidencia cuantitativa, mediante el seguimiento de despliegues piloto o de datos de confiabilidad de proveedores. La cuarta es una evaluación *ex post* del beneficio B una vez que una o más de las operacio-

nes evaluadas realicen la inversión recomendada, que permitiría contrastar el beneficio estimado por este framework contra el efectivamente observado y, con ello, recalibrar el modelo con la primera evidencia de desempeño real disponible para el contexto minero chileno. La quinta es incorporar la variabilidad climática como parámetro de escenario explícito del modelo de riesgo, dado que el Marco Teórico documentó que la megasequía estrecha estructuralmente el margen de tolerancia entre el volumen extraído y el autorizado, pero la calibración de esta investigación no parametriza ese efecto. La sexta es diferenciar la probabilidad de detección de la DGA por caso, en lugar de la tasa nacional agregada p_{detect} empleada aquí, una vez que existan antecedentes públicos de fiscalización desagregados que permitan estimarla de forma específica.

Esta investigación partió de una tensión estructural: Chile sostiene su posición como primer productor mundial de cobre sobre un consumo hídrico que la Sección 1 proyectó en crecimiento hacia 2034, en acuíferos que Alvarez-Garretón et al. (2023) documentan ya en descenso sostenido. El framework desarrollado en esta investigación no resuelve esa tensión de fondo, que excede el alcance de una memoria de título, pero sí ofrece una respuesta acotada y operativa a una de sus dimensiones: cuantificar cuánto vale, en riesgo regulatorio y económico evitado, cerrar la brecha de calidad de datos que separa el monitoreo hídrico minero chileno del estándar que su propio marco normativo, cada vez más exigente, presupone. Que esa respuesta resulte, en los tres casos evaluados, una recomendación de inversión robusta y de bajo costo relativo frente a la escala de las operaciones estudiadas, sugiere que la calidad del dato de monitoreo no es un problema técnico marginal, sino una pieza comparativamente barata de resolver dentro de un problema hídrico nacional que, en todo lo demás, no lo es.

Referencias

- Alvarez-Garreton, C., Boisier, J. P., Blanco, G., Billi, M., Nicolas-Artero, C., Maillet, A., Aldunce, P., Urrutia-Jalabert, R., Zambrano-Bigiarini, M., Guevara, G., Galleguillos, M., Muñoz, A., Christie, D., Marinao, R., y Garreaud, R. (2023). *Seguridad hídrica en Chile: Caracterización y perspectivas de futuro* (inf. téc.) (ANID/FONDAP/1522A0001). Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2). <https://www.cr2.cl/seguridadhidrica>
- American Water Works Association. (2021). *Manual of water supply practices: Flow measurement* (3.^a ed.). AWWA.
- Anglo American plc. (2026, julio). *Half year financial report for the six months ended 30 June 2026* (inf. téc.). Anglo American plc. Consultado el 16 de agosto de 2026, desde <https://www.angloamerican.com/~media/Files/A/Anglo-American-Group-v9/PLC/media/press-release/releases/2026pr/anglo-american-interim-results-2026.pdf>
- Barrientos, N., Parada, P., y Diaz, F. (2023). Validity of flowmeter data towards Mining 4.0 [Presentado en Procemin-GEOMET 2023, 4–6 de octubre de 2023]. *Proceedings of Procemin-GEOMET 2023*.
- Boardman, A. E., Greenberg, D. H., Vining, A. R., y Weimer, D. L. (2018). *Cost-Benefit Analysis: Concepts and Practice* (5.^a ed.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781108235594>
- Brandão, L. P., Silva, V. F., Bassi, M., y de Oliveira, E. C. (2022). Risk assessment in monitoring of water analysis of a Brazilian river. *Molecules*, 27(11), 3628. <https://doi.org/10.3390/molecules27113628>
- Cacciuttolo, C., Atencio, E., Komarizadehasl, S., y Lozano-Galant, J. A. (2024). Internet of Things long-range-wide-area-network-based wireless sensors network for underground mine monitoring: Planning an efficient, safe, and sustainable labor environment. *Sensors*, 24(21), 6971. <https://doi.org/10.3390/s24216971>
- Chakraborti, L., y Shimshack, J. P. (2022). Environmental disparities in urban Mexico: Evidence from toxic water pollution. *Resource and Energy Economics*, 67, 101281. <https://doi.org/10.1016/j.reseneeco.2021.101281>
- Codelco. (2026, marzo). Codelco cerró 2025 con un Ebitda de US\$ 6.670 millones, una utilidad consolidada de US\$ 2.423 millones y un aporte al Fisco de US\$ 1.778 millones. Consultado el 15 de agosto de 2026, desde <https://www.codelco.com/prensa/2026/codelco-cerro-2025-con-un-ebitda-de-us-6-670-millones-una-utilidad>

- Cohen-Manrique, C., Camacho-León, S., y Villa, J. L. (2025). Emerging trends in IoT for aquatic systems: A systematic literature review. *Frontiers in Water*, 7, Artículo 1699240. <https://doi.org/10.3389/frwa.2025.1699240>
- Comisión Chilena del Cobre. (2025, junio). *Proyección de la demanda de agua en la minería del cobre: Período 2024–2034* (Informe técnico N.º DEEP 06/2025). Comisión Chilena del Cobre, Dirección de Estudios y Políticas Públicas. Consultado el 9 de mayo de 2026, desde <https://www.cochilco.cl/web/informe-proyeccion-del-consumo-de-agua-en-la-mineria-del-cobre-periodo-2024-2034/>
- Corte de Apelaciones de Santiago, Novena Sala. (2025). Recurso de reclamación: Sociedad Agrícola Las Palmeras Limitada con Dirección General de Aguas [Sentencia de 6 de octubre de 2025. Redacción Ministra Maritza Elena Villadangos Frankovich]. Consultado el 5 de mayo de 2026, desde <https://www.diarioconstitucional.cl/wp-content/uploads/2025/10/CA-289-2025.pdf>
- Dirección General de Aguas. (2019). Determina las condiciones técnicas y los plazos a nivel nacional para cumplir con obligación de instalar y mantener un sistema de monitoreo y transmisión de extracciones efectivas en las obras de captación de aguas subterráneas [Resolución Exenta N.º 1238]. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1133261>
- Dirección General de Aguas. (2025). *Balance de Gestión Integral 2024* (inf. téc.). Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas. Consultado el 2 de septiembre de 2026, desde <https://dga.mop.gob.cl/uploads/sites/13/2024/08/BGI-2024-DGA.pdf>
- Dirección General de Aguas, Región de Valparaíso. (2025). DGA Valparaíso aplica multa de \$168 millones a Anglo American por extracciones no autorizadas de agua en el estero Riecillos [Resoluciones DGA Valparaíso N° 1342 y N° 1608 de 2023]. Consultado el 5 de mayo de 2026, desde <https://dga.mop.gob.cl/dga-valparaiso-aplica-multa-de-168-millones-a-anglo-american-por-extracciones-no-autorizadas-de-agua-en-el-estero-riecillos/>
- Donoso, G., Lictevout, E., y Rinaudo, J. D. (2020). Groundwater management lessons from Chile. En J. D. Rinaudo, C. Holley, S. Barnett y M. Montginoul (Eds.), *Sustainable groundwater management: Global issues in water policy* (pp. 481-502). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-32766-8_25
- El Tipógrafo. (2025, abril). El Teniente tuvo la mayor producción de cobre fino en 2024 de todas las Divisiones de Codelco. Consultado el 15 de agosto de 2026, desde <https://eltipografo.cl/2025/04/el-teniente-tuvo-la-mayor-produccion-de-cobre-fino-en-2024-de-todas-las-divisiones-de-codelco>

- Espinoza Ortiz, M., Apún Molina, J. P., Belmonte Jiménez, S. I., Herrera Barrientos, J., Peinado Guevara, H. J., y Santamaria Miranda, A. (2023). Development of Low-Cost IoT System for Monitoring Piezometric Level and Temperature of Groundwater. *Sensors*, 23(23), 9364. <https://doi.org/10.3390/s23239364>
- Essamlali, I., Nhaila, H., y El Khaili, M. (2024). Advances in machine learning and IoT for water quality monitoring: A comprehensive review. *Heliyon*, 10(6), e27920. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27920>
- Eurachem/CITAC. (2021). *Use of uncertainty information in compliance assessment* (1.^a ed., inf. téc.). Eurachem. https://www.eurachem.org/images/stories/Guides/pdf/MUC2021_P1_EN.pdf
- Fundación Terram. (2023). DGA aplica millonarias multas a Codelco Andina y Anglo American Sur por extracción no autorizada de aguas del río Aconcagua. Consultado el 5 de mayo de 2026, desde <https://www.terram.cl/dga-aplica-millonarias-multas-a-codelco-andina-y-anglo-american-sur-por-extraccion-no-autorizada-de-aguas-del-rio-aconcagua/>
- Genova Alonso, P., Wei, Y., y Olivares, M. A. (2022). Evolution of water environmental regulations in Chile since 1900. *Water Policy*, 24(8), 1306-1324. <https://doi.org/10.2166/wp.2022.053>
- Gleeson, T., Cuthbert, M., Ferguson, G., y Perrone, D. (2020). Global groundwater sustainability, resources, and systems in the Anthropocene. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 48(1), 431-463. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-071719-055251>
- Gómez González, R. F., y Rivera Bravo, D. (2022). Régimen administrativo sancionador en materia de aguas en Chile: diagnóstico, implementación y desafíos. *Ius et Praxis*, 28(3), 202-227. <https://doi.org/10.4067/S0718-00122022000300202>
- Gray, W. B., y Shimshack, J. P. (2011). The effectiveness of environmental monitoring and enforcement: A review of the empirical evidence. *Review of Environmental Economics and Policy*, 5(1), 3-24. <https://doi.org/10.1093/reep/req017>
- International Energy Agency. (2024, mayo). *Global Critical Minerals Outlook 2024* (inf. téc.). International Energy Agency. Consultado el 9 de mayo de 2026, desde <https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2024>
- Khairullah, E. F., Alghamdi, A. M., Al Mojamed, M. M., y Zeadally, S. (2025). LoRaWAN-based smart water management IoT applications: a review. *Journal of Information and Telecommunication*, 9(4), 420-446. <https://doi.org/10.1080/24751839.2025.2458889>

- Lobos, G., y Viviani, J.-L. (2008). Factores determinantes de la utilización de instrumentos públicos para la gestión del riesgo en la industria vitivinícola chilena: un modelo logit binomial [Cita el costo de capital del sector vitivinícola chileno estimado por Morán (2007) mediante CAPM: 8,9 % real anual]. *Lecturas de Economía*, 69, 63-83.
- Miasayedava, L., McBride, K., y Tuhtan, J. A. (2020). *Automated environmental compliance monitoring with IoT and open government data* (Preprint). arXiv. <https://arxiv.org/abs/2010.11945>
- Ministerio de Justicia. (1981). Fija texto del Código de Aguas [Decreto con Fuerza de Ley N.º 1.122]. Consultado el 9 de mayo de 2026, desde <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=5605>
- Ministerio de Obras Públicas. (2013, mayo). Aprueba reglamento sobre normas de exploración y explotación de aguas subterráneas [Decreto N.º 203] [Promulgado el 20 de mayo de 2013; publicado el 7 de marzo de 2014]. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1060095>
- Ministerio de Obras Públicas. (2018, enero). Introduce modificaciones al marco normativo que rige las aguas en materia de fiscalización y sanciones [Ley N.º 21.064].
- Ministerio de Obras Públicas. (2020). Aprueba reglamento de monitoreo de extracciones efectivas de aguas superficiales [Decreto Supremo N.º 53]. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1150576>
- Ministerio de Obras Públicas. (2022, abril). Reforma el Código de Aguas [Ley N.º 21.435] [Véase especialmente el artículo 173 ter sobre el régimen sancionatorio de cinco grados]. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1174443>
- Ministerio de Obras Públicas. (2025a, febrero). Más de 100 lagos, lagunas y ríos serán monitoreados por el MOP para asegurar la calidad de agua. Consultado el 2 de septiembre de 2026, desde <https://www.mop.gob.cl/mas-de-100-lagos-lagunas-y-rios-seran-monitoreados-por-el-mop-para-asegurar-la-calidad-de-agua/>
- Ministerio de Obras Públicas. (2025b, abril). Modifica el Código de Aguas en lo relativo al procedimiento de fiscalización y vigilancia por parte de la Dirección General de Aguas [Ley N.º 21.740] [Promulgada el 14 de abril de 2025; publicada el 23 de abril de 2025]. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1212671>
- Ministerio del Medio Ambiente de Chile. (2020). *Atlas de Riesgo Climático de Chile (ARClím)* (inf. téc.). Ministerio del Medio Ambiente. Santiago, Chile. <https://arclim.mma.gob.cl>

- Musonda, S. K., Ndiaye, M., Libati, H. M., y Abu-Mahfouz, A. M. (2024). Reliability of LoRaWAN communications in mining environments: A survey on challenges and design requirements. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 13(1), 16. <https://doi.org/10.3390/jsan13010016>
- Naciones Unidas. (2022). La salud de diez millones de peruanos está en riesgo por el envenenamiento del agua con sustancias tóxicas. <https://news.un.org/es/story/2022/12/1517512>
- Office of the Auditor General of Western Australia. (2022, diciembre). *Compliance with Mining Environmental Conditions* (inf. téc. N.º Report 11 of 2022-23). Office of the Auditor General of Western Australia. Consultado el 9 de mayo de 2026, desde https://audit.wa.gov.au/wp-content/uploads/2022/12/Report-11_Compliance-with-Mining-Environmental-Conditions.pdf
- Oliveros-Sepúlveda, D., Bascompta-Massanés, M., y Franco-Sepúlveda, G. (2025). Environmental and closure costs in strategic mine planning, models, regulations, and policies. *Resources*, 14(3), 41. <https://doi.org/10.3390/resources14030041>
- O'Mahony, T. (2021). Cost-benefit analysis and the environment: The time horizon is of the essence. *Environmental Impact Assessment Review*, 89, 106587. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2021.106587>
- Redimin.cl. (2026). Anglo American agranda pérdida a US\$3.741 millones en 2025 que golpeó al cobre en Chile y cómo avanza su hoja de ruta con Teck y Codelco. Consultado el 15 de agosto de 2026, desde <https://www.redimin.cl/anglo-american-agranda-perdida-a-us3-741-millones-en-2025-que-golpeo-al-cobre-en-chile-y-como-avanza-su-hoja-de-ruta-con-teck-y-codelco>
- Reporte Minero. (2026, marzo). Chile se mantiene como el mayor productor mundial de cobre con 5,3 millones de toneladas en 2025 [Cifra según informe del United States Geological Survey (USGS)]. Consultado el 15 de agosto de 2026, desde <https://www.reporteminero.cl/noticia/noticias/2026/03/chile-lider-produccion-cobre-informe-usgs-2026>
- Sanhueza Bravo, R. (2025, febrero). Autorregulación para avanzar en seguridad hídrica [Columna de opinión del Director General de Aguas]. Consultado el 2 de septiembre de 2026, desde <https://dga.mop.gob.cl/columna-autorregulacion-para-avanzar-en-seguridad-hidrica/>
- Servicio de Impuestos Internos. (2026). Unidad Tributaria Mensual (UTM) y Unidad Tributaria Anual (UTA) 2026. Consultado el 15 de agosto de 2026, desde https://www.sii.cl/valores_y_fechas/utm/utm2026.htm

- Sköld, N.-P., Bergion, V., Lindhe, A., Keucken, A., y Rosén, L. (2022). Risk-based evaluation of improvements in drinking water treatment using cost-benefit analysis. *Water*, 14(5), 782. <https://doi.org/10.3390/w14050782>
- Sloan, S., Cook, P. G., y Wallis, I. (2023). Managed aquifer recharge in mining: A review. *Groundwater*, 61(3), 305-317. <https://doi.org/10.1111/gwat.13311>
- Sowndharya, M., y Duraisamy, S. (2024). Real-time groundwater monitoring using IoT sensors for sustainable resource management. En A. Joshi, M. Mahmud, R. G. Ragel y S. Kartik (Eds.), *ICT: Cyber security and applications* (pp. 229-242, Vol. 916). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-97-0744-7_19
- Superintendencia del Medio Ambiente. (2025, noviembre). Superintendencia de Medio Ambiente y Dirección General de Aguas del MOP firman convenio para fortalecer fiscalización ambiental de recursos hídricos. <https://portal.sma.gob.cl/index.php/superintendencia-de-medio-ambiente-y-direccion-general-de-aguas-del-mop-firman-convenio-para-fortalecer-fiscalizacion-ambiental-de-recursos-hidricos/>
- Superintendencia del Medio Ambiente. (2026). Sistema Nacional de Información de Fiscalización Ambiental (SNIFA). Consultado el 16 de agosto de 2026, desde <https://snifa.sma.gob.cl/>
- Teh, H. Y., Kempa-Liehr, A. W., y Wang, K. I.-K. (2020). Sensor data quality: A systematic review. *Journal of Big Data*, 7(1), 11. <https://doi.org/10.1186/s40537-020-0285-1>
- United Nations. (2024). *The United Nations World Water Development Report 2024: Water for prosperity and peace* (inf. téc.). UNESCO. París. Consultado el 9 de mayo de 2026, desde <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000388952>
- Wang, J., Liu, Y., Li, P., Lin, Z., Sindakis, S., y Aggarwal, S. (2024). Overview of data quality: Examining the dimensions, antecedents, and impacts of data quality. *Journal of the Knowledge Economy*, 15(1), 1159-1178. <https://doi.org/10.1007/s13132-022-01096-6>
- WaterNSW. (2026, marzo). *Water Monitoring Guidelines for Underground Mining Activities in the Special Areas* (inf. téc. N.º CD2021/161[v2]). WaterNSW. Consultado el 9 de mayo de 2026, desde https://www.waternsw.com.au/__data/assets/pdf_file/0010/217468/Water-Monitoring-Guidelines-for-Underground-Mining-Activities-in-the-Special-Areas.pdf