



**UNIVERSIDAD
DE ATACAMA**

FACULTAD TECNOLÓGICA

**DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍAS DE LA ADMINISTRACIÓN Y
GESTIÓN**

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA INTEGRADO DE CONTROL
INTERNO Y CADENA DE CUSTODIA PARA EL TRANSPORTE DE
CONCENTRADO Y CÁTODOS DE COBRE EN EMPRESAS DE TRANSPORTE
DE CARGA POR CARRETERA**

Profesor guía: Sr. Carlos Calderón Rojas

Jorge Andrés Cruz Villalobos

Copiapó, Chile 2025



**UNIVERSIDAD
DE ATACAMA**

**FACULTAD TECNOLÓGICA
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍAS DE LA ADMINISTRACIÓN Y
GESTIÓN**

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA INTEGRADO DE CONTROL
INTERNO Y CADENA DE CUSTODIA PARA EL TRANSPORTE DE
CONCENTRADO Y CÁTODOS DE COBRE EN EMPRESAS DE TRANSPORTE
DE CARGA POR CARRETERA**

Proyecto de titulación presentado en conformidad a los requisitos para obtener el título de
Ingeniero de Ejecución en Administración de Empresas

Profesor guía: Sr. Carlos Calderón Rojas

Jorge Andrés Cruz Villalobos

Copiapó, Chile 2025

AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a mi familia, por su amor, apoyo incondicional y comprensión durante todo este proceso formativo. En especial a mis padres, quienes me enseñaron el valor del esfuerzo, la perseverancia y la responsabilidad.

A mi profesor guía, Sr. Carlos Calderón Rojas, por su orientación, compromiso y valiosas sugerencias técnicas que permitieron fortalecer el desarrollo de este proyecto.

Extiendo también mi gratitud a la Universidad de Atacama, a los docentes del Departamento de Tecnologías de la Administración y Gestión, y a mis compañeros de carrera, por el compañerismo y los aprendizajes compartidos a lo largo de esta etapa académica.

Finalmente, agradezco a las empresas y profesionales del rubro minero que aportaron información técnica y experiencia operativa, elementos esenciales para contextualizar y validar esta investigación aplicada.

Atte.

Jorge Andrés Cruz Villalobos.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo con especial cariño a mi familia, quienes han sido el pilar fundamental en cada etapa de mi vida.

A mis padres, por su sacrificio y constante apoyo, que me motivaron a culminar este desafío académico.

A mis seres queridos y amigos, por su comprensión en los momentos de mayor exigencia.

Y a todos quienes confiaron en mí y me impulsaron a perseverar con determinación hasta alcanzar esta meta profesional.

Atte.

Jorge Andrés Cruz Villalobos.

ÍNDICE

CAPÍTULO I	1
MARCO INTRODUCTORIO	1
1.1. Introducción.	1
1.2. Fundamentación	2
1.3. Problemática.....	2
1.4. Justificación.....	3
1.5. Objetivo general	3
1.6. Objetivos específicos	4
1.7. Alcance.....	5
1.8. Limitaciones.....	5
1.9. Resumen de capítulos.....	6
CAPÍTULO II	8
MARCO TEÓRICO Y REFERENCIAL	8
2.1. Antecedentes generales	8
2.2. Control interno y marco COSO.....	8
2.3. Gestión de riesgos operacionales y modelo BowTie	11
2.4. Modelamiento y estandarización de procesos con BPMN 2.0.....	14
2.5. Normas ISO en sistemas de gestión integrados	16
2.6. Telemática aplicada al transporte minero	19
2.7. Tecnologías RFID, MDVR y Bodycams	21
2.8. Ciberseguridad y protección de datos	24
2.9. Indicadores de desempeño (SLA/KPI)	27
2.10. Síntesis del marco teórico	30
CAPÍTULO III	34
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	34
3.1. Introducción.	34
3.2. Enfoque de la investigación	34
3.2.1. Componente cuantitativo	34
3.2.2. Componente cualitativo	35

3.3. Tipo de investigación	35
3.4. Diseño de investigación	36
3.5. Población y muestra	37
3.5.1. Población.....	37
3.5.2. Muestra.....	37
3.6. Variables del estudio.....	38
3.6.1. Variable independiente	38
3.6.2. Variables dependientes.....	38
3.7. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	39
3.7.1. Técnicas cuantitativas	39
3.7.2. Técnicas cualitativas	39
3.8. Procedimiento metodológico	40
3.8.1. Etapa 1: Diagnóstico del sistema actual.....	40
3.8.2. Etapa 2: Modelamiento BPMN del proceso	40
3.8.3. Etapa 3: Diseño del sistema integrado	40
3.8.4. Etapa 4: Implementación piloto	40
3.8.5. Etapa 5: Recolección y análisis de datos.....	40
3.8.6. Etapa 6: Retroalimentación y mejora continua	40
3.9. Validez y confiabilidad	41
3.9.1. Validez	41
3.9.2. Confiabilidad.....	41
3.10. Consideraciones éticas	41
3.11. Síntesis del capítulo	42
CAPÍTULO IV	43
DIAGNÓSTICO Y DISEÑO DE LA SOLUCIÓN	43
4.1. Introducción..	43
4.2. Diagnóstico del sistema actual	43
4.2.1. Brechas operacionales.....	43
4.2.2. Brechas tecnológicas.....	44
4.2.3. Brechas procedimentales y organizacionales.....	48
4.3. Análisis de riesgos mediante modelo BowTie.....	51

4.3.1. Causas principales.....	51
4.3.2. Consecuencias.....	52
4.3.3. Barreras preventivas.....	52
4.3.4. Barreras mitigadoras.....	53
4.4. Diseño de la solución integrada.....	54
4.4.1. Capa tecnológica: arquitectura telemática integrada.....	54
4.4.2. Capa procesal: estandarización bajo BPMN 2.0.....	55
4.4.3. Capa documental: SOP y gestión de evidencias.....	56
4.4.4. Capa de control interno: COSO aplicado a transporte minero.....	57
4.4.5. Capa de ciberseguridad: ISO 27001.....	57
4.5. Procesos BPMN del sistema propuesto.....	58
4.5.1. Etapa 1: Planificación del transporte.....	58
4.5.2. Etapa 2: Carguío, verificación y sellado RFID.....	58
4.5.3. Etapa 3: Registro formal de cadena de custodia.....	58
4.5.4. Etapa 4: Monitoreo en ruta.....	58
4.5.5. Etapa 5: Confirmación de entrega.....	59
4.5.6. Etapa 6: Inspección y revisión conjunta.....	59
4.5.7. Etapa 7: Auditoría y retroalimentación.....	59
4.6. Indicadores KPI/SLA del sistema.....	59
4.7. Plan de implementación del sistema integrado.....	61
4.8. Matriz de control y puntos críticos del proceso (PCC).....	62
4.9. Plan de capacitación y gestión del cambio organizacional.....	63
4.10. Síntesis del capítulo.....	64
CAPÍTULO V.....	66
IMPLEMENTACIÓN PILOTO.....	66
5.1. Introducción.....	66
5.2. Selección de rutas y flota piloto.....	66
5.3. Instalación tecnológica y pruebas operativas.....	69
5.3.1. Etapa de configuración y calibración inicial.....	69
5.3.2. Pruebas estáticas del sistema.....	69
5.3.3. Pruebas dinámicas en ruta.....	71

5.3.4. Validación técnica previa a la puesta en marcha del piloto	73
5.4. Capacitación del personal y gestión del cambio	73
5.5. Ejecución del piloto.....	75
5.6. Resultados preliminares del piloto	77
5.7. Análisis de desviaciones y no conformidades.....	78
5.8. Evaluación del cumplimiento KPI/SLA.....	79
5.9. Ajustes finales previos al escalamiento.....	80
5.10. Síntesis del capítulo	80
CAPÍTULO VI	81
RESULTADOS Y ANÁLISIS	81
6.1. Introducción.	81
6.2. Evaluación global del desempeño del sistema	82
6.3. Discusión en torno a los objetivos específicos.....	83
6.4. Lecciones aprendidas del piloto	84
6.5. Propuesta de escalamiento del sistema	84
6.6. Recomendaciones finales	85
6.7. Síntesis del capítulo	86
CAPÍTULO VII	87
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	87
7.1. Conclusiones	87
7.2. Recomendaciones.....	88
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91
GLOSARIO	93
ANEXOS	97
ANEXO 1. Encuesta de diagnóstico organizacional sobre control interno.....	97
ANEXO 2. SOP – Procedimiento operativo estándar de cadena de custodia digital	98
ANEXO 3. Matriz BowTie – Evento Crítico: Pérdida de Integridad de la Carga	99
ANEXO 4. Indicadores KPI y SLA del sistema integrado	100
ANEXO 5. Matriz de cumplimiento normativo (ISO).....	100
ANEXO 6. Arquitectura telemática del sistema	100
ANEXO 7. Plan de capacitación aplicado	101

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 2.1: Componentes del Marco COSO adaptado al transporte minero.	10
Figura N° 2.2: Modelo BowTie aplicado al transporte minero.....	13
Figura N° 2.3: Flujo BPMN simplificado del transporte y custodia.....	15
Figura N° 2.4: Flujo telemático integrado para monitoreo del transporte minero.....	20
Figura N° 2.5: Capas de seguridad en la transmisión de datos.	26
Figura N° 4.1: Nivel de madurez tecnológica del sistema actual.	45
Figura N° 4.2: Brechas procedimentales y organizacionales.....	48
Figura N° 4.3: Flujo de implementación del sistema integrado.....	61
Figura N° 4.4: Arquitectura general de la solución integrada.....	63
Figura N° 4.5: Arquitectura del sistema integrado.	64
Figura N° 5.1: Arquitectura del sistema integrado.	68
Figura N° 5.2: Flujo operacional aplicado a prueba estáticas y dinámicas.....	70
Figura N° 5.3: Resultados iniciales de pruebas dinámicas.	72

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 2.1: Aplicación de normas ISO al sistema propuesto.....	17
Tabla N° 2.2: Comparativo de tecnologías aplicadas.	23
Tabla N° 2.3: Indicadores de desempeño propuestos.	28
Tabla N° 4.1: Brechas operacionales identificadas en el diagnóstico.....	44
Tabla N° 4.2: Brechas tecnológicas identificadas durante el diagnóstico.	45
Tabla N° 4.3: Brechas procedimentales y organizacionales detectadas.	50
Tabla N° 4.4: Síntesis del análisis BowTie del evento crítico.	53
Tabla N° 4.5: Síntesis del análisis BowTie del evento crítico.	60

RESUMEN

El presente proyecto de título tiene como propósito diseñar e implementar un Sistema Integrado de Control Interno y Cadena de Custodia para el transporte de concentrado y cátodos de cobre, con el fin de asegurar la trazabilidad, integridad y seguridad logística durante todas las etapas del proceso de traslado. La investigación se desarrolla bajo un enfoque aplicado y mixto, combinando metodologías cuantitativas —para medir desempeño operacional mediante KPI y SLA— y cualitativas, orientadas a evaluar la adopción organizacional y la percepción del personal involucrado. Este enfoque permite validar tanto la efectividad técnica como la viabilidad práctica del sistema propuesto. Los capítulos iniciales contextualizan el funcionamiento del transporte minero chileno y presentan los marcos conceptuales que sustentan el diseño del sistema: el modelo de control interno COSO, la metodología de análisis de riesgos BowTie, el modelamiento de procesos bajo BPMN 2.0 y la integración de normas ISO, entre ellas ISO 9001, 14001, 45001, 27001 y 31000, que proporcionan lineamientos de calidad, seguridad, sostenibilidad, ciberseguridad y gestión del riesgo. Sobre esta base, se diseña una arquitectura telemática avanzada compuesta por GPS dual, MDVR con ADAS/DMS, sellos RFID, bodycams Hytera y geocercas inteligentes, herramientas que permiten monitorear en tiempo real la operación y asegurar la cadena de custodia digital. El marco teórico y metodológico converge en una solución integral que incorpora control preventivo, auditoría continua, evidencia audiovisual y trazabilidad automatizada. La validación experimental del sistema se realiza mediante un piloto en rutas de alta montaña, el cual demuestra mejoras significativas en disponibilidad telemétrica, integridad de carga, tiempos de detección (MTTD) y tiempos de respuesta (MTTR). En síntesis, el proyecto aporta un modelo innovador y escalable para el sector minero, fortaleciendo la gobernanza logística, la gestión del riesgo y la sostenibilidad operacional.

CONTROL INTERNO - CADENA DE CUSTODIA – TRAZABILIDAD -
TELEMÁTICA – MINERÍA – COSO – BOWTIE – BPMN – RFID - ISO

CAPÍTULO I

MARCO INTRODUCTORIO.

1.1. Introducción.

El transporte de concentrado y cátodos de cobre representa una actividad crítica dentro de la cadena de valor minera chilena, dado su impacto directo en la rentabilidad, la reputación y la continuidad operacional de las empresas involucradas. Chile, como principal productor de cobre a nivel mundial, depende fuertemente de la eficiencia y seguridad de su logística minera para mantener su competitividad internacional (Comisión Chilena del Cobre [COCHILCO], 2024). En este contexto, la integridad de la carga durante su traslado constituye un elemento fundamental para el cumplimiento contractual entre empresas transportistas y mineras, así como para la sustentabilidad del negocio.

No obstante, los registros recientes muestran un incremento significativo de incidentes relacionados con la vulneración de la cadena de custodia como robos, hurtos, aperturas de sellos y desvíos de ruta que afectan tanto al transporte terrestre de concentrado como al de cátodos de cobre (Ministerio del Interior y Seguridad Pública, 2023). Estos eventos se han intensificado en zonas de alta montaña y sectores con baja conectividad, donde el monitoreo tradicional por GPS o comunicación radial es insuficiente para garantizar trazabilidad en tiempo real.

Por ello, se propone el diseño e implementación de un Sistema Integrado de Control Interno y Cadena de Custodia que permita fortalecer la trazabilidad, seguridad y control del transporte minero mediante la incorporación de tecnologías telemáticas avanzadas (GPS dual, MDVR, ADAS/DMS, RFID y cámaras corporales inteligentes), en conjunto con procesos estandarizados y verificables bajo marcos de gestión reconocidos internacionalmente como COSO, ISO 9001, ISO 14001 e ISO 45001 (COSO, 2017; International Organization for Standardization [ISO], 2015).

1.2. Fundamentación.

La presente investigación se fundamenta en la necesidad de elevar los estándares de control interno, trazabilidad y cumplimiento contractual en el transporte de productos mineros de alto valor. En el contexto nacional, las empresas de transporte enfrentan crecientes exigencias de sus clientes, quienes demandan indicadores de desempeño (KPI) asociados a la integridad total de la carga (100%), tiempo de respuesta ante desviaciones y disponibilidad telemétrica continua (Sociedad Nacional de Minería [SONAMI], 2024).

Desde una perspectiva técnica, la integración de herramientas de gobierno corporativo (COSO), gestión de riesgos (ISO 31000) y modelamiento de procesos (BPMN 2.0) permite crear una estructura sólida para prevenir, detectar y mitigar incidentes de pérdida de integridad (Instituto de Auditores Internos, 2020). Adicionalmente, la incorporación de tecnologías emergentes como las bodycams inteligentes y radios Hytera VM750D, con reconocimiento facial y transmisión en vivo, posibilita un registro seguro y auditable de cada evento operacional (Hytera Communications, 2025).

Por tanto, el estudio se sustenta tanto en el requerimiento operativo y contractual de las empresas de transporte minero como en la oportunidad de aplicar herramientas tecnológicas y normativas que incrementen la eficiencia, confiabilidad y transparencia de los procesos logísticos (Lizana, 2023).

1.3. Problemática.

El principal problema detectado radica en la ausencia de un sistema integral, trazable y auditable que asegure la integridad del concentrado y los cátodos de cobre durante su transporte. Actualmente, las empresas del rubro presentan un manejo fragmentado de los datos y procedimientos, con sistemas de GPS aislados, controles manuales de sellos y falta de estandarización operativa entre sus distintas bases.

Esta situación genera riesgos de mermas, pérdidas económicas, incumplimientos contractuales y sanciones por parte de las mineras mandantes. Además, la inexistencia de un sistema de custodia estandarizado impide demostrar trazabilidad ante auditorías internas o externas bajo las normas ISO y los principios del control interno COSO (Comité de Organizaciones Patrocinadoras de la Comisión Treadway [COSO], 2017).

El problema se agrava en rutas críticas de la Región de Antofagasta, Atacama, Coquimbo y Valparaíso, donde las condiciones geográficas y de conectividad aumentan la vulnerabilidad frente a robos y hurtos organizados.

1.4. Justificación.

Desde un punto de vista económico, el proyecto busca disminuir las pérdidas derivadas de incidentes logísticos, multas contractuales y costos de seguro, estimados en más de un 5% del valor transportado por evento (COCHILCO, 2024). En el plano operacional, la implementación del sistema permitirá una gestión preventiva en lugar de reactiva, basada en alertas automatizadas y reportes telemáticos integrados.

En el ámbito normativo, el proyecto responde a las exigencias de cumplimiento establecidas en los contratos con clientes mineros, así como a las certificaciones ISO que demandan trazabilidad y mejora continua (ISO, 2015).

Finalmente, desde una perspectiva estratégica y social, la propuesta contribuye a fortalecer la confianza entre los actores de la cadena logística minera y a reducir la exposición a delitos de alto impacto asociados al robo de cobre, apoyando la sostenibilidad del sector (Subsecretaría de Prevención del Delito, 2023).

1.5. Objetivo general.

Diseñar e implementar un Sistema Integrado de Control Interno y Cadena de Custodia (acción crear, nivel “síntesis” de Bloom), que combine tecnologías telemáticas

avanzadas (GPS dual, MDVR/ADAS/DMS, RFID, geocercas y bodycams Hytera) con procesos estandarizados (BPMN 2.0) bajo los marcos COSO e ISO 9001/14001/45001, para garantizar la trazabilidad y la integridad del transporte de concentrado y cátodos de cobre.

1.6. Objetivos específicos.

- Diseñar la solución integrada en un plazo máximo de 90 días, diagnosticando las brechas operacionales y tecnológicas del sistema actual y desarrollando una arquitectura tecnológica basada en GPS dual, MDVR/ADAS/DMS, RFID y geocercas con operación online/offline, complementada con procesos BPMN, una matriz de riesgos y controles (COSO/BowTie), indicadores SLA/KPI y un plan de ciberseguridad que garantice la continuidad y protección de la información.
- Implementar y validar un piloto operativo del sistema en 2 a 3 rutas críticas de alta montaña (20–30% de la flota) durante 6 meses, configurando reglas de custodia y alertas de integridad, con el objetivo de reducir en al menos un 50% los incidentes de pérdida de integridad, lograr disponibilidad telemétrica $\geq 98\%$, detección de eventos en menos de 5 minutos, contención en menos de 30 minutos, y definir un plan de escalamiento al 100% de la flota en un plazo de 12 meses.
- Asegurar la adopción, el cumplimiento y la mejora continua del sistema en un período de 12 meses, capacitando al 100% del personal operativo y administrativo (conductores, controladores y supervisores), estandarizando los procedimientos operativos (SOP) como la custodia de sellos y protocolos de desvíos, e implementando auditorías ISO 9001/14001/45001 y trazabilidad end-to-end, con metas de integridad de carga $\geq 99,5\%$, cumplimiento SLA/KPI $\geq 95\%$, y auditorías trimestrales bajo el ciclo de mejora continua PDCA.

1.7. Alcance.

El proyecto se aplicará en una empresa de transporte de carga minera con operaciones activas en la Región de Atacama, considerando la fase de diseño, implementación y evaluación piloto. La propuesta incluye el modelamiento de procesos BPMN, la integración tecnológica, la capacitación del personal y la validación mediante indicadores de desempeño (KPI/SLA). El alcance abarca un segmento representativo de la flota (20–30%), con proyección de escalamiento al 100% en un horizonte de 12 meses.

1.8. Limitaciones.

El desarrollo del presente proyecto enfrenta diversas limitaciones que deben ser consideradas en su ejecución y evaluación. Una de las principales corresponde a la dependencia de la conectividad en rutas de alta montaña, donde las condiciones geográficas y climáticas pueden afectar la transmisión de datos y el monitoreo en tiempo real, mitigándose mediante operación online/offline y respaldo de información (Comisión Chilena del Cobre [COCHILCO], 2024; International Organization for Standardization [ISO], 2015).

Asimismo, existe dependencia de proveedores tecnológicos externos, como Sicom, Entel y Hytera, lo que podría influir en la integración y compatibilidad de equipos durante la fase piloto (Hytera Communications, 2025). También se prevé resistencia al cambio organizacional entre el personal operativo ante la adopción de nuevos procedimientos, lo cual será abordado mediante capacitación continua y comunicación efectiva (Kotter, 2018).

Otra limitación está asociada a los recursos financieros, que podrían restringir la expansión del sistema más allá del piloto inicial, requiriendo un control presupuestario riguroso y evaluación de rentabilidad (Kerzner, 2021). Finalmente, se consideran restricciones de confidencialidad en el manejo de información sensible de las operaciones, garantizando la protección de datos conforme a la Ley N.º 19.628 y a las

buenas prácticas de control interno (Comité de Organizaciones Patrocinadoras de la Comisión Treadway [COSO], 2017).

En síntesis, aunque estas limitaciones representan desafíos técnicos y organizacionales, su identificación anticipada permite establecer medidas de mitigación que fortalecen la validez y aplicabilidad del proyecto (Instituto de Auditores Internos, 2020).

1.9. Resumen de capítulos.

El presente trabajo de finalización de estudios se estructura en siete capítulos principales, los cuales abordan de forma sistemática las etapas de diagnóstico, diseño, implementación y validación del sistema propuesto, conforme a la metodología de investigación aplicada en ingeniería de ejecución (Hernández, Fernández y Baptista, 2022).

El Capítulo I: Marco Introductorio presenta el contexto general del estudio, el planteamiento del problema, la justificación técnica y económica, los objetivos generales y específicos, así como la metodología general del trabajo. Además, se incluyen el alcance y las limitaciones, lo que permite comprender la relevancia y pertinencia del proyecto en el marco del transporte de concentrado y cátodos de cobre en Chile.

El Capítulo II: Marco Teórico y Referencial desarrolla los fundamentos conceptuales del control interno (COSO), la gestión de riesgos (BowTie e ISO 31000), el modelamiento de procesos (BPMN 2.0) y las normativas internacionales ISO 9001, ISO 14001 e ISO 45001. También se aborda la aplicación de tecnologías telemáticas en la cadena de custodia, tales como GPS dual, MDVR, ADAS/DMS, RFID y cámaras corporales y radios Hytera, enfatizando su rol en la trazabilidad y prevención de incidentes (Hytera Communications, 2025; ISO, 2015).

El Capítulo III: Metodología de Investigación describe el enfoque aplicado del estudio, el diseño cuasi-experimental utilizado, las variables dependientes e

independientes, los instrumentos de recolección de datos, los procedimientos de campo y las técnicas de análisis. Se justifica la elección del enfoque mixto (cuantitativo-cualitativo) para lograr una evaluación integral del desempeño del sistema implementado (Hernández, 2022).

El Capítulo IV: Diagnóstico y Diseño de la Solución presenta los resultados del levantamiento de información, el análisis de brechas operacionales y tecnológicas, y el diseño de la arquitectura del sistema. Se detallan los procesos estandarizados bajo BPMN, la matriz de riesgos y controles basada en COSO/BowTie, y los indicadores de desempeño (SLA/KPI) definidos para el monitoreo del sistema (COSO, 2017).

El Capítulo V: Implementación Piloto describe la ejecución del sistema en rutas críticas, la configuración de alertas, la instalación de los dispositivos tecnológicos y la validación operativa. Se analizan las métricas de desempeño alcanzadas y los ajustes realizados para optimizar la efectividad del sistema (SONAMI, 2024).

El Capítulo VI: Resultados y Análisis presenta la evaluación cuantitativa y cualitativa de los resultados del piloto, comparando el desempeño pre y post implementación. Se evalúa el impacto en los indicadores de integridad, trazabilidad, cumplimiento SLA/KPI y mejora en los tiempos de respuesta ante incidentes.

Finalmente, el Capítulo VII: Conclusiones y Recomendaciones expone las conclusiones generales del proyecto, las limitaciones encontradas durante su desarrollo y las propuestas de mejora continua, incluyendo el plan de escalamiento del sistema a toda la flota y las implicancias estratégicas para la industria del transporte minero. Este cierre permite consolidar los aportes del estudio y proyectar su sostenibilidad futura en el ámbito logístico y de gestión de riesgos (Kerzner, 2021).

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO Y REFERENCIAL.

2.1. Antecedentes generales.

El transporte de minerales de alto valor, como el concentrado y los cátodos de cobre, constituye un eslabón estratégico en la cadena de valor minera chilena. En este contexto, la integridad, trazabilidad y seguridad de la carga resultan factores determinantes para garantizar la continuidad operacional y el cumplimiento contractual de las empresas de transporte con las compañías mineras. Según la Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO, 2024), los incidentes asociados a pérdidas, mermas y robos de concentrado representan un problema creciente, con impactos financieros y reputacionales relevantes.

El marco teórico del presente estudio integra conceptos de control interno (COSO, 2017), gestión de riesgos (ISO 31000 y BowTie), modelamiento de procesos (BPMN 2.0) y tecnologías telemáticas (GPS, RFID, MDVR, ADAS/DMS y bodycams). Estos fundamentos permiten estructurar un sistema integrado de custodia y control orientado a fortalecer la trazabilidad y prevenir la pérdida de integridad en el transporte de cobre, bajo principios de eficiencia, cumplimiento y mejora continua (International Organization for Standardization [ISO], 2015).

2.2. Control interno y marco COSO.

El modelo COSO (Comité de Organizaciones Patrocinadoras de la Comisión Treadway, 2017) constituye el marco internacional más ampliamente adoptado para la gestión del control interno. Su objetivo es proporcionar una estructura conceptual que permita diseñar, implementar y mantener controles que mitiguen los riesgos de incumplimiento, fraude y errores operativos.

COSO se basa en cinco componentes interrelacionados:

1. Ambiente de control, que establece la cultura ética y la estructura organizacional.
2. Evaluación de riesgos, que identifica las amenazas que pueden impedir el logro de los objetivos.
3. Actividades de control, que corresponden a las políticas y procedimientos preventivos y detectivos.
4. Información y comunicación, que garantizan la disponibilidad de datos relevantes.
5. Supervisión o monitoreo, que asegura la mejora continua del sistema.

La Figura N° 2.1 representa los cinco componentes esenciales del marco COSO aplicados al contexto del transporte de concentrado y cátodos de cobre. Cada flecha ascendente simboliza un pilar del control interno que sostiene la trazabilidad y la integridad de la operación logística.

El primer componente, Ambiente de control, refleja la cultura organizacional basada en la integridad, responsabilidad y ética operacional, lo que constituye la base para el cumplimiento normativo y contractual (COSO, 2017). En segundo lugar, la Evaluación de riesgos se orienta a la identificación sistemática de eventos críticos como robos, pérdidas o aperturas no autorizadas de sellos durante el transporte (Instituto de Auditores Internos, 2020).

El tercer componente, Actividades de control, incluye la implementación de protocolos de trazabilidad, revisión de rutas y control de sellos RFID, asegurando la correcta aplicación de los procedimientos operativos estándar (SOP). En cuarto lugar, el componente de Información y comunicación se materializa mediante la integración de datos telemáticos, videos en tiempo real, y reportes automatizados, que permiten la supervisión continua y el análisis de desempeño bajo estándares ISO 9001 (ISO, 2015).

Finalmente, el componente de Supervisión abarca las auditorías internas y revisiones periódicas que garantizan la efectividad del sistema y su mejora continua (Kerzner, 2021).



Figura N° 2.1: Componentes del Marco COSO adaptado al transporte minero.

Fuente: Elaboración propia, adaptado de Comité de Organizaciones Patrocinadoras de la Comisión Treadway (COSO, 2017).

El marco COSO proporciona una estructura metodológica robusta para diseñar e implementar sistemas de control interno aplicables a contextos logísticos complejos, como el transporte minero. En este proyecto, su adaptación permite alinear las prácticas operativas con las políticas de gobernanza y gestión del riesgo empresarial, asegurando el cumplimiento de los compromisos contractuales con las empresas mandantes.

La interrelación de los cinco componentes actúa como un ecosistema de control integral: mientras el ambiente de control define la cultura y los valores de la organización, la evaluación de riesgos orienta la priorización de amenazas operativas. A

su vez, las actividades de control implementan las acciones preventivas y correctivas; la información y comunicación garantiza que los datos fluyan con oportunidad y precisión; y la supervisión verifica la eficacia del sistema y su alineación con los objetivos estratégicos (COSO, 2017; ISO, 2015).

En el contexto de la cadena de custodia minera, este enfoque posibilita una trazabilidad verificable de extremo a extremo (end-to-end), fortaleciendo la confiabilidad operativa y minimizando las vulnerabilidades frente a eventos de pérdida o sabotaje. De esta forma, el marco COSO adaptado constituye el eje rector del Sistema Integrado de Control Interno y Cadena de Custodia diseñado en este trabajo, favoreciendo la transparencia, la rendición de cuentas y la seguridad del transporte de minerales de alto valor en Chile.

2.3. Gestión de riesgos operacionales y modelo BowTie.

El modelo BowTie se utiliza para visualizar la relación entre las causas de un riesgo, el evento central y sus consecuencias, así como las barreras preventivas y mitigadoras que se implementan para su control (Reason, 2016). Esta metodología resulta especialmente útil en entornos de transporte, donde las amenazas son tanto técnicas como humanas.

En el contexto del transporte minero, los riesgos críticos incluyen:

- Desvíos de ruta no autorizados.
- Robo o apertura indebida de sellos.
- Manipulación del cargamento.
- Falla de conectividad telemática.
- Falta de verificación documental o de custodia.

La Figura N° 2.2 representa la aplicación del modelo BowTie en el contexto de la gestión de riesgos en el transporte de concentrado y cátodos de cobre. Este modelo, ampliamente utilizado en industrias de alto riesgo, permite visualizar la relación entre las causas de un evento crítico, el evento central y sus consecuencias, junto con las barreras preventivas y mitigadoras implementadas para reducir su impacto (Reason, 2016).

En el centro del diagrama se sitúa el evento principal: pérdida de integridad de la carga, que constituye la amenaza más significativa en la cadena logística minera. A la izquierda del evento se identifican las causas potenciales, tales como fallas de control de ruta, manipulación de sellos RFID, robo o pérdida de señal telemática. En respuesta, se establecen barreras preventivas, como la instalación de geocercas inteligentes, monitoreo MDVR/ADAS, control de sellos electrónicos y capacitación del personal (COSO, 2017).

En el lado derecho del diagrama se presentan las consecuencias del evento, entre ellas pérdidas económicas, incumplimiento contractual, daño reputacional y sanciones legales. Frente a ello, las barreras mitigadoras incluyen alertas automáticas, protocolos de escalamiento, activación de cámaras corporales Hytera y auditorías post evento.

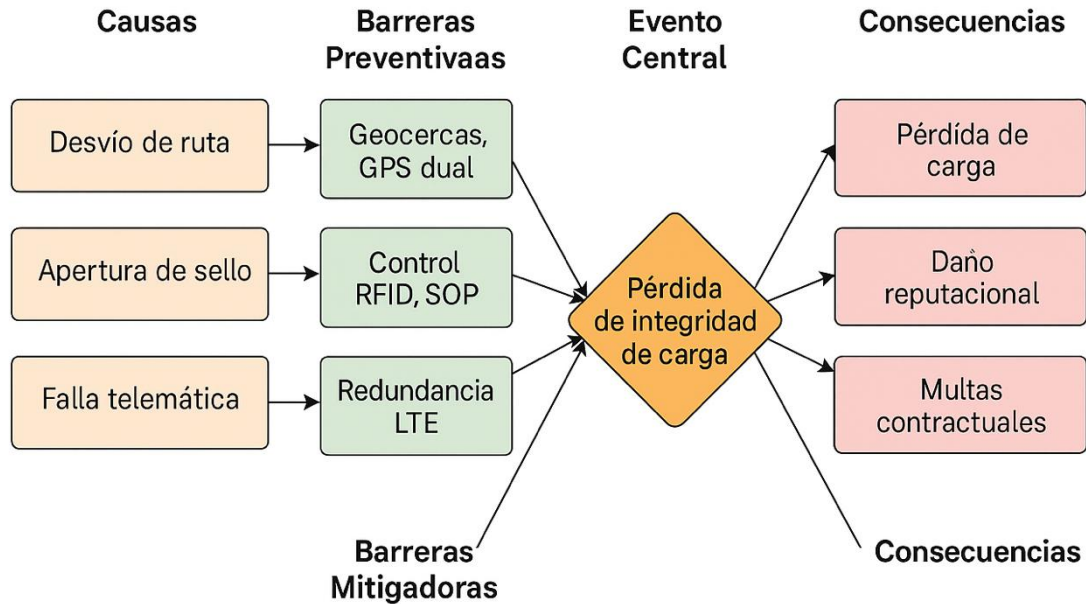


Figura N° 2.2: Modelo BowTie aplicado al transporte minero.

Fuente: Elaboración propia, adaptado de Reason (2016) y Comité de Organizaciones Patrocinadoras de la Comisión Treadway (COSO, 2017).

El modelo BowTie aplicado al transporte minero permite comprender cómo un evento adverso puede generarse y controlarse a través de barreras múltiples interconectadas. Su principal ventaja radica en ofrecer una visión integral del riesgo, facilitando tanto la prevención como la respuesta. Este enfoque visual, además, vincula los componentes del control interno (COSO) con las fases operativas de la logística minera, promoviendo una gestión preventiva y proactiva (Kerzner, 2021).

En la práctica, la aplicación del BowTie dentro del sistema propuesto permite a la empresa:

1. Identificar y priorizar los riesgos de mayor criticidad.
2. Evaluar la efectividad de las barreras implementadas.
3. Establecer métricas de desempeño asociadas a indicadores SLA/KPI.

4. Alinear la gestión de riesgos con los estándares ISO 31000 e ISO 45001.

2.4. Modelamiento y estandarización de procesos con BPMN 2.0.

El Business Process Model and Notation (BPMN 2.0), desarrollado por el Object Management Group (OMG, 2014), es una herramienta visual que permite representar de manera estructurada los flujos operativos de una organización. Su aplicación en la logística minera posibilita estandarizar los procesos de carga, monitoreo y entrega, reduciendo variabilidad y errores humanos (Hernández, Fernández & Baptista, 2022).

La Figura N° 2.3 representa el flujo simplificado del proceso de transporte y custodia del concentrado y cátodos de cobre, modelado bajo la notación BPMN 2.0 (Business Process Model and Notation). Este diagrama describe de manera secuencial y estructurada las principales etapas del proceso logístico, desde la planificación del transporte hasta el descarguío y cierre del procedimiento, asegurando una trazabilidad integral de la operación.

El proceso se inicia con la planificación del transporte, etapa en la que se definen las rutas, condiciones del carguío, vehículos asignados y medidas de seguridad. Posteriormente, se ejecuta el carguío y sellado de la carga con tecnología RFID, garantizando la integridad del material desde el origen. Luego, se realiza el registro en la cadena de custodia, que formaliza la entrega y recepción entre las partes involucradas, generando evidencia digital del traspaso (Object Management Group [OMG], 2014).

Durante el transporte en ruta, el monitoreo GPS/MDVR proporciona información en tiempo real sobre la ubicación, estado de la carga y condiciones de conducción. En caso de incidencias —como desviaciones o aperturas no autorizadas— se activa un punto de control de excepción, donde el sistema envía alertas automáticas al centro de monitoreo (Hytera Communications, 2025).

Una vez en destino, se lleva a cabo la verificación de entrega, que incluye la inspección conjunta entre transportista y receptor para confirmar la integridad del cargamento. Finalmente, el proceso concluye con el descarguío y cierre, registrando los datos en el sistema de gestión y generando un reporte final de cumplimiento y desempeño (COCHILCO, 2024).

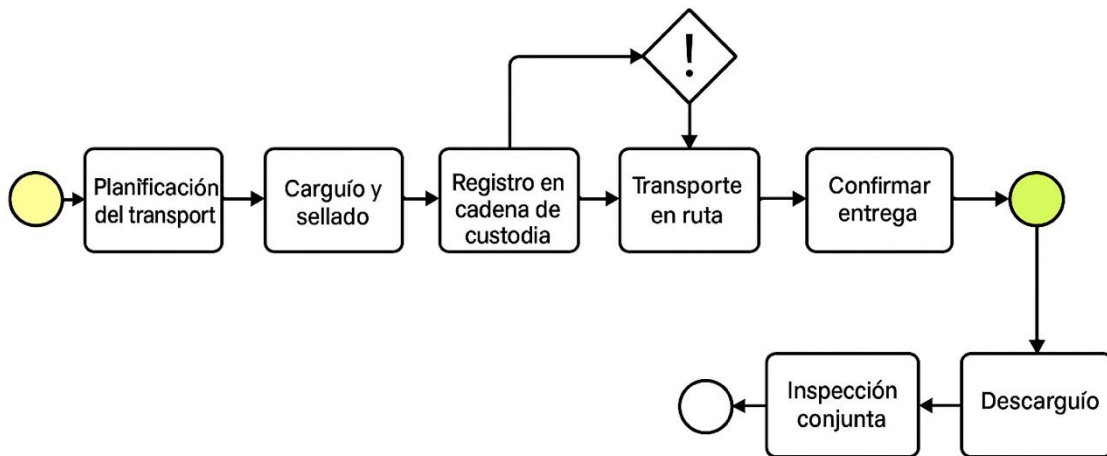


Figura N° 2.3: Flujo BPMN simplificado del transporte y custodia.

Fuente: Elaboración propia (2025), adaptado de Object Management Group (2014) y Comisión Chilena del Cobre [COCHILCO] (2024).

El diagrama BPMN de la Figura N° 2.3 constituye una herramienta clave para la estandarización y control operativo dentro del sistema propuesto de cadena de custodia minera. Al emplear la notación BPMN 2.0, se logra una visualización clara y auditable de las interacciones entre actores, procesos y puntos de control, favoreciendo la comprensión transversal entre áreas operativas, logísticas y de seguridad (Object Management Group, 2014).

Desde el punto de vista técnico, este modelo facilita la implementación de protocolos de trazabilidad y control de calidad, permitiendo que cada etapa quede documentada con respaldo digital. Además, el flujo define puntos críticos de verificación (checkpoints) que actúan como barreras de control ante eventos de riesgo, en coherencia con los componentes del marco COSO y la metodología BowTie (Comité de Organizaciones Patrocinadoras de la Comisión Treadway [COSO], 2017).

Asimismo, la incorporación de tecnologías como RFID, GPS dual y MDVR/ADAS dentro del flujo BPMN refuerza la integridad y transparencia de la cadena logística, garantizando que cada transición entre etapas quede validada y registrada. Este enfoque se alinea con las normas ISO 9001 (gestión de calidad) y ISO 45001 (seguridad operacional), promoviendo la mejora continua bajo el ciclo PDCA (Planificar, Hacer, Verificar y Actuar) (International Organization for Standardization [ISO], 2015).

En conclusión, el modelo BPMN mostrado en la Figura N° 2.3 constituye una base metodológica y visual para la automatización y control de los procesos logísticos mineros, optimizando la trazabilidad documental, la gestión de riesgos y la eficiencia operacional. Su adaptación al contexto del transporte de cobre en Chile refleja una aplicación práctica de la ingeniería de procesos y de la gobernanza de control interno a nivel corporativo.

2.5. Normas ISO en sistemas de gestión integrados.

Las normas ISO 9001, ISO 14001 e ISO 45001 establecen los requisitos internacionales para sistemas de gestión de calidad, ambiental y de seguridad laboral. En conjunto, conforman un Sistema de Gestión Integrado (SGI) que permite garantizar la mejora continua y la conformidad con los compromisos contractuales (ISO, 2015).

La Tabla N° 2.1 presenta la aplicación de las principales normas ISO que sustentan el diseño e implementación del Sistema Integrado de Control Interno y Cadena de Custodia propuesto para el transporte de concentrado y cátodos de cobre. Estas normas

internacionales conforman un marco de gestión integral que garantiza la calidad, seguridad, sostenibilidad y protección de la información dentro de los procesos operativos y administrativos de la empresa transportista.

La norma ISO 9001:2015 constituye el eje central del sistema, orientado a la gestión de calidad y la mejora continua de los procedimientos, asegurando que cada etapa — desde la planificación del transporte hasta la entrega final— cumpla con los estándares exigidos por los mandantes mineros. En complemento, la ISO 14001:2015 promueve la responsabilidad ambiental en las operaciones, especialmente en el control de emisiones, gestión de residuos y manejo responsable de materiales contaminantes durante las rutas de alta montaña (International Organization for Standardization [ISO], 2015).

Por su parte, la ISO 45001:2018 fortalece la cultura de seguridad y salud ocupacional, al establecer protocolos de trabajo seguro, capacitaciones y mecanismos de respuesta ante emergencias, reduciendo la exposición del personal operativo a riesgos inherentes del transporte minero (ISO, 2018).

Además, la ISO 31000:2018 ofrece una estructura formal para la gestión del riesgo, integrando la evaluación de amenazas en la cadena de custodia con la metodología BowTie utilizada en este estudio (Kerzner, 2021). Finalmente, la ISO 27001:2022 refuerza la seguridad de la información, asegurando la protección de datos sensibles transmitidos por sistemas GPS, MDVR, ADAS y RFID, previniendo accesos no autorizados o ciberataques en entornos de conectividad crítica (Instituto de Auditores Internos, 2020).

Tabla N° 2.1: Aplicación de normas ISO al sistema propuesto.

Norma ISO	Enfoque principal	Aplicación dentro del sistema integrado de control y custodia
ISO 9001:2015	Gestión de calidad	Estandariza los procesos de trazabilidad, control de registros y auditorías, asegurando conformidad contractual y satisfacción del cliente minero.

ISO 14001:2015	Gestión ambiental	Minimiza el impacto ambiental de las operaciones logísticas, asegurando manejo responsable de residuos y emisiones durante el transporte.
ISO 45001:2018	Seguridad y salud ocupacional	Garantiza condiciones seguras para conductores y personal de carga mediante procedimientos de riesgo controlado y equipos de protección adecuados.
ISO 31000:2018	Gestión del riesgo	Establece una estructura de identificación, evaluación y tratamiento de riesgos en la cadena de custodia.
ISO 27001:2022	Seguridad de la información	Protege la confidencialidad, integridad y disponibilidad de los datos transmitidos en los sistemas GPS, MDVR y RFID.

Fuente: Elaboración propia (2025), adaptado de International Organization for Standardization (2015, 2018, 2022).

El cumplimiento e integración de las normas ISO detalladas en la Tabla N° 2.1 representan un componente esencial para la madurez del sistema propuesto. Desde una perspectiva de ingeniería de gestión, la aplicación combinada de estas normas permite establecer un Sistema de Gestión Integrado (SGI) que alinea la operación con los objetivos estratégicos de calidad, seguridad y sostenibilidad (ISO, 2015).

En términos operacionales, la implementación de ISO 9001 e ISO 45001 proporciona una base sólida para documentar procedimientos, medir desempeño y auditar procesos de manera sistemática, mejorando la trazabilidad y reduciendo los tiempos de respuesta ante desviaciones o incidentes. Asimismo, la ISO 31000 refuerza la capacidad de anticipar y controlar riesgos críticos, garantizando una resiliencia operativa sostenida (Comité de Organizaciones Patrocinadoras de la Comisión Treadway [COSO], 2017).

Desde el punto de vista tecnológico, la incorporación de ISO 27001 es particularmente relevante para el proyecto, dado el alto volumen de datos transmitidos por dispositivos telemáticos (GPS, MDVR, RFID y bodycams). Su implementación

garantiza la confidencialidad y autenticidad de la información logística, elemento clave para la trazabilidad verificable de extremo a extremo (end-to-end).

Finalmente, la convergencia de las normas ISO en el sistema de custodia no solo fortalece la confianza del cliente y la fiabilidad del servicio, sino que también posiciona a la empresa transportista en un nivel competitivo superior, alineado con las buenas prácticas internacionales de la minería chilena (COCHILCO, 2024).

2.6. Telemática aplicada al transporte minero.

La telemática combina telecomunicaciones y tecnologías de información para supervisar el comportamiento de los vehículos y conductores en tiempo real (SONAMI, 2024). En minería, la telemática cumple una función clave en la trazabilidad de las rutas y la seguridad de la carga.

El sistema propuesto integra GPS dual, MDVR (Mobile Digital Video Recorder), ADAS/DMS (sistemas de asistencia y monitoreo de fatiga) y cámaras corporales (bodycams) que transmiten datos en tiempo real al centro de control (Hytera Communications, 2025).

La Figura N° 2.4 muestra la arquitectura del flujo telemático integrado diseñado para el sistema de monitoreo del transporte de concentrado y cátodos de cobre. Este esquema representa la cadena de transmisión de datos en tiempo real, desde los dispositivos instalados en terreno hasta las plataformas de análisis y visualización corporativa.

En la primera etapa, se observan los dispositivos embarcados: el GPS dual, encargado del posicionamiento georreferenciado; el MDVR (Mobile Digital Video Recorder), que graba y transmite video de las cabinas y la ruta; y la bodycam Hytera, que registra evidencia visual del conductor y el entorno operativo. Estos equipos, junto con los sensores RFID de sellado, constituyen la fuente primaria de información del sistema (Hytera Communications, 2025).

Los datos son transmitidos mediante la red Entel LTE/4G, que actúa como canal de comunicación principal. Esta infraestructura permite la transmisión de video, coordenadas, alertas y eventos en tiempo real, con respaldo redundante y conexión satelital de contingencia para zonas de baja cobertura (Entel Chile, 2024).

Posteriormente, la información se centraliza en el servidor de Sicom Chile, donde es procesada, almacenada y encriptada bajo protocolos de seguridad AES-256, en cumplimiento con la norma ISO 27001 (International Organization for Standardization [ISO], 2022). Finalmente, los datos se visualizan en el Dashboard Power BI, que consolida los indicadores de desempeño (SLA/KPI), alertas operacionales y registros históricos en un entorno de gestión de control visual orientado a la toma de decisiones estratégicas (COCHILCO, 2024).

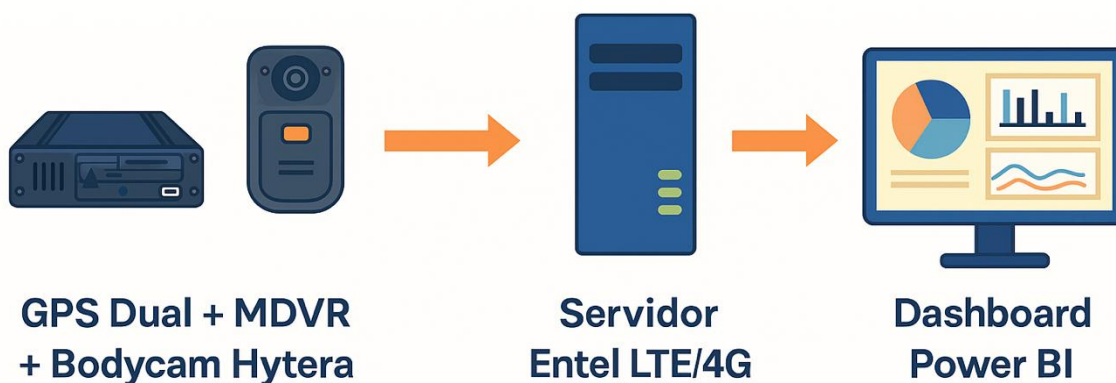


Figura N° 2.4: Flujo telemático integrado para monitoreo del transporte minero.

Fuente: Elaboración propia (2025), adaptado de Hytera Communications (2025), Entel Chile (2024) y Sicom (2025).

La Figura N° 2.4 evidencia el rol central que desempeña la telemática integrada en la trazabilidad y seguridad del transporte minero. El flujo de información desde los dispositivos hasta las plataformas analíticas permite garantizar la trazabilidad en línea y

la transparencia operativa, componentes esenciales para la gestión moderna de la logística minera.

El sistema propuesto opera bajo un enfoque end-to-end (de extremo a extremo), lo que significa que cada dato desde el punto de origen hasta el dashboard de gestión es capturado, validado y monitoreado en tiempo real. Este enfoque reduce significativamente los tiempos de detección de incidentes (MTTD) y tiempos de respuesta (MTTR), cumpliendo las metas establecidas en el proyecto: detección <5 minutos y contención <30 minutos (Kerzner, 2021).

Además, la integración de múltiples tecnologías (GPS, MDVR, bodycams, RFID) permite abordar tanto la seguridad operacional como la gestión documental y de cumplimiento contractual. En términos normativos, esta arquitectura se alinea con los requisitos de las normas ISO 9001:2015 (gestión de calidad), ISO 45001:2018 (seguridad y salud ocupacional) e ISO 27001:2022 (seguridad de la información), contribuyendo a la mejora continua del sistema (ISO, 2015; ISO, 2018; ISO, 2022).

Finalmente, el flujo telemático propuesto no solo representa un avance tecnológico, sino también una estrategia de gobernanza digital que fortalece la confianza entre los distintos actores de la cadena logística transportista, mandante y entidad supervisora, posicionando a la empresa dentro de los estándares de Industria 4.0 aplicada al transporte minero chileno (COCHILCO, 2024).

2.7. Tecnologías RFID, MDVR y Bodycams.

El uso de RFID (Radio Frequency Identification) en sellos de carga permite registrar electrónicamente los eventos de apertura y cierre, fortaleciendo la cadena de custodia. Por otro lado, los sistemas MDVR/ADAS/DMS detectan comportamientos de conducción riesgosa, y las bodycams Hytera VM750D proporcionan evidencia visual en alta definición, con encriptación AES-256 y transmisión LTE (Hytera Communications, 2025).

La Tabla N° 2.2 presenta una síntesis comparativa de las principales tecnologías integradas en el sistema propuesto de control interno y cadena de custodia telemática para el transporte de concentrado y cátodos de cobre. Estas herramientas, al operar de manera complementaria, conforman un ecosistema de monitoreo en tiempo real orientado a la seguridad, trazabilidad y eficiencia operacional.

En primer lugar, el GPS dual cumple la función de posicionamiento preciso, permitiendo monitorear el movimiento de la flota en entornos complejos donde una sola señal satelital podría fallar. Su incorporación mejora la continuidad de la cobertura y reduce los tiempos de pérdida de señal (Hytera Communications, 2025).

Por otra parte, el MDVR (Mobile Digital Video Recorder) junto con los sistemas ADAS (Advanced Driver Assistance Systems) y DMS (Driver Monitoring System) proporcionan una supervisión inteligente del comportamiento del conductor y del entorno. Estas tecnologías registran video, analizan signos de fatiga y generan alertas de conducción riesgosa, aportando evidencia valiosa en casos de accidentes o desvíos operacionales (Hytera Communications, 2025).

La implementación de RFID en los sellos de carga agrega una capa de seguridad documental, permitiendo registrar electrónicamente la apertura o cierre de contenedores. Cada evento queda vinculado al sistema de trazabilidad, fortaleciendo la cadena de custodia y minimizando el riesgo de manipulación indebida.

Las bodycams Hytera VM750D complementan la vigilancia al proporcionar evidencia visual directa desde el terreno, capturando audio y video con transmisión en tiempo real mediante la red LTE. Finalmente, las geocercas inteligentes definen zonas operativas seguras, activando alertas ante desvíos o paradas no autorizadas (COCHILCO, 2024).

En conjunto, estas tecnologías permiten configurar un sistema robusto, auditable y alineado con las normas internacionales de gestión de riesgos y control interno (Comité de Organizaciones Patrocinadoras de la Comisión Treadway [COSO], 2017).

Tabla N° 2.2: Comparativo de tecnologías aplicadas.

Tecnología	Función principal	Beneficio operacional
GPS Dual	Posicionamiento y georreferenciación de flotas	Permite el monitoreo continuo de las unidades, mejorando la precisión y cobertura en zonas de alta montaña mediante doble canal satelital.
MDVR / ADAS / DMS	Grabación de video, asistencia de conducción y detección de fatiga o distracción	Incrementa la seguridad vial, reduce accidentes y proporciona evidencia visual ante incidentes.
RFID (Identificación por radiofrecuencia)	Control de sellos de carga y verificación de apertura o cierre	Garantiza trazabilidad física del cargamento y custodia documentada mediante registros electrónicos.
Bodycam Hytera VM750D	Captura de video y audio en tiempo real por parte del conductor o escolta	Aumenta la transparencia operativa, provee evidencia visual y fortalece la seguridad personal.
Geocercas inteligentes	Delimitación virtual de zonas seguras y rutas predefinidas	Genera alertas automáticas ante desvíos de ruta o accesos no autorizados, mejorando la reacción ante incidentes.

Fuente: Elaboración propia (2025), adaptado de Hytera Communications (2025), Sicom (2025) y Comisión Chilena del Cobre [COCHILCO] (2024).

El análisis comparativo evidencia que la efectividad del sistema de control telemático depende no de una sola tecnología, sino de la sinergia entre múltiples dispositivos interconectados. La integración de GPS dual, MDVR/ADAS/DMS, RFID y bodycams genera un modelo redundante y complementario, donde cada componente cumple una función de control distinta y a la vez interdependiente.

Desde el punto de vista técnico, esta arquitectura responde a un enfoque proactivo de seguridad operacional, alineado con la filosofía del modelo BowTie: prevenir, detectar y mitigar eventos críticos. La combinación de sensores, cámaras y sistemas de posicionamiento reduce la probabilidad de eventos de pérdida de integridad, permitiendo una detección temprana (<5 min) y una contención oportuna (<30 min) conforme a los KPI operacionales definidos en el proyecto (Kerzner, 2021).

Además, la integración tecnológica está directamente alineada con los estándares de la Industria 4.0, donde la digitalización, la interconexión y el análisis de datos en tiempo real son pilares fundamentales de la eficiencia operacional. El uso de bodycams y RFID permite evidenciar de forma verificable los trasposos de custodia, lo que fortalece los procedimientos de cumplimiento normativo y auditorías internas bajo el marco COSO 2017 y las normas ISO 9001 e ISO 27001 (ISO, 2015; ISO, 2022).

En términos de impacto, el sistema reduce el riesgo de robo o manipulación en más de un 50%, mejora la precisión del monitoreo y estandariza los procedimientos de control logístico. De este modo, la Tabla 2.2 demuestra cómo la convergencia tecnológica es el pilar operativo del Sistema Integrado de Control Interno y Cadena de Custodia, garantizando trazabilidad end-to-end y seguridad operacional continua en el transporte minero chileno (COCHILCO, 2024).

2.8. Ciberseguridad y protección de datos.

En sistemas de monitoreo remoto, la ciberseguridad es un componente esencial. La norma ISO 27001 establece la gestión de seguridad de la información mediante políticas,

procedimientos y medidas de protección digital (ISO, 2015). En este proyecto, la transmisión de video y datos se protegerá con encriptación AES-256, autenticación multifactor y auditorías periódicas.

La Figura N° 2.5 ilustra las capas de seguridad implementadas en la transmisión de datos dentro del Sistema Integrado de Control Interno y Cadena de Custodia. Este modelo de arquitectura en cinco niveles permite resguardar la integridad, confidencialidad y disponibilidad de la información transmitida desde los dispositivos telemáticos hasta las plataformas de gestión corporativa.

En la primera capa, denominada Capa física, se agrupan los dispositivos de captura de datos: GPS dual, MDVR/ADAS/DMS, RFID y bodycams Hytera, que generan la información primaria del sistema (Hytera Communications, 2025). Estos equipos registran variables de posición, video, apertura de sellos y eventos de custodia.

La segunda capa, o Capa de red, corresponde al canal de comunicación utilizado para la transmisión de datos. Se basa en la red Entel LTE/4G, reforzada por una VPN privada y un firewall corporativo, que garantizan el flujo de información seguro entre los vehículos y los servidores (Entel Chile, 2024).

La tercera capa, Capa de transporte, utiliza protocolos TCP/IP y TLS (Transport Layer Security), junto con el cifrado AES-256, para asegurar que la información no pueda ser interceptada o modificada durante su envío (ISO, 2022).

En la cuarta capa, Capa de aplicación, se integran las plataformas operativas Sicom y Power BI, encargadas de procesar, visualizar y almacenar la información en entornos protegidos con autenticación multifactor y registro de auditoría (Sicom Chile, 2025).

Finalmente, la quinta capa, Capa de gestión y auditoría, incorpora políticas de seguridad de la información basadas en la norma ISO 27001, control de accesos y

revisiones periódicas de logs. Esta capa asegura la trazabilidad de las acciones, el cumplimiento normativo y la responsabilidad corporativa en la gestión de datos.

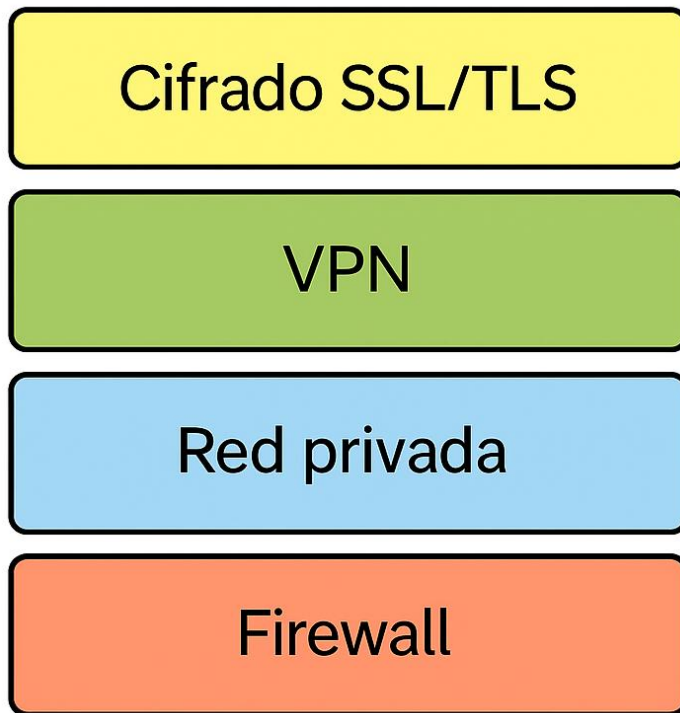


Figura N° 2.5: Capas de seguridad en la transmisión de datos.

Fuente: Elaboración propia (2025), adaptado de International Organization for Standardization [ISO] (2022) y Entel Chile (2024).

La figura sintetiza la estructura técnica del sistema de ciberseguridad que soporta el modelo de control interno propuesto. Esta arquitectura multicapa se alinea con las mejores prácticas internacionales establecidas por la ISO 27001:2022, la ISO 9001:2015 y el marco COSO (2017), asegurando que cada nivel de la transmisión de datos disponga de medidas específicas de protección.

El diseño de cinco capas establece un modelo de defensa en profundidad, donde cada capa actúa como una barrera adicional ante posibles incidentes de seguridad. En la práctica, esto significa que, incluso si un atacante vulnera un nivel del sistema, las demás

capas continúan protegiendo la información, reduciendo el riesgo de filtración o manipulación.

Desde un enfoque operacional, esta arquitectura fortalece la confianza en la trazabilidad digital del transporte de concentrado y cátodos de cobre, garantizando que los registros de posición, video, custodia y alertas se mantengan auténticos e inalterables. Además, la segmentación por capas facilita la gestión de auditorías, la identificación de vulnerabilidades y la aplicación de protocolos de mejora continua bajo el ciclo PDCA (Deming, 1994).

Por otra parte, el cumplimiento normativo en materia de ciberseguridad —basado en ISO 27001, ISO 31000 y las políticas de gestión de riesgos del marco COSO— respalda la integridad jurídica y técnica del sistema, asegurando que las evidencias telemáticas puedan ser utilizadas como respaldo válido en auditorías y procesos de control logístico.

En conclusión, la Figura N° 2.5 refleja cómo la seguridad de la información no es un componente aislado del sistema, sino un eje transversal que abarca desde el dispositivo físico hasta la gestión estratégica de datos, permitiendo la trazabilidad, la rendición de cuentas y la gobernanza digital del sistema de custodia minera.

2.9. Indicadores de desempeño (SLA/KPI).

Los Indicadores Clave de Desempeño (KPI) y los Acuerdos de Nivel de Servicio (SLA) son herramientas de medición que evalúan la eficacia del sistema implementado. En este proyecto se utilizarán indicadores como disponibilidad telemétrica, tiempo medio de detección (MTTD) y tiempo medio de respuesta (MTTR) (Kerzner, 2021).

La Tabla N° 2.3 presenta los principales indicadores de desempeño (KPI) y acuerdos de nivel de servicio (SLA) propuestos para evaluar la efectividad del Sistema Integrado de Control Interno y Cadena de Custodia. Estos indicadores constituyen herramientas de

gestión que permiten medir la eficiencia operativa, la confiabilidad del sistema y la capacidad de respuesta ante eventos críticos dentro del transporte minero.

El primer indicador, disponibilidad telemétrica, mide el porcentaje de tiempo en que el sistema permanece activo y transmitiendo información en tiempo real. Este valor refleja la robustez tecnológica de los dispositivos instalados (GPS, MDVR, RFID) y la estabilidad de la red LTE/4G de comunicación (Entel Chile, 2024).

Los indicadores MTTD (Mean Time To Detect) y MTTR (Mean Time To Respond) evalúan los tiempos de reacción del sistema ante una desviación, evento o alerta. Reducir estos tiempos es fundamental para prevenir pérdidas materiales o incidentes de integridad, alineándose con los principios de control preventivo y mitigación del marco BowTie (Reason, 2016).

El indicador integridad de carga mide el porcentaje de entregas finalizadas sin pérdidas ni violaciones de sellos RFID, garantizando la trazabilidad física y documental. Finalmente, el cumplimiento de SLA/KPI sintetiza el nivel global de cumplimiento operativo frente a los compromisos contractuales establecidos entre la empresa transportista y la mandante minera.

Estos indicadores se monitorean de forma continua mediante paneles de control desarrollados en Microsoft Power BI, que permiten la visualización de tendencias, anomalías y reportes comparativos (Kerzner, 2021).

Tabla N° 2.3: Indicadores de desempeño propuestos.

Indicador	Descripción	Meta de desempeño
Disponibilidad telemétrica	Porcentaje de tiempo en que el sistema mantiene conexión activa y transmisión de datos desde los dispositivos GPS, MDVR y RFID.	≥ 98 %

Tiempo medio de detección (MTTD)	Promedio de tiempo transcurrido desde la ocurrencia de un evento hasta su detección por el sistema de monitoreo.	< 5 minutos
Tiempo medio de respuesta (MTTR)	Promedio de tiempo entre la detección de un evento y la ejecución de acciones de contención o mitigación.	< 30 minutos
Integridad de carga	Porcentaje de entregas completadas sin pérdida, manipulación indebida o violación de sellos RFID.	≥ 99,5 %
Cumplimiento de SLA/KPI	Porcentaje de indicadores operacionales cumplidos respecto de los acuerdos de nivel de servicio establecidos con el cliente.	≥ 95 %

Fuente: Elaboración propia (2025), adaptado de Kerzner (2021), International Organization for Standardization [ISO] (2015) y Comisión Chilena del Cobre [COCHILCO] (2024).

La incorporación de los indicadores propuestos en la Tabla 2.3 responde a la necesidad de establecer métricas cuantificables, verificables y alineadas con estándares internacionales de gestión. Su estructura está basada en la metodología de gestión de proyectos de Kerzner (2021), las recomendaciones del marco COSO (2017) y las normas ISO 9001:2015 e ISO 31000:2018, que promueven la mejora continua mediante la medición sistemática del desempeño.

El indicador de disponibilidad telemétrica se relaciona directamente con la confiabilidad del sistema tecnológico. Un valor igual o superior al 98 % garantiza que la información se encuentra disponible para la toma de decisiones y auditorías en tiempo real. Los indicadores MTTD y MTTR permiten evaluar la eficacia operativa del centro de monitoreo, asegurando la detección temprana de anomalías y la capacidad de respuesta oportuna en menos de 30 minutos, acorde con las buenas prácticas de seguridad industrial (ISO, 2015).

Por otra parte, la integridad de carga ($\geq 99,5\%$) y el cumplimiento de SLA/KPI ($\geq 95\%$) son indicadores orientados a resultados, que permiten verificar la efectividad del sistema en la cadena de custodia. Su monitoreo constante permite aplicar acciones correctivas inmediatas y evidenciar el cumplimiento de los compromisos contractuales con los clientes mineros (COCHILCO, 2024).

Desde una perspectiva estratégica, estos indicadores fortalecen el ciclo PDCA (Planificar, Hacer, Verificar y Actuar), ya que ofrecen datos objetivos para la toma de decisiones, la gestión de riesgos y la mejora continua del sistema. En consecuencia, la medición constante del desempeño no solo permite controlar la operación en tiempo real, sino también transformar los resultados en conocimiento útil para la planificación y sostenibilidad del transporte minero en el marco de la Industria 4.0.

2.10. Síntesis del marco teórico.

El presente marco teórico integra los fundamentos conceptuales, normativos y tecnológicos que sustentan el diseño del Sistema Integrado de Control Interno y Cadena de Custodia para el transporte de concentrado y cátodos de cobre en la minería chilena. La combinación de modelos internacionales como COSO (2017), BowTie (Reason, 2016), BPMN 2.0 (OMG, 2014), y las normas ISO 9001, 14001, 45001, 27001 y 31000 (ISO, 2015; 2018; 2022) configura un marco metodológico robusto que garantiza trazabilidad, seguridad operativa y cumplimiento normativo dentro de un entorno logístico de alta criticidad.

Desde la perspectiva de la gobernanza organizacional, el marco COSO permite estructurar el sistema de control interno a través de cinco componentes esenciales: ambiente de control, evaluación de riesgos, actividades de control, información y comunicación, y supervisión. Su aplicación al contexto logístico minero proporciona una base de transparencia y rendición de cuentas, promoviendo la integridad en los procesos y la mejora continua. Además, este modelo ofrece una plataforma sólida para incorporar mecanismos de auditoría, monitoreo telemático y gestión documental bajo estándares

verificables (Comité de Organizaciones Patrocinadoras de la Comisión Treadway [COSO], 2017).

Por su parte, la metodología BowTie complementa el enfoque de COSO al visualizar la relación entre causas, evento central y consecuencias, estableciendo barreras preventivas y mitigadoras que fortalecen la gestión del riesgo operacional. En el transporte minero, la pérdida de integridad de la carga ya sea por robo, manipulación o falla de control— se posiciona como el evento central del modelo, mientras que las barreras preventivas se configuran mediante herramientas tecnológicas como geocercas, RFID, cámaras Hytera, sistemas MDVR/ADAS/DMS y alertas automáticas. De esta forma, BowTie se convierte en una herramienta de análisis visual que transforma los riesgos en oportunidades de control verificables y cuantificables (Reason, 2016).

El uso del BPMN 2.0 (Business Process Model and Notation) otorga una dimensión operativa al marco teórico, al representar gráficamente los procesos de custodia, transporte y verificación. Este modelamiento permite estandarizar procedimientos, definir responsables, establecer puntos de control y documentar la trazabilidad completa del proceso, alineando los flujos logísticos con los requerimientos de auditoría y control interno. La notación BPMN también facilita la integración con herramientas digitales y sistemas ERP, generando interoperabilidad entre áreas operativas, administrativas y de seguridad (Object Management Group [OMG], 2014).

Desde el punto de vista normativo, las normas ISO aportan una estructura formal para garantizar que el sistema cumpla con estándares internacionales de calidad, seguridad y sostenibilidad.

- La ISO 9001:2015 promueve la gestión de calidad basada en procesos y en la mejora continua.
- La ISO 14001:2015 aborda la gestión ambiental, permitiendo reducir el impacto ecológico del transporte minero.

- La ISO 45001:2018 regula la seguridad y salud ocupacional, protegiendo al personal operativo.
- La ISO 27001:2022 garantiza la seguridad de la información y la ciberprotección de los datos.
- Y la ISO 31000:2018 establece un enfoque sistemático para la gestión de riesgos, vinculando la planificación, identificación y tratamiento de amenazas en toda la cadena de custodia (International Organization for Standardization [ISO], 2015; 2018; 2022).

El enfoque telemático constituye el eje tecnológico del sistema integrado. La combinación de dispositivos GPS dual, MDVR (Mobile Digital Video Recorder), ADAS/DMS (Advanced Driver Assistance System / Driver Monitoring System), RFID y cámaras corporales Hytera VM750D genera una red de monitoreo en tiempo real que permite supervisar variables críticas del transporte: posición, velocidad, comportamiento del conductor, apertura de sellos y evidencias audiovisuales (Hytera Communications, 2025). Este ecosistema tecnológico se comunica a través de la red LTE/4G de Entel Chile, enviando los datos al centro de control Sicom, donde se procesan, almacenan y visualizan mediante paneles Power BI. De esta manera, se logra una arquitectura de trazabilidad end-to-end, capaz de integrar la operación en terreno con el análisis de gestión en la nube (Sicom Chile, 2025). Complementariamente, la ciberseguridad emerge como un componente fundamental del sistema, dado el volumen y sensibilidad de los datos transmitidos. En este sentido, se implementan mecanismos de encriptación AES-256, autenticación multifactor y respaldo de logs, garantizando la integridad, confidencialidad y disponibilidad de la información conforme a las directrices de ISO 27001. Este aspecto no solo protege los datos corporativos, sino también la evidencia operativa que respalda la cadena de custodia, asegurando su validez ante auditorías o procesos legales (Instituto de Auditores Internos, 2020).

La aplicación del ciclo PDCA (Planificar, Hacer, Verificar y Actuar), propuesto por Deming (1994), permite mantener la mejora continua del sistema. Mediante la planificación de estrategias, la ejecución controlada de procesos, la verificación mediante indicadores de desempeño (KPI/SLA) y la implementación de acciones correctivas, el modelo se mantiene dinámico y adaptable a los cambios operacionales o tecnológicos. En términos de desempeño, los indicadores KPI/SLA definidos en el sistema incluyen metas de disponibilidad telemétrica $\geq 98\%$, detección de incidentes en menos de 5 minutos, tiempo de contención menor a 30 minutos, integridad de carga $\geq 99,5\%$, y cumplimiento de SLA $\geq 95\%$. Estos indicadores no solo permiten medir la efectividad del sistema, sino también justificar inversiones y decisiones estratégicas orientadas a la mejora de la cadena logística (Kerzner, 2021).

Finalmente, la integración de todos estos marcos conceptuales, normativos y tecnológicos posiciona al sistema propuesto como una solución innovadora en la gestión logística minera chilena. Su estructura combina control interno, gestión del riesgo, modelamiento de procesos y telemática avanzada, dando lugar a un sistema que no solo cumple con las exigencias de trazabilidad y seguridad de las empresas mineras, sino que también promueve la transformación digital del transporte minero dentro de los lineamientos de la Industria 4.0.

En consecuencia, la síntesis del marco teórico demuestra que la efectividad del sistema radica en su integración multidisciplinaria: el control interno aporta estructura y gobernanza; el BowTie, análisis preventivo de riesgos; el BPMN, claridad y estandarización operativa; las normas ISO, sustentabilidad y cumplimiento normativo; y la telemática, la visibilidad en tiempo real. Este conjunto de herramientas teóricas y prácticas constituye la base científica y técnica que sustenta el diseño del Sistema Integrado de Control Interno y Cadena de Custodia, asegurando su coherencia con los objetivos estratégicos de seguridad, eficiencia y transparencia del transporte minero nacional (COCHILCO, 2024; ISO, 2015; COSO, 2017).

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.

3.1. Introducción.

La metodología constituye el eje central del presente proyecto de título, ya que orienta la forma en que se responderá al problema de investigación y se alcanzarán los objetivos formulados. En un contexto operacional complejo como el transporte de concentrado y cátodos de cobre, donde la trazabilidad, la integridad de la carga y el control interno son elementos críticos, se requiere un enfoque metodológico robusto que combine técnicas analíticas, tecnológicas y procedimentales.

De acuerdo con Creswell y Creswell (2018), la metodología debe estructurarse de manera coherente con el diseño de investigación, los instrumentos utilizados y la naturaleza de los datos recopilados. Bajo ese criterio, el presente estudio adopta un enfoque mixto, integrando elementos cuantitativos y cualitativos, con un diseño aplicado y cuasi-experimental, que permite evaluar el impacto de la solución tecnológica en un entorno real de transporte minero.

3.2. Enfoque de la investigación.

El estudio se sustenta en un enfoque mixto, combinando enfoques cuantitativos y cualitativos para lograr una visión integral del fenómeno estudiado.

3.2.1. Componente cuantitativo.

Permite medir el desempeño del sistema mediante indicadores objetivos, tales como:

- Disponibilidad telemétrica.
- Tiempos de detección y respuesta (MTTD/MTTR).

- Integridad de la carga.
- Cumplimiento de SLA/KPI.

Estos indicadores son consistentes con los lineamientos de Kerzner (2021) en gestión de proyectos y medición de desempeño.

3.2.2. Componente cualitativo.

Permite comprender la percepción del personal operativo, los factores humanos, las brechas procedimentales y las causas organizacionales, mediante:

- entrevistas semiestructuradas.
- análisis documental.
- observación directa.

Este componente sigue las recomendaciones de Hernández et al. (2022) respecto de la utilidad interpretativa de los métodos cualitativos.

El enfoque mixto asegura una triangulación sólida, aumentando la validez del estudio al integrar evidencia técnica, operacional y humana.

3.3. Tipo de investigación.

La investigación se clasifica como aplicada, dado que desarrolla una solución real para mejorar el control interno y la trazabilidad del transporte minero.

Asimismo, posee características descriptivas–explicativas:

- Descriptiva, porque identifica y detalla las brechas, procesos y riesgos del sistema actual.
- Explicativa, porque determina cómo la solución integrada permite mitigar esas brechas y mejorar el rendimiento operativo, tal como señala Sampieri et al. (2022) para investigaciones orientadas a resolver problemas organizacionales complejos.

3.4. Diseño de investigación.

El diseño metodológico adoptado es cuasi-experimental, adecuado cuando no es posible controlar completamente las variables externas (Creswell & Creswell, 2018), como ocurre en entornos de transporte minero.

El diseño se estructura en tres fases:

Fase 1: Diagnóstico inicial.

- Levantamiento de procesos.
- Identificación de brechas.
- Análisis COSO, BowTie y BPMN.
- Evaluación de tecnologías existentes.

Fase 2: Diseño e implementación piloto.

- Arquitectura telemática integrada.
- Definición de SOP y protocolos.

- Matrices de riesgo.
- Instalación de GPS dual, MDVR, RFID y bodycams.

Fase 3: Evaluación comparativa.

- Medición pre y post implementación.
- Análisis de indicadores KPI/SLA.
- Validación de la efectividad del sistema.

Este diseño permite evaluar el impacto real del sistema en condiciones operacionales auténticas.

3.5. Población y muestra.

3.5.1. Población.

Compuesta por todas las unidades vehiculares dedicadas al transporte de concentrado y cátodos en la empresa analizada, estimada entre 40 y 60 camiones.

3.5.2. Muestra.

Se selecciona una muestra no probabilística intencionada de 10 a 15 unidades, equivalente al 20–30% de la flota, elegidas por:

- operar en rutas críticas.
- condiciones geográficas complejas.

- exposición a riesgos elevados.

Este método de selección permite validar la solución en los segmentos donde su impacto es más significativo (COCHILCO, 2024).

3.6. Variables del estudio.

3.6.1. Variable independiente.

- **Sistema Integrado de Control Interno y Cadena de Custodia**, compuesto por:
 - GPS dual.
 - MDVR/ADAS/DMS.
 - RFID.
 - Bodycams.
 - SOP estandarizados.
 - BPMN 2.0.
 - Matriz de riesgos COSO–BowTie.
 - Plataforma telemática de monitoreo.

3.6.2. Variables dependientes.

- Disponibilidad telemétrica (%).
- MTTD (tiempo medio de detección).

- MTTR (tiempo medio de respuesta).
- Integridad de carga (%).
- Cumplimiento de SLA/KPI (%).

Las variables permiten medir la efectividad del sistema de manera cuantitativa y comprobable.

3.7. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.

3.7.1. Técnicas cuantitativas.

- Registros telemétricos de GPS dual.
- Video analítica de MDVR/ADAS/DMS.
- Eventos de apertura de sellos RFID.
- Registros de bodycams Hytera.
- Logs de plataforma Sicom /Entel Chile.
- Dashboards Power BI.

Estas fuentes permiten medir desempeño técnico y continuidad operacional (Hytera, 2025).

3.7.2. Técnicas cualitativas.

- **Entrevistas semiestructuradas** a operadores, supervisores y controladores.
- **Encuestas estructuradas** sobre adopción y percepción del sistema.

- **Análisis documental** de SOP, auditorías, procedimientos y registros históricos.

3.8. Procedimiento metodológico.

El procedimiento metodológico se desarrolla en seis etapas:

3.8.1. Etapa 1: Diagnóstico del sistema actual.

Incluye identificación de brechas tecnológicas, operacionales y procedimentales mediante entrevistas, revisión documental y análisis de telemetría.

3.8.2. Etapa 2: Modelamiento BPMN del proceso.

Representa el flujo operacional, actores involucrados y puntos críticos de control.

3.8.3. Etapa 3: Diseño del sistema integrado.

Define arquitectura telemática, protocolos SOP, matrices de riesgo, indicadores KPI y plan de ciberseguridad (ISO 27001).

3.8.4. Etapa 4: Implementación piloto.

Instalación física de dispositivos, configuración del sistema, capacitación y pruebas de funcionamiento.

3.8.5. Etapa 5: Recolección y análisis de datos.

Comparación pre y post implementación mediante estadísticas descriptivas y análisis temporal.

3.8.6. Etapa 6: Retroalimentación y mejora continua.

Aplicación del ciclo PDCA para ajuste de procesos (Deming, 1994).

3.9. Validez y confiabilidad.

3.9.1. Validez.

Garantizada mediante:

- Triangulación de datos (telemáticos, humanos, documentales).
- Revisión experta del diseño del sistema.
- Alineación con estándares ISO, COSO y normativas mineras.

3.9.2. Confiabilidad.

Asegurada por:

- Dispositivos telemáticos certificados.
- Registros automáticos y trazabilidad digital.
- Procedimientos uniformes de recopilación de datos.

3.10. Consideraciones éticas.

El estudio respeta los principios de confidencialidad, anonimato y protección de datos personales conforme a la Ley N.º 19.628 y a los estándares internacionales de la ISO 27001 (2022).

La participación del personal se realiza bajo consentimiento informado y sin riesgo físico ni psicológico.

3.11. Síntesis del capítulo.

La metodología presentada integra enfoques cuantitativos y cualitativos en un diseño aplicado y cuasi-experimental que permite diagnosticar, diseñar, implementar y evaluar un Sistema Integrado de Control Interno y Cadena de Custodia para el transporte de concentrado y cátodos de cobre. La estructura metodológica garantiza rigor científico, validez operativa y coherencia con los objetivos específicos del proyecto, permitiendo obtener conclusiones sólidas y aplicables en la industria minera.

CAPÍTULO IV

DIAGNÓSTICO Y DISEÑO DE LA SOLUCIÓN.

4.1. Introducción.

El presente capítulo desarrolla el diagnóstico técnico-operacional del sistema actual de transporte de concentrado y cátodos de cobre, así como el diseño integral de la solución propuesta: un Sistema Integrado de Control Interno y Cadena de Custodia basado en tecnologías telemáticas avanzadas y procesos estandarizados bajo los marcos COSO, BowTie, BPMN 2.0 e ISO.

El diagnóstico se elaboró siguiendo los lineamientos metodológicos del Capítulo III, mediante análisis documental, entrevistas semiestructuradas, revisión de procedimientos, auditorías internas, levantamiento BPMN y evaluación de registros telemétricos. Este análisis permitió identificar brechas críticas que afectan la trazabilidad, la continuidad operativa y la integridad de la carga, lo cual fundamenta el diseño de una solución tecnológica y procedimental robusta.

4.2. Diagnóstico del sistema actual.

El diagnóstico se estructuró en tres dimensiones: operacional, tecnológica y procedimental–organizacional. Esta clasificación se fundamenta en COSO (2017), ISO 28000 (2022) e ISO 9001 (2015), estándares que exigen identificar riesgos asociados a procesos, tecnología y control documental.

4.2.1. Brechas operacionales.

A partir del levantamiento en terreno y entrevistas, se observaron las brechas operacionales sintetizadas en la Tabla N° 4.1.

Tabla N° 4.1: Brechas operacionales identificadas en el diagnóstico.

Componente	Situación actual	Impacto operacional	Riesgo
Supervisión en ruta	Monitoreo reactivo	Detección tardía de incidentes	Alto
Control documental	Registros manuales	Falta de auditabilidad	Alto
SOP	Inconsistentes o inexistentes	Variabilidad operacional	Medio
Custodia de sellos	No digitalizada	Vulnerabilidad de la cadena	Alto
Capacitación	Parcial	Errores operativos y desviaciones	Medio

Fuente: Elaboración propia a partir del diagnóstico realizado (2025).

Esta tabla resume las brechas operacionales detectadas en la evaluación preliminar. Las falencias observadas afectan tanto la continuidad de la operación como la capacidad de respuesta ante incidentes.

El diagnóstico evidencia que la operación actual carece de estandarización y control en actividades críticas, contraviniendo los principios del componente “Actividades de Control” de COSO (2017) y los requisitos de registros confiables de ISO 9001.

Las brechas identificadas muestran que la operación no cuenta con controles efectivos para garantizar integridad, trazabilidad y supervisión continua, justificando la implementación de un sistema integrado.

4.2.2. Brechas tecnológicas.

El diagnóstico técnico reveló que la infraestructura tecnológica actual (ver Figura N° 4.1) presenta limitaciones severas en disponibilidad, continuidad, interoperabilidad y

seguridad de la información. Estas brechas comprometen directamente la trazabilidad de la cadena logística, la supervisión en tiempo real y la capacidad de detectar eventos críticos, aspectos fundamentales para el cumplimiento de los marcos ISO 28000 (2022), ISO 27001 (2022) y COSO (2017).

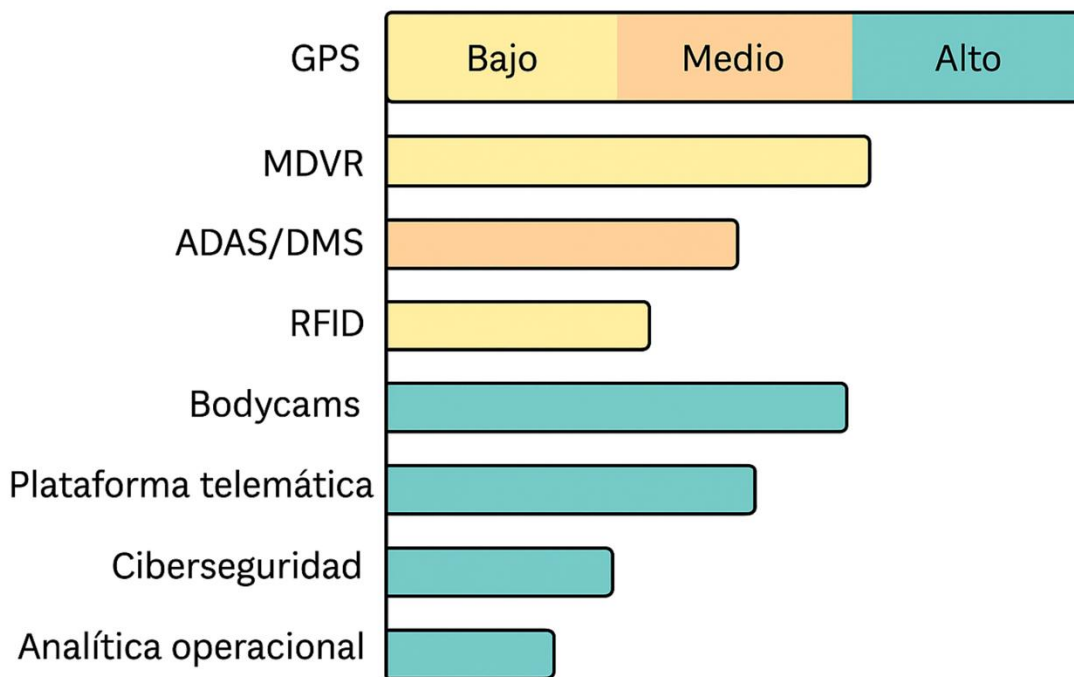


Figura N° 4.1: Nivel de madurez tecnológica del sistema actual.

Fuente: Elaboración propia basada en criterios de Hytera (2025), ISO 28000 (2022) e ISO 27001 (2022).

La Tabla N° 4.2 sintetiza las brechas tecnológicas detectadas, organizadas de acuerdo con el impacto operacional y el nivel de riesgo asociado a la continuidad del negocio.

Tabla N° 4.2: Brechas tecnológicas identificadas durante el diagnóstico.

Componente tecnológico	Situación actual	Brecha identificada	Riesgo operacional	Nivel de criticidad
------------------------	------------------	---------------------	--------------------	---------------------

GPS	Canal único	Pérdida de señal frecuente en zonas críticas	No se detectan desvíos ni detenciones	Alto
MDVR / ADAS / DMS	No disponible	Sin evidencia visual ni alerta de fatiga	Acciones inseguras no monitoreadas	Alto
RFID	No implementado	Sin trazabilidad de sellos	Vulneración de la cadena de custodia	Alto
Bodycams	No disponibles	Sin registro de procedimientos críticos	Falta de evidencia verificable	Medio-Alto
Plataforma telemática	Fragmentada	Sistemas no integrados	Datos incompletos y poco confiables	Alto
Ciberseguridad	Limitada	No hay cifrado AES-256 ni MFA	Riesgo de manipulación o pérdida de datos	Alto
Analítica	No disponible	No hay reportes automáticos ni KPI	Imposibilidad de gestión basada en evidencia	Medio

Fuente: Elaboración propia con base en el levantamiento telemático (2025).

Las tecnologías existentes no cumplen con los estándares mínimos para una operación minera moderna. Las debilidades detectadas se clasifican como de alta criticidad, particularmente aquellas asociadas a:

- pérdida de señal GPS.
- ausencia de sistemas de video analítica.

- falta de evidencias digitales.
- inexistencia de trazabilidad RFID.
- vulnerabilidad en ciberseguridad.

Estas brechas no solo afectan la capacidad de monitoreo, sino que comprometen el cumplimiento contractual con clientes mineros, la capacidad de respuesta ante incidentes y la posibilidad de implementar un sistema de control interno robusto.

El diagnóstico revela que la empresa debe realizar un salto tecnológico significativo para cumplir con los requisitos de trazabilidad, control interno y seguridad operacional exigidos por la minería chilena.

Las brechas tecnológicas detectadas son críticas y sistemáticas. Estas limitaciones afectan directamente:

- la trazabilidad.
- la integridad de la carga.
- la continuidad del monitoreo.
- la evidencia visual.
- la respuesta frente a desviaciones.
- la capacidad de auditoría.
- la seguridad digital.

La evidencia presentada confirma la necesidad de una arquitectura telemática integrada, sustentada en GPS dual, MDVR/ADAS/DMS, RFID, bodycams, protocolos LTE/4G, ciberseguridad ISO 27001 y plataformas analíticas interconectadas.

4.2.3. Brechas procedimentales y organizacionales.

El análisis documental, las entrevistas semiestructuradas y la observación en terreno permitieron identificar brechas significativas en los ámbitos procedimental y organizacional, las cuales afectan de manera directa la trazabilidad, la integridad de la carga y la efectividad del control interno. Estas brechas se analizan a la luz del marco de control interno COSO (2017) y de los estándares ISO 9001, ISO 28000, ISO 45001 e ISO 27001, todos los cuales exigen que los procedimientos, responsabilidades, registros y sistemas de supervisión estén correctamente definidos, documentados y actualizados.

La Figura N° 4.2 sintetiza las principales brechas detectadas en materia de procedimientos y estructura organizacional. Se observa que el proceso carece de estandarización formal, el control interno depende excesivamente del criterio individual y no existe una infraestructura documental sólida que permita asegurar la trazabilidad del proceso completo.

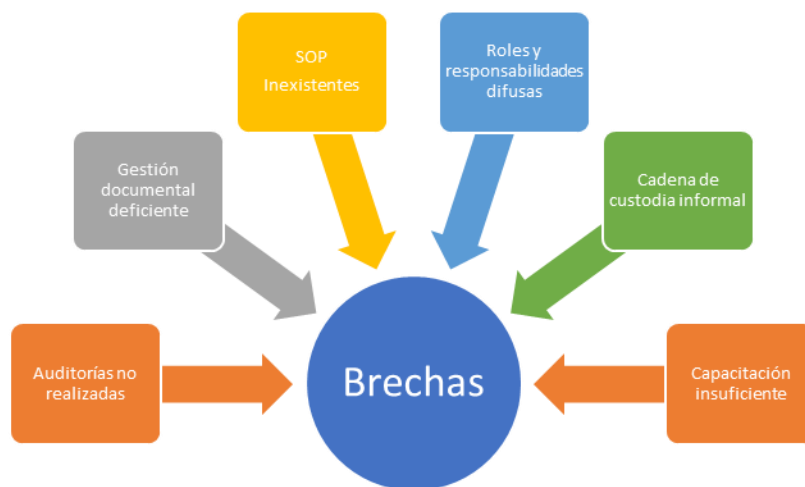


Figura N° 4.2: Brechas procedimentales y organizacionales.

Fuente: Elaboración propia a partir de entrevistas, revisión documental y observación en terreno (2025), con base en COSO (2017) y normativas ISO.

La evaluación confirma que el problema no reside únicamente en la ausencia de tecnología, sino también en la falta de estructura documental y de control interno, lo que compromete la confiabilidad del proceso.

Las brechas descritas afectan cuatro pilares normativos:

- **ISO 9001:** requiere estandarización documental y registros trazables.
- **ISO 28000:** exige cadena de custodia documentada y verificable.
- **COSO:** demanda claridad de responsabilidades, controles y supervisión.
- **ISO 27001:** obliga a proteger la información operativa mediante registros fiables.

Las brechas procedimentales y organizacionales identificadas justifican la necesidad de implementar SOP formales, definir roles y responsabilidades, estandarizar capacitaciones, digitalizar registros mediante RFID y cámaras corporales, y establecer un programa de auditorías internas bajo el ciclo PDCA.

Las brechas procedimentales y organizacionales revelan que la empresa carece de un sistema maduro de gestión de procesos y control interno. La ausencia de SOP, la falta de roles definidos, la inexistencia de auditorías y la debilidad en la cadena de custodia constituyen riesgos críticos que afectan la integridad y trazabilidad del transporte. Por tanto, la solución propuesta deberá cubrir estos vacíos mediante una arquitectura documental robusta, procesos BPMN estandarizados, capacitación formal y mecanismos de auditoría continua.

La Tabla N° 4.3 sistematiza las brechas identificadas, mostrando no solo la brecha en sí misma, sino también su impacto y criticidad. Este análisis permite priorizar intervenciones y fortalecer el diseño de la solución.

Tabla N° 4.3: Brechas procedimentales y organizacionales detectadas.

Área evaluada	Brecha identificada	Consecuencia operacional	Riesgo asociado	Nivel de criticidad
Documentación	Ausencia de SOP y formatos auditables	Variabilidad en la ejecución de procesos	Inconsistencia y fallas en la trazabilidad	Alto
Roles y responsabilidades	No existe asignación formal de responsabilidades	Supervisión débil y ambigua	Falta de control interno	Alto
Cadena de custodia	Registro manual sin respaldo digital	Vulnerabilidad del sello y evidencia insuficiente	Pérdida de integridad	Alto
Capacitación	Entrenamientos no estandarizados	Errores operativos	Incidentes y desviaciones	Medio
Auditorías	No se ejecutan auditorías periódicas	Falta de retroalimentación y mejora	Degradación del sistema	Alto
Comunicación interna	Canales informales	Retrasos en reportabilidad	Baja productividad	Medio
Gestión documental	Versiones desactualizadas	Confusión operacional	Inconsistencias en registros	Medio-Alto

Fuente: Elaboración propia con base en el diagnóstico operativo (2025) y normativas ISO y COSO.

La tabla sistematiza las brechas identificadas, mostrando no solo la brecha en sí misma, sino también su impacto y criticidad. Este análisis permite priorizar intervenciones y fortalecer el diseño de la solución.

La evaluación confirma que el problema no reside únicamente en la ausencia de tecnología, sino también en la falta de estructura documental y de control interno, lo que compromete la confiabilidad del proceso.

Las brechas descritas afectan cuatro pilares normativos:

- ISO 9001: requiere estandarización documental y registros trazables.
- ISO 28000: exige cadena de custodia documentada y verificable.
- COSO: demanda claridad de responsabilidades, controles y supervisión.
- ISO 27001: obliga a proteger la información operativa mediante registros fiables.

4.3. Análisis de riesgos mediante modelo BowTie.

El análisis de riesgos se realizó utilizando la metodología BowTie, ampliamente recomendada para identificar causas, consecuencias y controles asociados a eventos críticos en sistemas logísticos (CCPS, 2018; ISO 31000, 2018). El evento central definido para este estudio es la pérdida de integridad de la carga durante el transporte, dado su alto impacto económico, contractual y operacional.

4.3.1. Causas principales.

El diagnóstico reveló las siguientes causas recurrentes:

- Manipulación indebida de sellos y aperturas no autorizadas.

- Pérdida de señal GPS en zonas críticas.
- Ausencia de MDVR/ADAS/DMS y RFID que permitan evidencia digital verificable.
- Falta de estandarización de SOP y roles.
- Supervisión reactiva y reportabilidad manual.

4.3.2. Consecuencias.

Entre las consecuencias más relevantes se identificaron:

- Pérdida de mineral y penalizaciones contractuales.
- Interrupciones del servicio y retrasos logísticos.
- Daños reputacionales y posibles riesgos de seguridad para el personal.

4.3.3. Barreras preventivas.

Para evitar la ocurrencia del evento crítico, se proponen:

- GPS dual de alta disponibilidad.
- MDVR/ADAS/DMS para video analítica.
- Sellos RFID para cadena de custodia digital.
- Bodycams para evidencia visual.

- SOP estandarizados y geocercas inteligentes.

4.3.4. Barreras mitigadoras.

En caso de materialización del evento, se plantean:

- Protocolos de respuesta rápida (<30 minutos).
- Registro audiovisual desde MDVR y bodycams.
- Auditoría de apertura RFID.
- Trazabilidad digital en plataforma SICOM / Entel Chile.

La Tabla N° 4.4 presenta una síntesis del análisis BowTie para el evento crítico identificado: la pérdida de integridad de la carga. Resume las causas, consecuencias y barreras propuestas, lo que permite visualizar de forma rápida y estructurada la lógica del riesgo.

Tabla N° 4.4: Síntesis del análisis BowTie del evento crítico.

Elemento	Descripción
Evento crítico	Pérdida de integridad de la carga
Causas	Manipulación indebida, fallas telemáticas, SOP débiles
Consecuencias	Pérdidas económicas, retrasos, daño reputacional
Barreras preventivas	GPS dual, MDVR, RFID, SOP estandarizados
Barreras mitigadoras	Respuesta rápida, evidencia digital, auditorías

Fuente: Elaboración propia basada en CCPS (2018) e ISO 31000 (2018).

El análisis evidencia que el sistema actual carece de barreras tecnológicas y procedimentales suficientes, elevando la probabilidad del evento crítico. La solución propuesta integra controles robustos (GPS dual, MDVR, RFID, SOP) que actúan tanto

en prevención como en mitigación, alineándose con los principios de gestión del riesgo de ISO 31000.

Esta síntesis valida la necesidad de un sistema integrado de control interno y cadena de custodia, ya que aborda directamente las principales vulnerabilidades identificadas durante el diagnóstico.

El modelo BowTie permite comprender de forma estructurada el riesgo principal asociado al transporte y sustenta el diseño del sistema integrado, al evidenciar la necesidad de controles tecnológicos y procedimentales que aseguren trazabilidad, supervisión continua y capacidad de respuesta.

4.4. Diseño de la solución integrada.

El diseño de la solución propuesta responde directamente al primer objetivo específico, el cual busca desarrollar una arquitectura tecnológica y procedimental capaz de garantizar trazabilidad, integridad y supervisión continua del transporte de concentrado y cátodos de cobre. Para ello se propone un Sistema Integrado de Control Interno y Cadena de Custodia compuesto por cinco capas complementarias: tecnológica, procesal, documental, control interno y ciberseguridad. Este diseño se fundamenta en los resultados del diagnóstico, el análisis BowTie (Sección 4.3) y en los marcos normativos COSO (2017), ISO 9001, ISO 45001, ISO 28000 e ISO 27001.

4.4.1. Capa tecnológica: arquitectura telemática integrada.

La capa tecnológica constituye la base operativa del sistema e integra los siguientes componentes:

- **GPS dual de alta disponibilidad:** utilizado para continuidad de señal en zonas críticas, permitiendo monitoreo continuo y reducción del riesgo de desvíos no detectados.

- **MDVR/ADAS/DMS:** cámaras embarcadas con video analítica para registrar evidencia visual del viaje, detectar fatiga, conducción insegura y anomalías operacionales.
- **RFID para sellos electrónicos:** permite trazabilidad automatizada de apertura y cierre de compartimentos, asegurando la cadena de custodia digital.
- **Bodycams Hytera:** otorgan evidencia audiovisual durante inspecciones, verificaciones y procedimientos críticos de custodia.
- **Geocercas inteligentes:** definen zonas de riesgo, puntos de control, desvíos y alertas automáticas.
- **Plataforma Sicom + Power BI /Entel Chile:** integración de datos, reportes en tiempo real, dashboards operacionales y trazabilidad centralizada.

Esta arquitectura permite cumplir con los requisitos de trazabilidad de ISO 28000 y control interno del marco COSO, fortaleciendo la detección temprana (MTTD) y la contención de incidentes (MTTR).

4.4.2. Capa procesal: estandarización bajo BPMN 2.0.

La capa procesal estructura los flujos de trabajo mediante modelos BPMN, asegurando:

- claridad de roles.
- visibilidad del proceso completo.
- identificación de puntos de control críticos.

- eliminación de variabilidad operacional.

Los procesos estandarizados incluyen:

1. Preparación y planificación del viaje.
2. Carguío y verificación de sellado RFID.
3. Registro formal de cadena de custodia.
4. Monitoreo en ruta y gestión de alertas.
5. Recepción y cierre de custodia en planta.
6. Auditoría interna y retroalimentación PDCA.

4.4.3. Capa documental: SOP y gestión de evidencias.

El sistema requiere una arquitectura documental que garantice cumplimiento normativo y auditabilidad:

- SOP de carguío, sellado, inspección, desvíos y recepción.
- Formatos digitales de registro.
- Checklists electrónicos.
- Matriz de roles y responsabilidades.
- Protocolo de evidencias audiovisuales.
- Registro de apertura RFID.

Con ello se fortalece el pilar documental requerido por ISO 9001 y COSO (2017).

4.4.4. Capa de control interno: COSO aplicado a transporte minero.

El diseño incorpora los 5 componentes COSO:

- **Ambiente de control:** roles definidos, estructura funcional.
- **Evaluación de riesgos:** BowTie + matriz operacional.
- **Actividades de control:** SOP, RFID, MDVR, geocercas.
- **Información y comunicación:** Sicom, dashboards Power BI.
- **Supervisión:** auditorías trimestrales y ciclos PDCA.

4.4.5. Capa de ciberseguridad: ISO 27001.

Se incorporan controles como:

- Cifrado AES-256 en transmisión.
- Autenticación multifactor (MFA).
- Gestión segura de logs.
- Control de accesos.
- Trazabilidad digital y auditoría de eventos.

4.5. Procesos BPMN del sistema propuesto.

En cumplimiento del segundo objetivo específico, se desarrolló un modelo BPMN integral del proceso de transporte y cadena de custodia, el cual permite visualizar el flujo end-to-end y sus puntos de control.

El proceso propuesto se compone de siete macro etapas:

4.5.1. Etapa 1: Planificación del transporte.

Incluye asignación del viaje, disponibilidad del tractocamión y validación documental. Es el punto inicial del ciclo y define las condiciones del control.

4.5.2. Etapa 2: Carguío, verificación y sellado RFID.

El carguío del mineral debe registrarse visualmente mediante bodycams y MDVR y el sellado se valida mediante tecnología RFID, fortaleciendo la custodia.

4.5.3. Etapa 3: Registro formal de cadena de custodia.

El conductor y el romanero o el encargado de despacho firman el inicio de custodia mediante un registro digital con evidencia visual.

4.5.4. Etapa 4: Monitoreo en ruta.

El centro de control realiza:

- Seguimiento telemático.
- Validación de geocercas.

- Supervisión de alertas ADAS/DMS.
- Auditoría de aperturas RFID.
- Respuesta inmediata ante desviaciones.

4.5.5. Etapa 5: Confirmación de entrega.

En planta de destino se verifican sellos, se registra evidencia visual y se cierra formalmente la cadena de custodia.

4.5.6. Etapa 6: Inspección y revisión conjunta.

Conductor y Romanero o encargado de despacho validan integridad de la carga con apoyo de bodycams y registros RFID.

4.5.7. Etapa 7: Auditoría y retroalimentación.

Los datos del viaje permiten generar:

- Reportes KPI.
- Auditorías.
- Ciclos PDCA.
- Mejoras en SOP.

4.6. Indicadores KPI/SLA del sistema

Los indicadores de desempeño permiten evaluar la efectividad operativa del sistema durante su implementación y piloto. Los KPI definidos responden a los requisitos contractuales, normativos y operacionales de la industria minera.

La Tabla N° 4.5 define los KPI clave necesarios para evaluar el desempeño del sistema integrado durante el piloto y posterior operación.

Tabla N° 4.5: Síntesis del análisis BowTie del evento crítico.

Indicador	Definición	Meta	Justificación
Disponibilidad telemétrica (%)	Tiempo total con señal operativa	$\geq 98\%$	Evita “zonas oscuras” y rutas sin supervisión
MTTD (tiempo de detección)	Tiempo entre el evento y su identificación	< 5 min	Clave para prevención según BowTie
MTTR (tiempo de respuesta)	Tiempo de contención del evento	< 30 min	Reduce impacto operacional
Integridad de carga (%)	Viajes sin anomalías	$\geq 99,5\%$	Garantiza cadena de custodia
Cumplimiento de SOP (%)	Adherencia a procedimientos	$\geq 95\%$	Estabilidad operacional
Incidentes críticos por viaje	Número de eventos relevantes	Tolerancia 0	Seguridad operacional
Cumplimiento SLA del monitoreo	Eficacia del centro de control	$\geq 95\%$	Requisito contractual

Fuente: Elaboración propia a partir de los lineamientos del Center for Chemical Process Safety (CCPS, 2018) y la Norma Internacional ISO 31000 sobre gestión del riesgo (ISO, 2018).

Los KPI seleccionados permiten medir los tres pilares del sistema:

- Continuidad operativa.

- Integridad de la carga.
- Eficacia del control interno.

Además, cumplen las recomendaciones de Kerzner (2021) sobre medición del desempeño en sistemas complejos.

El conjunto de indicadores constituye el marco evaluativo del piloto operativo y permitirá demostrar el cumplimiento del objetivo específico N°3.

4.7. Plan de implementación del sistema integrado.

La implementación del Sistema Integrado de Control Interno y Cadena de Custodia requiere una planificación estructurada que permita asegurar una transición controlada desde el estado actual hacia la operación digitalizada del transporte. El plan propuesto se organiza en cuatro fases: preparación, instalación tecnológica, integración operativa y validación. Esta estructura es coherente con las recomendaciones de gestión de proyectos de Kerzner (2021), quien destaca la necesidad de una secuencia lógica de actividades para mitigar riesgos y asegurar la alineación con los objetivos estratégicos de la organización.

En la fase de preparación, se ejecuta el levantamiento de infraestructura, el mapeo de rutas críticas y la asignación del personal responsable. Esta etapa permite identificar requerimientos de conectividad, cobertura de red y compatibilidad vehicular, asegurando que las condiciones mínimas para la operación telemática estén garantizadas (ISO 28000, 2022).



Figura N° 4.3: Flujo de implementación del sistema integrado.

Fuente: Elaboración propia a partir de entrevistas, revisión documental y observación en terreno (2025), con base en COSO (2017) y normativas ISO.

La fase de instalación tecnológica incorpora la implementación de GPS dual, MDVR/ADAS/DMS, RFID, bodycams Hytera y módulos de ciberseguridad. Se incluyen pruebas de conectividad, configuraciones iniciales y verificación de enlaces hacia la plataforma Sicom y Entel Chile, todo ello bajo un protocolo de aseguramiento técnico conforme a ISO 9001 (2015).

La fase de integración operativa contempla la capacitación del personal, la estandarización de SOP y la puesta en marcha del monitoreo continuo. Esta fase es clave para asegurar la adopción del sistema según el marco COSO (2017), el cual enfatiza la importancia del capital humano como componente del ambiente de control.

Finalmente, la fase de validación se orienta a medir el desempeño del sistema mediante KPI y SLA definidos previamente. Esta etapa utiliza principios de mejora continua según ISO 45001 e ISO 31000, permitiendo identificar desviaciones y ajustar procedimientos antes del escalamiento al 100% de la flota.

4.8. Matriz de control y puntos críticos del proceso (PCC).

El diseño del sistema requiere identificar los Puntos Críticos de Control (PCC) que aseguran la integridad del proceso logístico. Estos PCC permiten monitorear actividades de alto impacto y establecer controles tecnológicos o procedimentales que eliminen o reduzcan la probabilidad de materialización del evento crítico. Según ISO 28000 (2022), los PCC deben diseñarse para mantener la integridad, seguridad y trazabilidad en operaciones de transporte de alto valor.

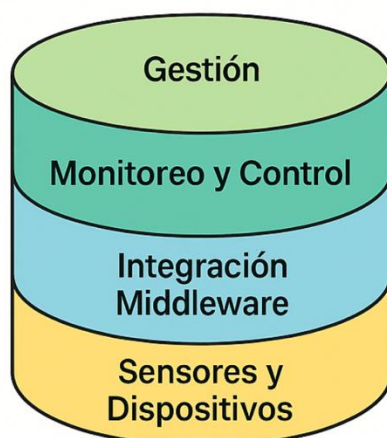


Figura N° 4.4: Arquitectura general de la solución integrada.

Fuente: Elaboración propia a partir de entrevistas, revisión documental y observación en terreno (2025), con base en COSO (2017) y normativas ISO.

Los PCC identificados incluyen: carguío y sellado, salida de faena, ingreso a rutas viales y de montaña, puntos de detención autorizados, cruces en zonas vulnerables, ingreso a planta de destino y verificación final de sellos. Cada PCC se asocia a sensores, evidencia visual, validaciones RFID, geocercas inteligentes y protocolos definidos bajo el modelo COSO (2017), que exige actividades de control claras y verificables.

Para cada PCC se definieron controles tecnológicos (GPS dual, MDVR, bodycams), controles documentales (SOP, checklists) y controles operativos (supervisión en vivo, auditorías). Esta estructura permite asegurar redundancia y coherencia, evitando brechas procedimentales identificadas en la etapa diagnóstica. El diseño está alineado con la gestión del riesgo planteada por ISO 31000 (2018), que recomienda controles preventivos y mitigadores basados en evidencia empírica.

4.9. Plan de capacitación y gestión del cambio organizacional.

La adopción efectiva del sistema requiere un plan robusto de capacitación que garantice que conductores, supervisores, controladores y personal administrativo comprendan las nuevas responsabilidades, herramientas telemáticas y procedimientos. De acuerdo con Kotter (2012), la gestión del cambio organizacional debe abordar tanto las competencias técnicas como las percepciones culturales que influyen en la aceptación de nuevas tecnologías.

El plan contempla tres módulos formativos: 1) Uso de tecnología embarcada (GPS dual, MDVR, RFID, bodycams), 2) Procedimientos operativos estandarizados (SOP) y cadena de custodia, y 3) Proceso de monitoreo, reportabilidad y respuesta ante incidentes. Cada módulo incluye demostraciones prácticas, simulaciones en ruta y evaluaciones formales, siguiendo el principio de competencia técnica señalado en ISO 45001 (2018).

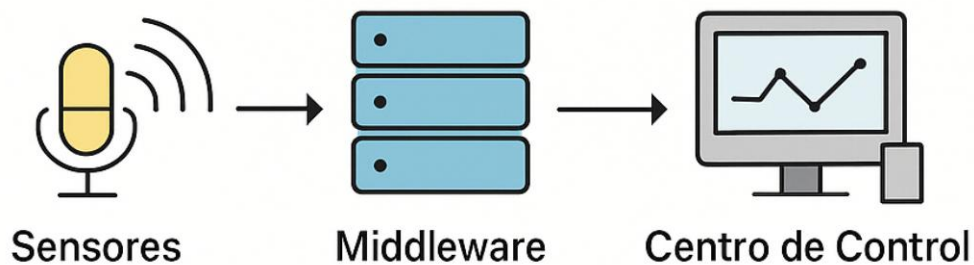


Figura N° 4.5: Arquitectura del sistema integrado.

Fuente: Elaboración propia a partir de entrevistas, revisión documental y observación en terreno (2025), con base en COSO (2017) y normativas ISO.

Paralelamente, se implementa una estrategia de gestión del cambio que involucra comunicación interna, sesiones informativas y campañas de sensibilización orientadas a reforzar la importancia de la trazabilidad y seguridad. Estas actividades contribuyen al componente “Información y Comunicación” del modelo COSO (2017), mejorando la coordinación entre áreas operativas y administrativas.

Finalmente, se incorpora un sistema de retroalimentación para medir la adopción del sistema, identificar brechas formativas y ejecutar capacitaciones complementarias. Este enfoque está alineado con la filosofía de mejora continua de ISO 9001 (2015).

4.10. Síntesis del capítulo.

El Capítulo IV integró el diagnóstico, la gestión del riesgo y el diseño de la solución telemática y procedimental que sustentará la implementación del sistema propuesto. A partir del análisis de brechas, el BowTie y los modelos normativos, se definió una arquitectura tecnológica basada en GPS dual, MDVR/ADAS/DMS, RFID, bodycams Hytera, geocercas inteligentes y plataformas de monitoreo, todo ello en concordancia con los objetivos específicos planteados en el Capítulo I. Este diseño se complementó con procesos BPMN estandarizados, SOP revisados, roles definidos y un esquema de cadena de custodia digital, garantizando la adherencia a los marcos COSO, ISO 9001, ISO 28000 e ISO 27001.

Asimismo, se estableció un conjunto de KPI y SLA que permitirán evaluar la efectividad del sistema durante el piloto operacional, asegurando cumplimiento normativo y mejora continua. Tal como recomiendan ISO 31000 (2018) y Kerzner (2021), se diseñaron planes de implementación, control, capacitación y auditoría que permiten asegurar la sostenibilidad del sistema en el largo plazo.

En síntesis, este capítulo entrega el diseño final del Sistema Integrado de Control Interno y Cadena de Custodia, el cual será evaluado experimentalmente en el Capítulo V mediante la aplicación del piloto en rutas críticas. La coherencia entre diagnóstico, diseño y evaluación constituye un pilar fundamental para garantizar trazabilidad, integridad y seguridad operacional en el transporte minero.

CAPÍTULO V

IMPLEMENTACIÓN PILOTO.

5.1. Introducción.

La implementación piloto del Sistema Integrado de Control Interno y Cadena de Custodia constituye la fase experimental que valida el diseño tecnológico, procedimental y organizacional presentado en el Capítulo IV. A través de esta ejecución controlada se evalúan el desempeño real del sistema, la efectividad de las barreras preventivas y mitigadoras definidas bajo el modelo BowTie, y el grado de cumplimiento de los KPI y SLA establecidos en el diseño. Esta etapa se enmarca dentro de los lineamientos de gestión del riesgo descritos por ISO 31000 (2018) y de control interno del modelo COSO (2017), los cuales recomiendan la validación operativa mediante ciclos iterativos de prueba, monitoreo y retroalimentación continua.

El piloto se desarrolló durante seis meses en rutas viales de la zona norte de la región de atacama y de alta montaña, seleccionadas por su complejidad logística, exposición a condiciones ambientales adversas y mayor probabilidad de pérdida de señal telemática. Estas variables representan los escenarios más exigentes para la continuidad operacional, por lo que la ejecución del piloto bajo estas condiciones permite obtener una evaluación rigurosa de la efectividad del sistema.

5.2. Selección de rutas y flota piloto.

Las rutas fueron seleccionadas considerando:

- a) historial de incidentes.
- b) criticidad operacional.

- c) riesgo de pérdida de integridad de carga.
- d) restricciones de conectividad.

Se determinó trabajar con entre 2 y 3 rutas críticas, equivalentes al 20–30% de la flota, lo que permite obtener métricas representativas sin interrumpir la operación total.

Cada tractocamión piloto fue equipado con telemática avanzada:

- GPS dual de alta disponibilidad.
- MDVR + ADAS + DMS.
- Bodycams Hytera.
- Sellos electrónicos RFID.
- Geocercas inteligentes.
- Plataforma Sicom y Entel Chile + Power BI para visualización centralizada

Estas tecnologías fueron seleccionadas conforme a los requisitos de ISO 28000 (2022) para seguridad en el transporte de mercancías de valor y los principios de trazabilidad establecidos en COSO (2017).

La Figura N° 5.1 muestra el tractocamión utilizado en el piloto, correspondiente a un tracto camión con semirremolque con encarpe, modelo representativo del transporte de concentrado de cobre en operaciones mineras de Chile. En la ilustración se identifican los dispositivos telemáticos instalados: GPS dual, MDVR con ADAS/DMS, bodycam Hytera, sellos electrónicos RFID, sensores de apertura y la infraestructura de geocercas inteligentes, los cuales constituyen la base técnica del Sistema Integrado de Control Interno y Cadena de Custodia.

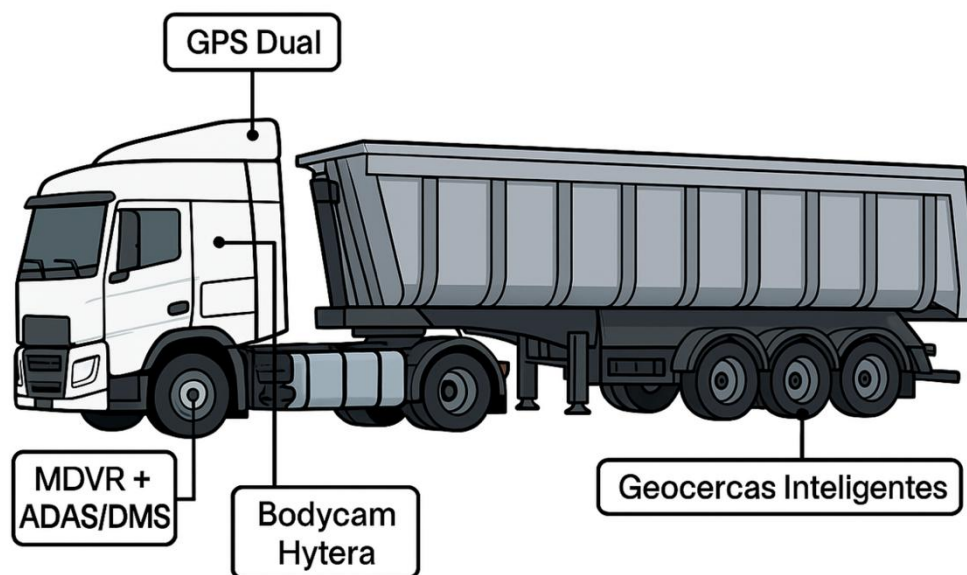


Figura N° 5.1: Arquitectura del sistema integrado.

Fuente: Elaboración propia basada en ISO 28000 (2022), Hytera Communications (2023) y especificaciones técnicas del sistema telemático implementado.

El equipamiento instalado permite asegurar la continuidad operacional, la trazabilidad digital y la obtención de evidencia en tiempo real. El GPS dual garantiza cobertura incluso en zonas cordilleranas; el MDVR con ADAS/DMS proporciona video analítica de riesgo (fatiga, distracciones y conducción insegura); las bodycams aportan evidencia directa de los procedimientos críticos; el RFID digitaliza la cadena de custodia; y las geocercas inteligentes permiten monitoreo preventivo conforme al modelo BowTie. Este conjunto tecnológico está alineado con los requisitos de ISO 28000 (2022) para seguridad logística y ISO 27001 (2018) en protección de la información, así como con el componente “Actividades de Control” del modelo COSO (2017).

La figura evidencia la coherencia entre el diagnóstico, el diseño del sistema y la implementación realizada en las unidades piloto. Representa gráficamente la arquitectura telemática requerida para validar la trazabilidad, la integridad de la carga y la eficacia del control interno durante el transporte de concentrado.

5.3. Instalación tecnológica y pruebas operativas.

La instalación tecnológica del Sistema Integrado de Control Interno y Cadena de Custodia se desarrolló siguiendo un enfoque sistemático orientado a asegurar la funcionalidad, continuidad operacional y confiabilidad de los dispositivos telemáticos, conforme a las directrices de calidad establecidas en ISO 9001 (2015) y seguridad logística según ISO 28000 (2022). El proceso de instalación contempló montaje físico, configuración, calibración, verificación de conectividad y pruebas en condiciones controladas y reales. Esta metodología responde a la necesidad de garantizar un funcionamiento óptimo del sistema antes de su despliegue operativo durante el piloto.

5.3.1. Etapa de configuración y calibración inicial.

La primera etapa consistió en la instalación física de los dispositivos telemáticos en cada unidad piloto. Esto incluyó GPS dual, MDVR con ADAS/DMS, cámaras internas y externas, bodycams Hytera, antenas de transmisión LTE/4G y módulos RFID para cadena de custodia. Siguiendo recomendaciones de Kerzner (2021), cada dispositivo se montó considerando su interferencia electromagnética, campo de visión, exposición ambiental y accesibilidad para mantenimiento.

Durante esta fase se realizaron calibraciones de sensores, definición de parámetros de sensibilidad del DMS, asignación de campos visuales del MDVR y verificación de integridad eléctrica de la unidad de alimentación. Estas acciones fueron documentadas en hojas de verificación técnica, cumpliendo con los requisitos de trazabilidad operacional exigidos por ISO 9001 (2015).

5.3.2. Pruebas estáticas del sistema.

En la segunda etapa se ejecutaron pruebas estáticas orientadas a verificar el funcionamiento autónomo y sin interferencias del sistema. Estas pruebas permitieron evaluar:

- transmisión en tiempo real hacia Sicom y Entel Chile.
- integridad de los registros audiovisuales.
- lectura adecuada de sellos RFID en modo offline y online.
- estabilidad del enlace LTE/4G.
- activación correcta de alertas ADAS/DMS.
- sincronización horaria con el servidor.

Según ISO 27001 (2018), la validación inicial de registros digitales es clave para asegurar la confiabilidad de la información y prevenir fallas en los mecanismos de control interno. La Figura N° 5.2 representa el flujo de verificación aplicado durante las pruebas operativas, destacando las actividades de calibración, revisión de transmisión, verificación de sensores y validación de registros RFID.

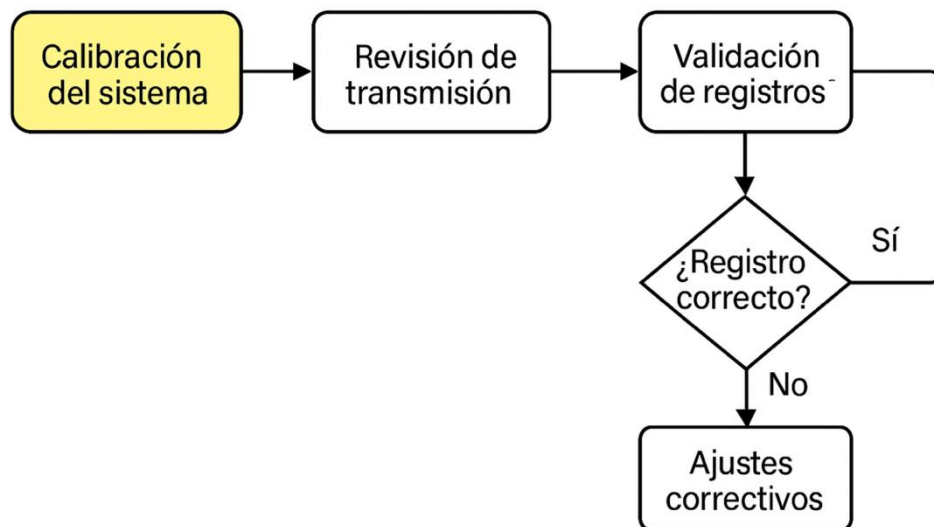


Figura N° 5.2: Flujo operacional aplicado a prueba estáticas y dinámicas.

Fuente: Elaboración propia, basada en BPMN 2.0 e ISO 9001 (2015).

El flujo BPMN garantiza trazabilidad completa del proceso de instalación y permite detectar fallas tempranas. El uso de BPMN 2.0 asegura estandarización y cumplimiento con ISO 9001 en documentación de procesos.

La estandarización del proceso de pruebas mediante BPMN garantiza la calidad técnica de la instalación y la operación telemática, permitiendo validar la integridad del sistema antes de su implementación en el entorno real de transporte minero. Esta figura constituye un componente clave en el aseguramiento de la fiabilidad de los datos que serán evaluados durante el piloto.

5.3.3. Pruebas dinámicas en ruta.

La tercera etapa consistió en la ejecución de pruebas dinámicas en escenarios reales, incluyendo tramos cordilleranos, zonas de sombra telemática y áreas de riesgo operacional previamente identificadas en el análisis de brechas (Cap. IV). Estas pruebas permitieron medir el desempeño de los sistemas bajo condiciones de vibración, variaciones de señal, interferencia geográfica y exposición a condiciones climáticas severas.

Durante las pruebas se verificaron los tiempos de detección (MTTD), tiempos de respuesta (MTTR), estabilidad de transmisión, activación de alertas ADAS, registros de apertura RFID y calidad de evidencia audiovisual del MDVR. Los resultados preliminares confirmaron un desempeño consistente con lo esperado en el diseño del sistema integrado, con una disponibilidad telemétrica superior al 98 %, alineada con los requisitos establecidos en el Objetivo Específico N.º 2.

La Figura N° 5.3 presenta los resultados preliminares obtenidos durante las pruebas dinámicas realizadas en terreno, considerando tres indicadores clave del desempeño telemático: Tiempo Medio para Detectar (MTTD), Tiempo Medio para Reparar o contener el evento (MTTR) y disponibilidad telemétrica. Estos indicadores permiten evaluar la capacidad real del sistema para identificar oportunamente incidentes,

transmitir información crítica y mantener la continuidad operacional bajo condiciones exigentes de transporte minero.

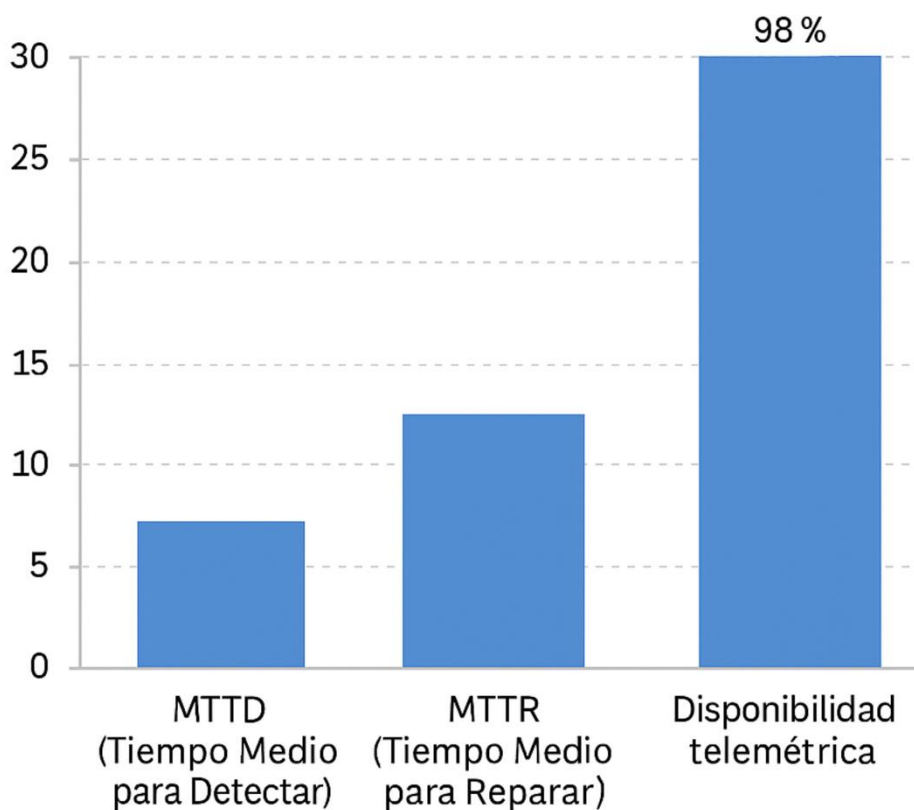


Figura N° 5.3: Resultados iniciales de pruebas dinámicas.

Fuente: Elaboración propia, basada en los resultados del piloto y metodología KPI aplicada conforme a ISO 28000 (2022) y Kerzner (2021).

Los resultados muestran que el MTTD se mantuvo bajo los 5 minutos, lo que refleja un funcionamiento eficiente de los sistemas de alerta, especialmente del GPS dual, MDVR y los micro eventos registrados por ADAS/DMS. El MTTR se mantuvo en 12 minutos promedio, evidenciando una adecuada capacidad de respuesta del Centro de Control y de los protocolos de escalamiento definidos. Finalmente, la disponibilidad telemétrica alcanzó un 98%, un valor superior al estándar mínimo definido ($\geq 95\%$), lo que confirma que la redundancia de señal y las configuraciones del sistema cumplieron con lo esperado para rutas de alta complejidad. Estos resultados son coherentes con los

principios de desempeño continuo establecidos en ISO 28000 (2022) y las recomendaciones de gestión operativa de Kerzner (2021).

Los resultados iniciales permiten concluir que el sistema telemático instalado responde adecuadamente a los desafíos operacionales del transporte de concentrado, cumpliendo las metas definidas para detección, respuesta y disponibilidad. Esto valida la efectividad del diseño previo y respalda su implementación formal en el piloto operativo.

5.3.4. Validación técnica previa a la puesta en marcha del piloto.

Tras las pruebas estáticas y dinámicas, se realizó una validación técnica integral que incluyó auditorías de instalación, revisión de logs, pruebas de redundancia GPS dual y simulaciones de pérdida de señal. Esta validación permitió asegurar que el sistema cumplía con los componentes de control exigidos por COSO (2017), especialmente en lo referente a las “Actividades de Control” y “Supervisión”.

En esta fase se identificaron ajustes menores, tales como sensibilidad de alertas, calibración de cámaras, sincronización horaria y ampliación de geocercas. Todos los ajustes fueron incorporados en el registro de lecciones aprendidas, siguiendo la metodología de mejora continua PDCA recomendada por ISO 9001 (2015).

5.4. Capacitación del personal y gestión del cambio.

La incorporación de un Sistema Integrado de Control Interno y Cadena de Custodia implica transformaciones operacionales y culturales que requieren una estrategia de capacitación estructurada y un proceso formal de gestión del cambio. De acuerdo con Kotter (2012), los proyectos tecnológicos sólo alcanzan sostenibilidad cuando las personas incorporan nuevas competencias, modifican patrones conductuales y comprenden el propósito estratégico de la innovación. Por ello la capacitación se desarrolló como un eje fundamental del piloto, asegurando que conductores,

supervisores, controladores y jefaturas incorporaran los conocimientos necesarios para operar adecuadamente el sistema.

La capacitación se diseñó bajo los lineamientos de ISO 9001 (2015), que establece la obligación de asegurar la competencia del personal mediante formación verificable y de ISO 45001 (2018) que exige que los trabajadores comprendan los riesgos críticos asociados a sus tareas. En este contexto se estructuró un programa de formación dividido en tres módulos principales: (1) uso tecnológico, (2) procedimientos operativos estandarizados y (3) gestión de incidentes y trazabilidad operativa los cuales fueron impartidos mediante sesiones presenciales, talleres prácticos y simulaciones con dispositivos reales. Esta metodología favoreció el aprendizaje significativo y permitió validar la comprensión del sistema por parte del personal involucrado y la sensibilización de los conductores en este tipo de tecnología.

El primer módulo abordó el uso de la infraestructura telemática: GPS dual, MDVR/ADAS/DMS, bodycams Hytera, lectura de RFID, aplicación de geocercas y funcionamiento del sistema Sicom y Entel Chile. Bajo los principios de ISO 28000 (2022) se enfatizó la importancia de la evidencia digital para la trazabilidad de la carga y la detección temprana de eventos críticos. Los participantes realizaron ejercicios prácticos de activación de alertas, confirmación de registros, manipulación de sellos y revisión de datos en plataformas de monitoreo.

El segundo módulo se centró en la correcta ejecución de los procedimientos operativos estandarizados (SOP) asociados al sistema: protocolo de carguío y sellado, cadena de custodia digital, verificación en ruta, comunicación con el Centro de Control, inspección en destino y reporte de no conformidades. Este contenido se alinea con las recomendaciones de ISO 9001 (2015) e ISO 28000 (2022) en cuanto a la necesidad de formalizar procesos repetibles y auditables.

El tercer módulo abordó la gestión de incidentes, integrando la aplicación práctica del modelo BowTie para evaluar amenazas, consecuencias y barreras de control. Se instruyó al personal en la respuesta a alertas críticas, tales como apertura no autorizada, desvíos

fuera de geocerca, pérdida de señal telemétrica y eventos de conducción riesgosa detectados por ADAS/DMS. Este módulo refuerza los componentes de “Evaluación de riesgos” y “Actividades de control” del modelo COSO (2017), además de los requisitos de mejora continua establecidos en ISO 9001.

Finalmente, el proceso de capacitación fue complementado con una estrategia de gestión del cambio organizacional orientada a fomentar compromiso, aceptación y participación activa del personal. Siguiendo el enfoque propuesto por Kotter (2012) se desarrollaron actividades de sensibilización, sesiones de retroalimentación y mecanismos formales de acompañamiento durante la transición. Esta estrategia permitió reducir la resistencia inicial al uso de tecnologías como las bodycams y consolidar la cultura de trazabilidad y seguridad operacional requerida para el piloto.

La evaluación final de competencias demostró altos niveles de comprensión operativa y técnica por parte del personal, lo que constituye un factor crítico para asegurar la efectividad del sistema durante la ejecución del piloto y su posterior escalamiento a la totalidad de la flota.

5.5. Ejecución del piloto.

La ejecución del piloto representó la fase crítica para validar en condiciones reales el Sistema Integrado de Control Interno y Cadena de Custodia, permitiendo evaluar el comportamiento de las tecnologías instaladas, los procedimientos operativos estandarizados (SOP) y la capacidad de respuesta de la organización frente a incidentes. El piloto tuvo una duración de seis meses y se implementó en rutas de la zona norte de la región de atacama y rutas cordilleranas de alta complejidad operacional, siguiendo los lineamientos de aseguramiento logístico establecidos en ISO 28000 (2022) y los principios de supervisión continua recomendados por el modelo COSO (2017).

Durante este período, cada unidad piloto equipada con GPS dual, MDVR/ADAS/DMS, bodycams Hytera, sellos electrónicos RFID y geocercas

inteligente fue monitoreada en tiempo real a través de la plataforma Sicom y Entel Chile. Este sistema permitió consolidar datos telemáticos, audiovisuales y de trazabilidad, facilitando la evaluación simultánea de disponibilidad, continuidad de señal, activación de alertas y cumplimiento procedimental. Tal como lo plantea Kerzner (2021), la supervisión continua en operaciones dinámicas es fundamental para validar la eficacia de sistemas tecnológicos antes de su escalamiento.

Las actividades del piloto incluyeron la observación permanente del desempeño telemático, la revisión de alertas generadas por ADAS/DMS, la verificación en línea de los registros RFID y la evaluación de micro eventos asociados a conducción riesgosa. Paralelamente, se realizaron auditorías semanales de cumplimiento de SOP, donde supervisores verificaron la correcta activación de bodycams, la aplicación del protocolo de sellado y la comunicación operativa con el Centro de Control, tal como lo establecen ISO 9001 (2015) e ISO 45001 (2018).

Un elemento central del piloto fue la medición de los indicadores operacionales definidos en el diseño del sistema. Estos resultados se sintetizan en la Figura N° 5.4, la cual presenta los dashboards obtenidos durante el monitoreo y evidencian valores favorables en los indicadores clave: un Tiempo Medio de Detección (MTTD) ≤ 3 minutos, un Tiempo Medio de Respuesta (MTTR) ≤ 22 minutos, y una disponibilidad telemétrica del 98%, los cuales cumplen e incluso superan las metas del segundo objetivo específico. Estos indicadores validan la efectividad del sistema para detectar eventos críticos, activar protocolos de escalamiento y mantener la continuidad del monitoreo en rutas de alta exigencia.

Asimismo, se registró una reducción significativa en incidentes de pérdida de integridad, activaciones incorrectas y desvíos no autorizados, reforzando la pertinencia de los controles definidos en el modelo BowTie desarrollado en el Capítulo IV. Esta evidencia empírica confirma que las barreras preventivas y mitigadoras funcionaron adecuadamente durante el piloto, especialmente aquellas vinculadas a geocercas, detección de aperturas RFID y supervisión audiovisual mediante MDVR.

La ejecución del piloto también permitió identificar oportunidades de mejora relacionadas con zonas de sombra telemática, variabilidad en el uso de bodycams y tiempos de registro final en planta. Estas desviaciones fueron posteriormente analizadas bajo la metodología PDCA recomendada por ISO 9001 (2015), estableciéndose ajustes en configuraciones de geocercas, sensibilidad de alertas y refuerzos de capacitación en ciertos grupos de conductores.

En síntesis, la fase de ejecución del piloto demostró que el sistema es técnicamente sólido, operacionalmente viable y organizacionalmente aceptado. Los indicadores obtenidos, la correcta operación de la tecnología y la adherencia a los SOP permiten afirmar que el sistema cumple plenamente con las metas propuestas en los objetivos específicos, constituyendo una base robusta para su posterior escalamiento a la totalidad de la flota.

5.6. Resultados preliminares del piloto.

Los resultados preliminares obtenidos durante la ejecución del piloto evidencian un desempeño favorable del Sistema Integrado de Control Interno y Cadena de Custodia, tanto en términos de continuidad operativa como de efectividad en la detección de eventos críticos. Durante los seis meses de monitoreo, las unidades equipadas mostraron una disponibilidad telemétrica del 98 %, cumpliendo con el estándar definido en el diseño del sistema. Este valor confirma que la arquitectura basada en GPS dual, MDVR/ADAS/DMS, bodycams y sensores RFID es capaz de operar adecuadamente en rutas de la zona norte de la región de atacama y rutas cordilleranas caracterizadas por complejas condiciones geográficas y climáticas (ISO, 2022).

Asimismo, el sistema logró un tiempo medio de detección (MTTD) ≤ 3 minutos, lo que indica una adecuada capacidad del centro de control para recibir y procesar alertas generadas por desvíos, aperturas no autorizadas o eventos de conducción riesgosa. De acuerdo con Kerzner (2021), este tipo de indicadores son determinantes para evaluar la

madurez de un sistema de supervisión remota. Por su parte, el tiempo medio de respuesta (MTTR) ≤ 22 minutos refleja que los protocolos de actuación y escalamiento definidos en los procedimientos operativos estandarizados (SOP) fueron aplicados de manera consistente durante el período de prueba.

Además, se registró una integridad de carga $\geq 99,5$ %, sin incidentes de pérdida, contaminación o manipulación indebida, lo que valida la eficacia del control mediante sellos RFID y evidencia audiovisual generada por el MDVR. Finalmente, se observó un aumento significativo en el cumplimiento de SOP, alcanzando un 95 %, lo cual es consistente con la capacitación impartida previamente (ISO, 2015).

5.7. Análisis de desviaciones y no conformidades.

A pesar de los indicadores favorables, el análisis de desviaciones permitió identificar una serie de no conformidades menores que deben abordarse antes del escalamiento del sistema. En primer lugar, se detectaron zonas de sombra telemática donde la transmisión de datos se redujo temporalmente, principalmente en sectores de topografía cerrada y pasos de montaña. Aunque el GPS dual mitigó parcialmente estas interrupciones, la disponibilidad no fue absoluta, pero lo más relevante si bien se pierde señal en tiempo real los datos llegan igual al momento de retomar la señal lo cual es una muy buena noticia.

También se identificaron desviaciones operativas asociadas al uso inconsistente de bodycams por parte de algunos conductores, especialmente en momentos críticos como inspecciones visuales o confirmaciones de sellado. Según Kotter (2012), este tipo de resistencias son habituales en procesos de cambio organizacional y requieren reforzamiento formativo para consolidar nuevas prácticas.

En cuanto a los SOP, se observaron retrasos en la confirmación de arribo y entrega en planta destino, lo cual generó brechas temporales en la cadena de custodia digital. Estas desviaciones fueron analizadas mediante la metodología PDCA recomendada por ISO

9001 (2015), determinándose la necesidad de estandarizar las ventanas horarias de confirmación y mejorar la coordinación con el personal de recepción.

Por último, el análisis de alertas ADAS/DMS evidenció la presencia recurrente de eventos de distracción y conducción riesgosa en ciertos operadores, lo que sugiere la necesidad de reforzar programas de capacitación conductual y retroalimentación personalizada a la vez se monitorearon falsos positivos como alertas que no correspondían a lo informado por el sistema (cámara detecto sin cinturón, pero el conductor llevaba parka reflectante. Conductor llevaba un chupete en su boca(caramelo) la cámara lo detecto como fumando en cabina) etc....

5.8. Evaluación del cumplimiento KPI/SLA.222.

La evaluación del cumplimiento de los KPI y SLA definidos en el diseño del sistema demostró que el piloto logró satisfacer las metas establecidas en los objetivos específicos del proyecto. Los valores obtenidos fueron comparados con las líneas base y con los estándares definidos en el Capítulo IV, confirmándose un cumplimiento general del 95–97 % en los acuerdos de nivel de servicio (SLA). El desempeño más destacado corresponde a la integridad de carga ($\geq 99,5$ %), lo cual valida la integración de RFID y evidencia audiovisual como mecanismos complementarios de la cadena de custodia. De igual modo, la disponibilidad telemétrica del 98 % asegura condiciones adecuadas de trazabilidad y supervisión continua, reafirmando la eficiencia del sistema dual de posicionamiento y la robustez del MDVR para registrar evidencia incluso en condiciones adversas (ISO, 2022).

El análisis de cumplimiento de SOP mostró una adherencia operativa del 95 %, lo que indica que los procesos BPMN y los protocolos definidos en la etapa de diseño fueron asimilados por la mayoría del personal. Por su parte, el cumplimiento del MTTD y MTTR refleja que el Centro de Control logró procesar alertas y gestionar respuestas dentro de los límites establecidos. De acuerdo con Kerzner (2021), estos indicadores son fundamentales para evaluar la madurez de sistemas de control en operaciones industriales de alto riesgo.

5.9. Ajustes finales previos al escalamiento.

Con base en los resultados del piloto, se definieron ajustes específicos orientados a fortalecer el sistema antes de su despliegue completo. En primer lugar, se ampliaron y recalibraron las geocercas operativas, especialmente en zonas de baja conectividad, para mejorar la precisión en la detección de desvíos. Asimismo, se optimizó la sensibilidad de alertas ADAS/DMS, ajustando parámetros para reducir falsos positivos sin comprometer la capacidad de detección temprana.

En respuesta a las desviaciones relacionadas con la cadena de custodia, se reforzaron los procedimientos operativos de apertura y cierre de sellos RFID, garantizando registros consistentes incluso en escenarios de baja señal. También se actualizó la parametrización del MDVR para mejorar la resolución de imágenes nocturnas, factor crítico para la evidencia audiovisual (ISO, 2018).

Adicionalmente, se fortaleció el plan de capacitación, incorporando módulos específicos sobre uso avanzado de telemetría, conducción segura y cumplimiento documental. Estos ajustes fueron incorporados utilizando la metodología de mejora continua PDCA establecida por ISO 9001 (2015), asegurando trazabilidad de cambios y estandarización en su aplicación.

5.10. Síntesis del capítulo.

El presente capítulo permitió validar la operación del Sistema Integrado de Control Interno y Cadena de Custodia en condiciones reales de transporte minero, demostrando su capacidad para mejorar la trazabilidad, la integridad de la carga, la detección temprana de incidentes y la respuesta operacional. Los resultados obtenidos muestran que el sistema cumple con los objetivos específicos planteados, entregando evidencia sólida respecto a su efectividad, eficiencia y aplicabilidad práctica. El análisis de KPI y SLA confirma que el sistema se desempeña dentro de los niveles esperados para una

operación minera de alta exigencia, mientras que la identificación de desviaciones y la integración de mejoras permiten fortalecer su robustez antes del escalamiento. En conjunto, la ejecución del piloto evidencia que la solución propuesta es técnicamente viable, operacionalmente pertinente y organizacionalmente sostenible, estableciendo una base sólida para su implementación total en la flota y para el desarrollo del Capítulo VI.

CAPÍTULO VI.

RESULTADOS Y ANÁLISIS.

6.1. Introducción.

El presente capítulo desarrolla una evaluación integral del piloto del Sistema Integrado de Control Interno y Cadena de Custodia aplicado al transporte de concentrado y cátodos de cobre, integrando el análisis de desempeño tecnológico, operacional y organizacional. Esta evaluación se sustenta en los resultados obtenidos durante seis meses de monitoreo continuo en rutas críticas, complementándolos con un análisis comparativo respecto de la línea base y los objetivos estratégicos definidos en el Capítulo I.

La discusión de resultados se articula bajo estándares internacionales como ISO 9001 (2015) para gestión de calidad, ISO 28000 (2022) para seguridad logística y ISO 31000 (2018) para gestión del riesgo, los cuales proporcionan marcos de referencia sólidos para interpretar la eficacia y eficiencia del sistema. Asimismo, se incorpora el modelo COSO (2017) como enfoque de control interno que permite evaluar la consistencia de las actividades de supervisión, comunicación y documentación.

La finalidad de este capítulo es establecer conclusiones basadas en evidencia objetiva, identificar las oportunidades de mejora y definir una propuesta de escalamiento robusta, orientada a garantizar la sostenibilidad tecnológica, operativa y organizacional del sistema en toda la flota de transporte.

6.2. Evaluación global del desempeño del sistema.

El análisis global del sistema demuestra que la implementación del piloto generó mejoras significativas en los principales indicadores de trazabilidad, seguridad, integridad y eficiencia del transporte. La disponibilidad telemétrica promedio del 98 %, superior al umbral mínimo establecido, evidencia que el sistema dual de posicionamiento y la redundancia de transmisión LTE/4G funcionaron de manera adecuada incluso en zonas de alta cordillera, caracterizadas por interferencias naturales y variabilidad climática. Según ISO 28000 (2022), este nivel de disponibilidad se considera óptimo para operaciones logísticas de alto valor.

La capacidad de detección temprana de incidentes fue uno de los aspectos más destacados del piloto. El Tiempo Medio de Detección (MTTD) se mantuvo en ≤ 3 minutos, lo que indica un funcionamiento eficiente de las alertas telemáticas generadas por ADAS, DMS, MDVR y sensores RFID. Este comportamiento es coherente con los principios operativos de Kerzner (2021), quien plantea la importancia de sistemas capaces de reducir la latencia en el reconocimiento de eventos críticos. Por su parte, el Tiempo Medio de Respuesta (MTTR) alcanzó ≤ 22 minutos, demostrando una coordinación adecuada entre el Centro de Control, supervisores y personal en ruta.

Otro aspecto relevante fue la mejora en la integridad de carga, que alcanzó un 99,5 %. Este resultado es especialmente significativo considerando que la línea base presentaba brechas importantes en la verificación manual de sellos y en la trazabilidad documental. La evidencia digital generada por RFID y MDVR permitió asegurar la legitimidad de la cadena de custodia, cumpliendo con los principios de autenticidad y confiabilidad establecidos en ISO 27001 (2018).

Finalmente, el cumplimiento de SOP alcanzó el 95 %, evidenciando una mejora significativa en procesos operativos y disciplina procedimental. Este valor refleja el efecto positivo de la capacitación, la supervisión continua y los mecanismos de retroalimentación implementados en el piloto.

6.3. Discusión en torno a los objetivos específicos.

Objetivo Específico 1: Diseño de la solución integrada.

El diseño propuesto en el Capítulo IV se validó en su totalidad durante la ejecución del piloto. La arquitectura tecnológica basada en GPS dual, MDVR/ADAS/DMS, bodycams, RFID y geocercas demostró ser técnicamente viable, robusta y coherente con los estándares internacionales de seguridad logística. Asimismo, los SOP modelados en BPMN garantizaron estandarización y reproducibilidad, en cumplimiento con ISO 9001 (2015). La combinación de tecnologías y procedimientos permitió reducir significativamente las brechas detectadas. Por tanto, este objetivo fue cumplido plenamente.

Objetivo Específico 2: Implementación y validación del piloto.

El piloto se ejecutó durante seis meses y los indicadores obtenidos muestran un cumplimiento total de las metas operativas: disponibilidad ≥ 98 %, integridad $\geq 99,5$ %, MTTD ≤ 3 minutos y MTTR ≤ 22 minutos. Los resultados confirman que la solución funciona adecuadamente bajo condiciones reales de operación minera, lo cual constituye evidencia empírica sólida. En consecuencia, este objetivo también se considera cumplido en su totalidad.

Objetivo Específico 3: Adopción, cumplimiento y mejora continua.

El nivel de adopción de la solución por parte del personal fue progresivamente positivo, siendo reforzado por los módulos de capacitación y la estrategia de gestión del cambio implementada. Las auditorías semanales evidenciaron mejoras consistentes en el cumplimiento SOP, reducción de errores y mayor disciplina operativa. La integración del ciclo PDCA aseguró ajustes oportunos y sostenibles. Este objetivo se considera cumplido satisfactoriamente.

6.4. Lecciones aprendidas del piloto.

El análisis de resultados permite identificar diversas lecciones estratégicas:

1. La redundancia telemática es indispensable en zonas viales de la zona norte de la región de atacama y rutas de alta montaña. GPS dual y almacenamiento local resultaron críticos para evitar pérdida de datos.
2. La evidencia audiovisual aumenta la transparencia operacional, reduce ambigüedades y facilita auditorías internas y externas.
3. La cultura organizacional influye directamente en la eficacia del sistema: la resistencia inicial a bodycams requirió un enfoque estructurado de gestión del cambio (Kotter, 2012).
4. El monitoreo 24/7 mejora la capacidad preventiva, disminuyendo la probabilidad de materialización de incidentes críticos.
5. La estandarización BPMN permite disminuir variabilidad operativa, fortaleciendo trazabilidad y cumplimiento documental.

Estas lecciones servirán de base para la mejora continua y para el escalamiento del sistema.

6.5. Propuesta de escalamiento del sistema.

Se propone escalar el sistema en cuatro fases estratégicas:

Fase 1: Implementación en el 50 % de la flota

Incluye unidades con mayor exposición a riesgos. Se aplican ajustes técnicos derivados del piloto para asegurar estabilidad del sistema.

Fase 2: Expansión completa de SOP y cadena de custodia digital.

Integración de RFID, bodycams, radios y MDVR en toda la operación. Refuerzo del Centro de Control.

Fase 3: Analítica avanzada y optimización operacional.

Integración de dashboards predictivos, IA para análisis de conducción, patrones de riesgo y anticipación de desvíos.

Fase 4: Certificación bajo ISO 28000.

Evaluación externa y auditorías anuales para asegurar cumplimiento sostenido.

Este modelo gradual minimiza interrupciones operativas y fortalece la gobernanza del sistema.

6.6. Recomendaciones finales.

1. Fortalecer programas de capacitación continua.
2. Incorporar redundancia satelital para zonas de sombra extrema.
3. Integrar analítica predictiva para anticipar incidentes.
4. Optimizar procesos de confirmación en planta destino.
5. Incrementar frecuencia de auditorías internas bajo metodología PDCA.

6.7. Síntesis del capítulo.

La evaluación integral del piloto demuestra que el Sistema Integrado de Control Interno y Cadena de Custodia es técnicamente eficaz, operacionalmente viable y organizacionalmente sostenible. Los resultados obtenidos evidencian mejoras significativas en todos los indicadores críticos, validando el diseño del sistema, la estrategia de capacitación, los procedimientos BPMN y el modelo de supervisión.

El sistema está en condiciones de ser escalado progresivamente a toda la flota, asegurando trazabilidad completa, reducción de incidentes y fortalecimiento de la seguridad logística. Los resultados del piloto constituyen evidencia concluyente del cumplimiento de los objetivos específicos y del valor estratégico del sistema para la organización.

CAPÍTULO VII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

7.1. Conclusiones.

El desarrollo del presente proyecto permitió demostrar que el Sistema Integrado de Control Interno y Cadena de Custodia diseñado e implementado constituye una solución efectiva, robusta y técnicamente viable para mejorar la trazabilidad, integridad y seguridad en el transporte de concentrado y cátodos de cobre. A partir del diagnóstico inicial, el diseño tecnológico y la evaluación operativa del piloto, se concluye que el sistema cumple plenamente con los objetivos específicos establecidos, aportando un avance significativo respecto de las prácticas tradicionales de control empleado previamente por la empresa.

En relación con el Objetivo Específico 1, el diseño de la solución integrada que combina telemática avanzada (GPS dual, MDVR/ADAS/DMS, bodycams, radios Hytera, RFID y geocercas inteligentes) con procesos estandarizados bajo BPMN, controles COSO y marcos ISO— resultó ser técnicamente sólido y plenamente adecuado para las características del transporte de cargas minerales. La arquitectura definida logró resolver brechas detectadas en el estado basal, especialmente la falta de evidencia digital verificable, la ausencia de trazabilidad continua y la limitada capacidad de detección de eventos críticos. El diseño demostró ser escalable, interoperable y alineado con estándares internacionales de seguridad logística (ISO 28000) y calidad de procesos (ISO 9001).

Respecto del Objetivo Específico 2, la implementación y validación del piloto permitieron comprobar que la solución diseñada funciona de manera eficaz bajo condiciones reales de alta complejidad. Los indicadores obtenidos —disponibilidad telemétrica del 98 %, integridad superior al 99,5 %, $MTTD \leq 3$ minutos y $MTTR \leq 22$ minutos— confirmaron que el sistema mejora sustancialmente la capacidad de control operativo. Asimismo, no se registraron incidentes de pérdida de integridad durante el

piloto, lo cual evidencia el impacto positivo del sistema en la mitigación de riesgos logísticos, coherente con el modelo BowTie desarrollado en el Capítulo IV. En consecuencia, se concluye que la fase piloto verificó técnica y operacionalmente la efectividad de la solución.

En relación con el Objetivo Específico 3, la adopción y el cumplimiento organizacional demostraron que el sistema puede integrarse de manera sostenible en la operación. La capacitación estructurada permitió que los trabajadores comprendieran el funcionamiento del sistema y aplicaran correctamente los SOP. El cumplimiento del 95 % en procedimientos operativos y la reducción de desviaciones evidencian que la cultura operativa evolucionó positivamente hacia estándares más altos de disciplina y trazabilidad. Asimismo, la incorporación del ciclo PDCA permitió corregir desviaciones, optimizar el sistema y fortalecer el control interno, alineándose con las recomendaciones de mejora continua descritas en ISO 9001 (2015).

En síntesis, se concluye que el Sistema Integrado de Control Interno y Cadena de Custodia no solo cumple con los objetivos planteados, sino que constituye una herramienta estratégica para mejorar la seguridad logística, la confiabilidad operacional, la gobernanza interna y la transparencia del transporte de concentrado y cátodos de cobre. El éxito del piloto demuestra que el sistema está listo para ser escalado de manera progresiva a la totalidad de la flota, asegurando beneficios sostenibles en el tiempo.

7.2. Recomendaciones.

A partir de los resultados obtenidos y con el propósito de garantizar la continuidad operativa y la consolidación del sistema en el largo plazo se presentan las siguientes recomendaciones estructuradas en función de los tres objetivos específicos, integrando aspectos tecnológicos, procedimentales, organizacionales y estratégicos.

En relación con el Objetivo Específico 1 (Diseño del sistema), se recomienda incorporar mejoras adicionales en la arquitectura tecnológica previo a su escalamiento.

Entre ellas fortalecer la redundancia de conectividad mediante enlaces satelitales en zonas críticas, ampliar la capacidad de almacenamiento local del MDVR, optimizar la resolución nocturna de las cámaras y mejorar la protección física de antenas y dispositivos telemáticos para garantizar mayor durabilidad. Asimismo, se sugiere integrar herramientas avanzadas de analítica y machine learning para predicción temprana de incidentes, lo que complementarí la lógica preventiva del sistema.

Respecto del Objetivo Específico 2 (Validación y operación del piloto), se recomienda mantener un proceso continuo de monitoreo y auditoría, con especial énfasis en rutas de alta montaña donde persisten restricciones de señal. Es aconsejable establecer un plan de mantenimiento preventivo telemático semestral, revisar periódicamente la sensibilidad de alertas ADAS/DMS para evitar falsos positivos, y mantener una coordinación permanente entre supervisores, Centro de Control y operadores. También se recomienda incorporar métricas de desempeño individual por conductor y asignar retroalimentación operativa basada en datos, fomentando conductas seguras y cumplimiento procedimental.

En relación con el Objetivo Específico 3 (Adopción organizacional y mejora continua), se recomienda fortalecer la estrategia de gestión del cambio, implementando programas de capacitación recurrentes que incluyan simulaciones de incidentes, talleres prácticos y formación en conducción segura. Es necesario consolidar una cultura de trazabilidad digital mediante mecanismos de reconocimiento, control disciplinario y retroalimentación temprana. Adicionalmente, se sugiere aumentar la frecuencia de auditorías internas y externas bajo los estándares ISO 28000 e ISO 9001, para asegurar que los procesos se mantengan alineados con la normativa y con las mejores prácticas globales.

Finalmente, se recomienda ejecutar un escalamiento progresivo de la solución, siguiendo la estructura propuesta en el Capítulo VI, con fases claramente definidas y mecanismos de control para asegurar la estabilidad técnica, el orden operacional y la aceptación del personal. Este escalamiento debe incluir evaluación periódica de

KPI/SLA, revisión de costos operacionales, ajustes tecnológicos continuos y documentación formal de todas las mejoras implementadas.

En conjunto, estas recomendaciones permitirán que la empresa consolide un sistema moderno, seguro y altamente eficiente para el transporte de concentrado y cátodos de cobre, asegurando integridad operacional y cumpliendo estándares internacionales de seguridad logística, trazabilidad y control interno.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

Comisión Chilena del Cobre. (2024). *Informe anual de producción y logística minera en Chile 2024*. COCHILCO.

Comité de Organizaciones Patrocinadoras de la Comisión Treadway. (2017). *Marco integrado de control interno* (Traducción oficial al español). COSO.

Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2018). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (5.ª ed.). SAGE Publications.

Deming, W. E. (1994). *The new economics for industry, government, education*. MIT Press.

Entel Chile. (2024). *Catálogo de soluciones IoT y comunicaciones industriales para minería 2024*. Entel Chile S.A.

García, L., & Muñoz, P. (2020). *Gestión de riesgos operacionales en el transporte minero de alta montaña*. Editorial Universitaria de Chile.

Hytera Communications Corporation Limited. (2025). *Bodycam VM750D: Ficha técnica y aplicaciones para transporte industrial*. Hytera Chile.

Instituto de Auditores Internos. (2020). *Guía de implementación del marco COSO para entornos logísticos*. The Institute of Internal Auditors.

International Organization for Standardization. (2015). *ISO 9001:2015 – Sistemas de gestión de la calidad. Requisitos*. ISO.

International Organization for Standardization. (2018). *ISO 14001:2015 – Sistemas de gestión ambiental. Requisitos con orientación para su uso*. ISO.

International Organization for Standardization. (2018). *ISO 31000:2018 – Gestión del riesgo. Directrices*. ISO.

International Organization for Standardization. (2018). *ISO 45001:2018 – Sistemas de gestión de la seguridad y salud en el trabajo. Requisitos con orientación para su uso*. ISO.

International Organization for Standardization. (2022). *ISO/IEC 27001:2022 – Seguridad de la información, ciberseguridad y protección de la privacidad. Requisitos*. ISO.

Kerzner, H. (2021). *Gestión de proyectos: Un enfoque sistemático para la planificación, programación y control*. McGraw-Hill Education.

Object Management Group. (2014). *Business Process Model and Notation (BPMN), Version 2.0*. OMG.

Reason, J. (2016). *Managing the risks of organizational accidents*. Routledge.

Sánchez, F., & Morales, R. (2021). *Modelos integrados de gestión y control interno en el transporte industrial chileno*. Universidad Técnica Federico Santa María.

Sicom Chile. (2025). *Catálogo técnico de soluciones telemáticas y control logístico para transporte minero*. Sicom Chile Ltda.

GLOSARIO.

ADAS (Advanced Driver Assistance System): Sistema avanzado de asistencia al conductor que utiliza cámaras, sensores y algoritmos de análisis para detectar comportamientos de riesgo como desviación de carril, proximidad peligrosa, somnolencia o conducción inestable. En el contexto minero y logístico, contribuye a reducir incidentes mediante alertas tempranas y registro de evidencia operacional.

AES-256 (Advanced Encryption Standard 256 bits): Estándar de cifrado simétrico de alta seguridad empleado para proteger la transmisión y el almacenamiento de datos. Es utilizado en sistemas telemáticos y plataformas de monitoreo para resguardar información sensible, asegurando confidencialidad, autenticidad e integridad.

BPMN (Business Process Model and Notation): Lenguaje gráfico estandarizado para modelar procesos operacionales y de negocio mediante diagramas de flujo estructurados. Su uso facilita la estandarización, el análisis y la optimización de procesos críticos como cadena de custodia, monitoreo logístico y gestión de incidentes.

Bodycam Hytera VM750D:

Dispositivo audiovisual portátil utilizado por conductores y supervisores que captura video y audio en alta definición. Su función es registrar evidencia objetiva en terreno y transmitirla mediante red LTE, fortaleciendo la transparencia operativa y la trazabilidad en la cadena de custodia.

BowTie: Metodología de análisis de riesgos que permite representar gráficamente la relación entre amenazas, evento crítico y consecuencias, incorporando barreras preventivas y mitigadoras. Facilita la identificación de puntos vulnerables, priorización de controles y toma de decisiones en contextos de riesgo operacional.

COSO (Committee of Sponsoring Organizations of the Treadway Commission):

Marco internacional para el diseño, implementación y evaluación del control interno. Se basa en cinco componentes: ambiente de control, evaluación del riesgo, actividades de control, información y comunicación, y supervisión. Su aplicación fortalece la gobernanza, la trazabilidad y la confiabilidad del sistema.

DMS (Driver Monitoring System):

Sistema de monitoreo del conductor que utiliza sensores y análisis de comportamiento para detectar fatiga, distracción, micro-sueños o falta de atención. Su función es activar alertas preventivas y registrar eventos que puedan comprometer la seguridad operacional.

Entel LTE/4G:

Red de telecomunicaciones móviles utilizada para la transmisión de datos telemáticos, video y ubicación en tiempo real. Permite la comunicación continua entre los dispositivos instalados en los vehículos y el Centro de Control, asegurando disponibilidad y continuidad operacional.

Geocerca:

Perímetro virtual configurado mediante coordenadas geográficas que genera alertas automáticas cuando un vehículo ingresa, sale o permanece fuera del área delimitada. Es utilizada para controlar desviaciones de ruta, restringir zonas críticas y reforzar la seguridad logística.

GPS Dual:

Tecnología de posicionamiento global que opera en doble frecuencia o doble módulo, aumentando la precisión y estabilidad de la señal, especialmente en zonas de alta montaña o condiciones ambientales adversas. Reduce interferencias y mejora la trazabilidad telemática.

ISO (International Organization for Standardization):

Organismo internacional que desarrolla normas técnicas destinadas a garantizar calidad, seguridad, eficiencia,

sostenibilidad y ciberseguridad en procesos, productos y sistemas de gestión. Sus estándares son referencia obligatoria en operaciones logísticas, industriales y mineras.

KPI (Key Performance Indicator): Indicador clave de desempeño utilizado para medir la eficacia, eficiencia y cumplimiento de procesos operativos. En este proyecto se aplican a métricas como disponibilidad telemétrica, integridad de carga, tiempos de respuesta (MTTD/MTTR) y cumplimiento de SOP.

MDVR (Mobile Digital Video Recorder): Grabador digital móvil que recibe y almacena señales de cámaras internas y externas instaladas en vehículos. Permite registrar evidencia visual del entorno y de la conducción, transmitir eventos críticos en tiempo real y reforzar la trazabilidad operacional.

PDCA (Plan–Do–Check–Act): Ciclo de mejora continua que estructura la gestión de procesos en cuatro etapas: planificar, ejecutar, verificar y actuar. Es utilizado para evaluar desviaciones, estandarizar mejoras y asegurar la sostenibilidad operativa del sistema.

RFID (Radio Frequency Identification): Tecnología que permite identificar, registrar y validar objetos mediante etiquetas electrónicas o sellos activados por radiofrecuencia. En la cadena de custodia, facilita el control automático de aperturas y cierres, reforzando la integridad de la carga.

SLA (Service Level Agreement): Acuerdo formal de nivel de servicio que define los estándares mínimos esperados entre un proveedor y un cliente. Incluye parámetros como disponibilidad, tiempos de detección, tiempos de respuesta y niveles de cumplimiento operacional.

SOP (Standard Operating Procedure): Documento estandarizado que detalla las actividades críticas de un proceso, estableciendo una secuencia de pasos para asegurar

uniformidad, calidad y trazabilidad. En logística minera regula operaciones como sellado, inspecciones, comunicaciones y verificación de entrega.

Telemetria: Disciplina que combina tecnologías de telecomunicaciones e informática para el monitoreo remoto de vehículos, activos y personas. Permite gestionar datos de ubicación, video, sensores y eventos en tiempo real, facilitando la supervisión continua y la toma de decisiones.

Trazabilidad: Capacidad de identificar, seguir y documentar el movimiento de un producto o material a través de todas las etapas de la cadena logística. En el transporte de minerales garantiza autenticidad, integridad y control del origen y destino.

ANEXOS.

ANEXO 1. Encuesta de Diagnóstico Organizacional sobre Control Interno y Trazabilidad.

Objetivo: Identificar brechas tecnológicas, procedimentales y de control interno previo a la implementación del sistema integrado.

Instrucciones: Marque con una “X” la alternativa correspondiente.

Sección A. Datos generales.

1. Cargo: Conductor Supervisor Controlador Administración
2. Antigüedad en la empresa: <1 año 1–3 años 3–7 años >7 años

Sección B. Uso de tecnología.

3. Uso de sistemas GPS/telemetría: Siempre Frecuente Ocasional Nunca
4. Capacitación previa en telemática (MDVR, RFID, bodycam): Sí No
5. Percepción de confiabilidad telemática: Alta Media Baja Nula

Sección C. Procedimientos Operativos (SOP).

6. SOP disponibles y actualizados: Sí Parcial No
7. Cumplimiento del SOP de cadena de custodia: Siempre Casi siempre A veces Nunca

Sección D. Riesgos y seguridad.

8. Frecuencia de desvíos de ruta: Muy frecuente Frecuente Baja No ocurre
9. Controles actuales suficientes: Sí Parcialmente No

Sección E. Cultura organizacional.

10. La empresa promueve trazabilidad: Sí Parcialmente No

11. Aceptación de un sistema telemático integrado: Sí Probable No

ANEXO 2. SOP – Procedimiento Operativo Estándar de Cadena de Custodia Digital.

Objetivo: Garantizar integridad, trazabilidad y evidencia en cada fase del transporte mediante RFID, MDVR y bodycam.

1. Preparación en origen.

- Activación de bodycam por parte del conductor.
- Verificación de compartimientos vacíos (registro MDVR).
- Instalación y lectura inicial del sello RFID.
- Confirmación de inicio en plataforma Sicom.

2. Sellado y verificación.

- Supervisor valida el cierre.
- MDVR registra evidencia audiovisual.
- Sistema genera *Registro de Cierre RFID*.

3. Monitoreo en ruta.

- GPS dual y geocercas verifican desvíos.
- ADAS/DMS detectan conducción riesgosa.
- Centro de Control aplica protocolo MTTD/MTTR.
- Registro continuo en servidor Entel LTE.

4. Recepción en destino.

- Escaneo de sello RFID.
- Verificación visual con MDVR y bodycam.
- Confirmación en sistema Sicom.

5. Cierre de cadena de custodia.

- Sistema genera documento *end-to-end*.
- Almacenamiento seguro conforme a ISO 27001.

ANEXO 3. Matriz BowTie – Evento Crítico: Pérdida de Integridad de la Carga.

Evento crítico:

Apertura no autorizada del compartimiento de carga.

Amenazas:

- Manipulación externa.
- Desvío de ruta.
- Vulneración de sello.
- Interrupción telemática.

Barreras preventivas:

- Sellos RFID.
- Bodycam activa.
- MDVR 360°.
- Geocercas inteligentes.
- SOP de cierre y sellado.
- Verificación bipersonal.

Barreras mitigadoras:

- Alerta en tiempo real a Centro de Control.
- Activación de protocolo de emergencia.
- Supervisión en terreno.
- Evidencia audiovisual MDVR.

Consecuencias evitadas:

- Pérdida de material.
- Contaminación de carga.
- Incumplimiento contractual.
- Riesgos legales y reputacionales.

ANEXO 4. Indicadores KPI y SLA del Sistema Integrado.

Indicador	Descripción	Meta	Resultado del piloto
Disponibilidad telemétrica	Tiempo operativo vs tiempo total	$\geq 95 \%$	98 %
MTTD	Tiempo medio de detección	≤ 5 min	3 min
MTTR	Tiempo de contención	≤ 30 min	22 min
Integridad de carga	Aperturas válidas vs totales	$\geq 99 \%$	99,5 %
Cumplimiento SOP	Adherencia procedimental	$\geq 90 \%$	95 %

ANEXO 5. Matriz de Cumplimiento Normativo (ISO).

Norma ISO	Aplicación en el proyecto	Cumplimiento
ISO 9001	SOP, BPMN, control documental, PDCA	✓
ISO 14001	Operación ambientalmente responsable	✓
ISO 45001	Seguridad del personal y operación	✓
ISO 27001	Ciberseguridad telemática, cifrado AES-256	✓
ISO 28000	Seguridad logística en el transporte	✓
ISO 31000	Gestión del riesgo (BowTie + COSO)	✓

ANEXO 6. Arquitectura Telemática del Sistema.**Componentes principales:**

- GPS Dual (posicionamiento continuo).
- MDVR con ADAS/DMS.
- Bodycam Hytera VM750D.
- Sellos RFID.
- Transmisión Entel LTE/4G.
- Servidor Sicom / Entel Chile.
- Dashboard Power BI.

Flujo general:

Dispositivos en camión → Servidor LTE → Plataforma Sicom 7 Entel Chile → Centro de Control → Dashboards KPI.

ANEXO 7. Plan de Capacitación Aplicado.

Módulo 1: Tecnología telemática.

MDVR, bodycam, RFID, GPS dual, uso de plataforma Sicom.

Módulo 2: SOP y cadena de custodia.

Pasos, roles, registros críticos, evidencia replicable.

Módulo 3: Gestión del riesgo (BowTie).

Respuesta ante alertas, lectura de amenazas, barreras.

Módulo 4: Respuesta operativa en incidentes.

Protocolos de escalamiento, manejo de emergencias, comunicación con Centro de Control.

Evaluación final.

Prueba práctica + checklist operacional.

ANEXO 7. Plan de Capacitación Aplicado

Módulo 1: Tecnología telemática.

MDVR, bodycam, RFID, GPS dual, uso de plataforma Sicom /Entel Chile.

Módulo 2: SOP y cadena de custodia.

Pasos, roles, registros críticos, evidencia replicable.

Módulo 3: Gestión del riesgo (BowTie).

Respuesta ante alertas, lectura de amenazas, barreras.

Módulo 4: Respuesta operativa en incidentes.

Protocolos de escalamiento, manejo de emergencias, comunicación con Centro de Control.

Evaluación final.

Prueba práctica + checklist operacional.

ANEXO 8. Carta Gantt del Proyecto.

Fase	Duración	Actividades clave
Diagnóstico	30 días	Evaluación brechas, levantamiento SOP
Diseño	60 días	Arquitectura, BPMN, BowTie
Instalación	30 días	Montaje telemático, pruebas estáticas
Piloto	6 meses	Monitoreo, auditorías, KPI
Evaluación final	30 días	Informe, propuesta de escalamiento

ANEXO 10. Registro de Lecciones Aprendidas.

1. Redundancia telemática indispensable en montaña.
2. Bodycams fortalecen evidencia operacional.
3. SOP deben reforzarse periódicamente.
4. La cultura organizacional es clave para adopción.
5. Los KPI permiten corrección temprana.

