



Universidad Católica de Santa María

Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales

Escuela Profesional de Ingeniería de Minas

**Evaluación técnico-económica comparativa de camiones autónomos de
acarreo en minería a cielo abierto y su aplicabilidad a operaciones del sur
del Perú**

Tesis presentada por:

Puma Oviedo, Jimmy

ORCID: 0009-0007-3588-4722

para optar el Título Profesional de Ingeniero de Minas

Asesor:

Mg. Morales Valdivia, Javier Antonio

ORCID: 0000-0002-4761-8911

Arequipa – Perú

2026

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

INGENIERIA DE MINAS

TITULACIÓN CON TESIS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 15 de Agosto del 2026

Dictamen: 016498-C-EPIM-2026

Visto el borrador del expediente 016498, presentado por:

2016602021 - PUMA OVIEDO JIMMY

Titulado:

**EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA COMPARATIVA DE CAMIONES AUTÓNOMOS DE
ACARREO EN MINERÍA A CIELO ABIERTO Y SU APLICABILIDAD A OPERACIONES DEL SUR DEL
PERÚ**

Nuestro dictamen es:

APROBADO

Título Profesional/Título de Segunda Especialidad/Grado Académico a optar:

INGENIERO DE MINAS

**40902304 - LINARES FLORES CASTRO ANTONIO ERICK
DICTAMINADOR**



**40379481 - PAREDES SALAS OMAR WILLY
DICTAMINADOR**



**46969384 - TICONA CORRALES SERGIO
DICTAMINADOR**



EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA COMPARATIVA DE CAMIONES AUTÓNOMOS DE ACARREO EN MINERÍA A CIELO ABIERTO Y SU APLICABILIDAD A OPERACIONES DEL SUR DEL PERÚ

INFORME DE ORIGINALIDAD

16%

INDICE DE SIMILITUD

15%

FUENTES DE INTERNET

2%

PUBLICACIONES

6%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.uncp.edu.pe	5%
	Fuente de Internet	
2	Submitted to Universidad Católica de Santa María	3%
	Trabajo del estudiante	
3	repositorio.ucsm.edu.pe	1%
	Fuente de Internet	
4	repositorio.usm.cl	1%
	Fuente de Internet	
5	repositorio.uchile.cl	1%
	Fuente de Internet	
6	hdl.handle.net	1%
	Fuente de Internet	
7	Submitted to Universidad Nacional de Ingenieria	<1%
	Trabajo del estudiante	
8	Submitted to Instituto Superior de Artes, Ciencias y Comunicación IACC	<1%
	Trabajo del estudiante	
9	repositorio.uni.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	
10	www.slideshare.net	<1%
	Fuente de Internet	
11	Submitted to Universidad Andrés Bello	<1%
	Trabajo del estudiante	
12	www.coursehero.com	<1%
	Fuente de Internet	
13	Submitted to unapiquitos	<1%
	Trabajo del estudiante	
14	fr.scribd.com	<1%
	Fuente de Internet	

Submitted to Universidad Privada Boliviana

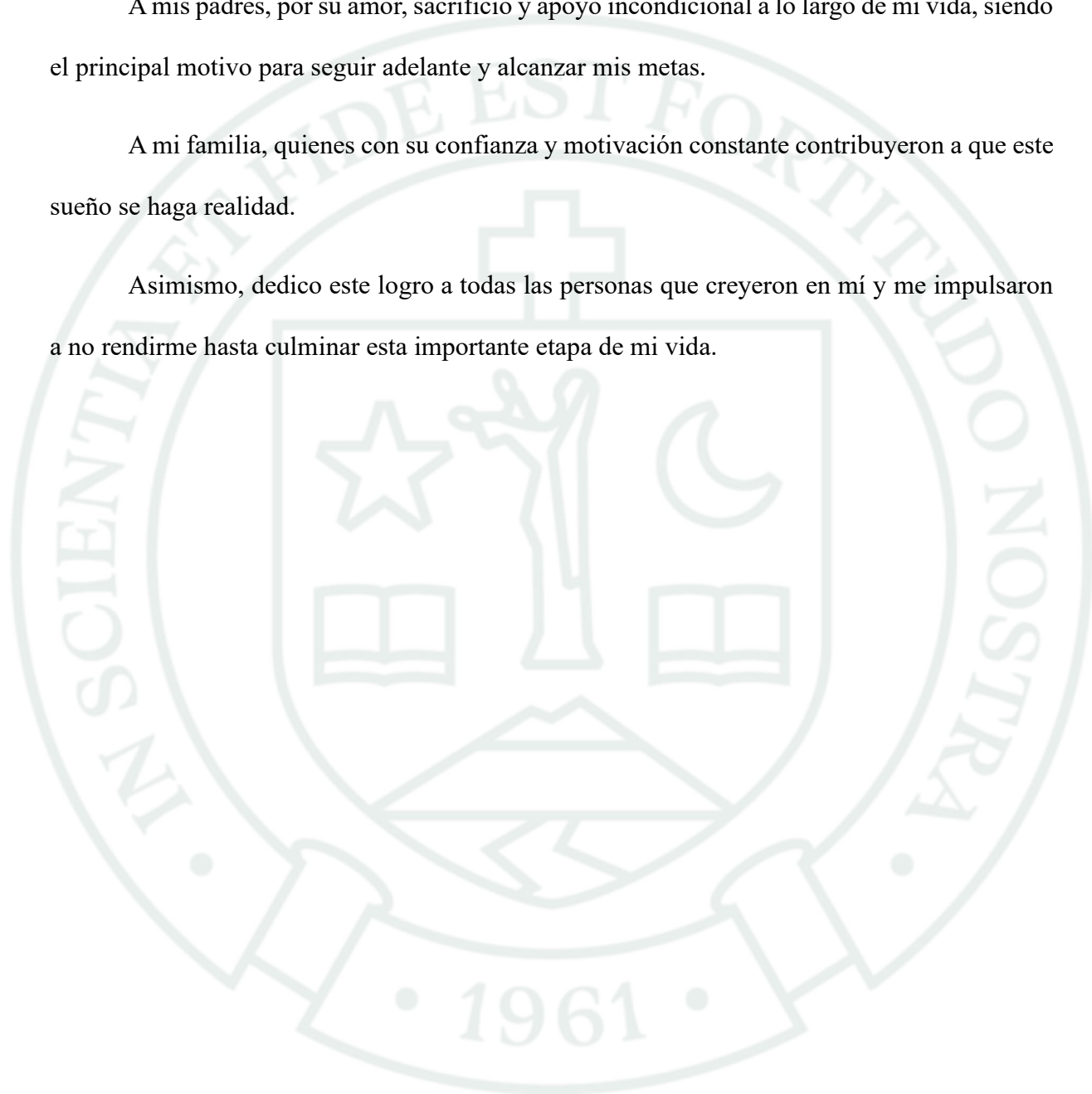
DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo de investigación a Dios, por guiar mi camino y brindarme la fortaleza necesaria para superar cada obstáculo presentado durante mi formación profesional.

A mis padres, por su amor, sacrificio y apoyo incondicional a lo largo de mi vida, siendo el principal motivo para seguir adelante y alcanzar mis metas.

A mi familia, quienes con su confianza y motivación constante contribuyeron a que este sueño se haga realidad.

Asimismo, dedico este logro a todas las personas que creyeron en mí y me impulsaron a no rendirme hasta culminar esta importante etapa de mi vida.

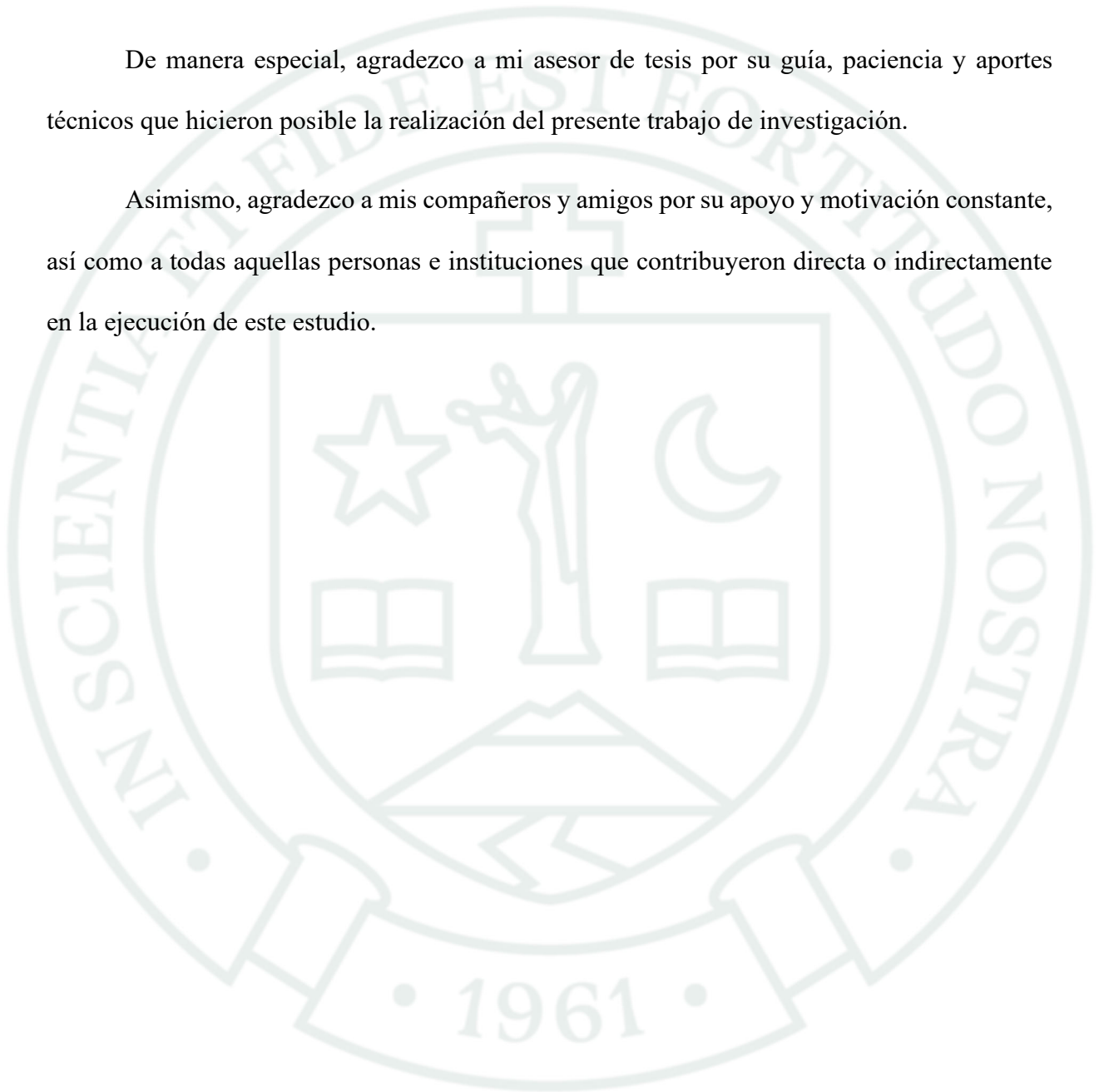


AGRADECIMIENTOS

Expreso mi sincero agradecimiento a la Universidad y a los docentes de la carrera de Ingeniería por su valiosa enseñanza, orientación y acompañamiento académico durante el desarrollo de mi formación profesional.

De manera especial, agradezco a mi asesor de tesis por su guía, paciencia y aportes técnicos que hicieron posible la realización del presente trabajo de investigación.

Asimismo, agradezco a mis compañeros y amigos por su apoyo y motivación constante, así como a todas aquellas personas e instituciones que contribuyeron directa o indirectamente en la ejecución de este estudio.



EPÍGRAFE

“El éxito es la suma de pequeños esfuerzos repetidos día tras día.”



RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo evaluar técnica y económicamente la implementación de flotas autónomas en minería a cielo abierto, aplicada al caso teórico de una mina del sur del Perú. El estudio surgió ante la necesidad de determinar si la incorporación de camiones autónomos constituye una alternativa viable frente a los sistemas convencionales, considerando no solo el desempeño operativo, sino también la rentabilidad.

La metodología empleada correspondió a una investigación de tipo aplicada, con enfoque cuantitativo y nivel descriptivo-comparativo, basada en revisión documental, análisis técnico y evaluación económica de antecedentes especializados, estudios de caso, benchmarking y experiencias reales de implementación de autonomía minera. Se analizaron indicadores como disponibilidad mecánica, utilización, producción, consumo de combustible, vida útil de neumáticos, costos de inversión, costos operativos, Valor Actual de Costos (VAC).

Los resultados evidencian que la implementación de flotas autónomas genera mejoras operacionales importantes en comparación con las flotas convencionales. En promedio, la disponibilidad mecánica aumentó 2,4%, la utilización de equipos 8,6%, la producción 19,89% y el consumo de combustible se redujo 4,24%.

Asimismo, el análisis económico de operaciones mineras de referencia mostró que, en la mayoría de los casos evaluados, la autonomía reduce el VAC y mejora la rentabilidad del sistema de acarreo, debido principalmente a la disminución de costos de personal, mantenimiento, neumáticos y mayor eficiencia operativa, aunque en ciertos escenarios los altos costos de implementación pueden limitar su conveniencia económica.

Se concluye que la implementación de flotas autónomas en minería superficial representa una alternativa técnica y económicamente favorable para operaciones mineras.

Palabras clave: Flotas autónomas, minería a cielo abierto, viabilidad económica.

ABSTRACT

The purpose of this research was to technically and economically evaluate the implementation of autonomous fleets in open-pit mining, applied to the theoretical case of a mine located in southern Peru. The study arose from the need to determine whether the incorporation of autonomous haul trucks constitutes a viable alternative to conventional systems, considering not only operational performance, but also profitability, safety, and the organizational readiness required for its adoption.

The methodology corresponded to an applied research study with a quantitative approach and a descriptive-comparative level, based on documentary review, technical analysis, and economic evaluation of specialized background studies, case studies, benchmarking, and real mining autonomy implementation experiences. Indicators such as mechanical availability, equipment utilization, production, fuel consumption, tire life, investment costs, operating costs, Net Present Cost (NPC), and Net Present Value (NPV) were analyzed.

The results show that the implementation of autonomous fleets generates significant operational improvements compared to conventional fleets. On average, mechanical availability increased by 2.4%, equipment utilization by 8.6%, production by 19.89%, and fuel consumption decreased by 4.24%. Likewise, the economic analysis of reference mining operations showed that, in most of the evaluated cases, autonomy reduces NPC and improves the profitability of the hauling system, mainly due to lower labor, maintenance, and tire costs, as well as greater operational efficiency. However, in some scenarios, high implementation costs may limit its economic attractiveness.

It is concluded that the implementation of autonomous fleets in surface mining represents a technically and economically favorable alternative for operations mining.

Keywords: Autonomous fleets, open-pit mining, economic feasibility.

ÍNDICE

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

EPÍGRAFE

RESUMEN

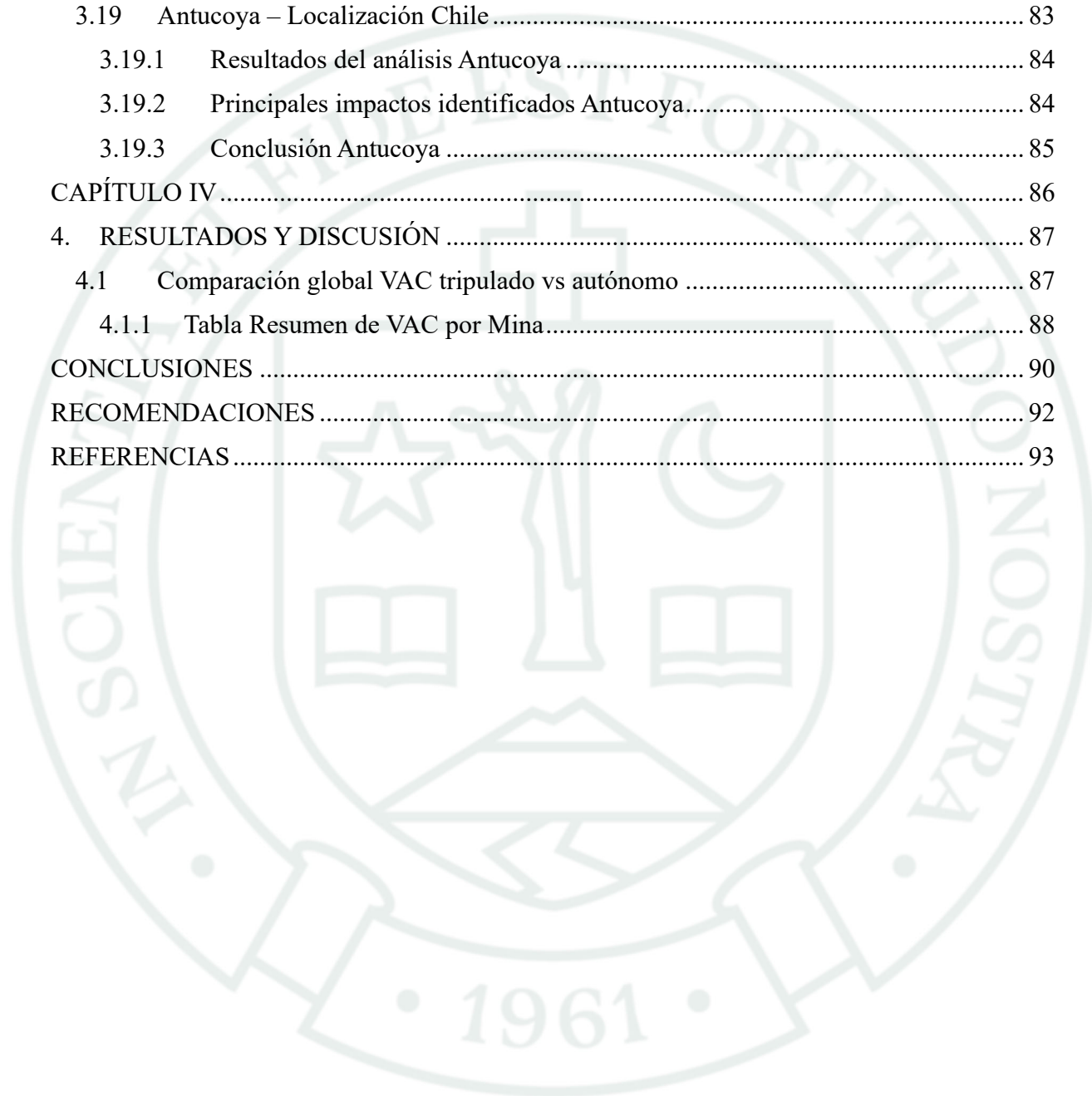
ABSTRACT

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I.....	2
1. Planteamiento del problema.....	3
1.1 Determinación del problema	3
1.2 Objetivo del proyecto	4
1.2.1 Objetivo general	4
1.2.2 Objetivos específicos.....	4
1.3 Preguntas de investigación	4
1.3.1 Pregunta principal	4
1.3.2 Preguntas específicas.....	5
1.4 Línea de investigación a la que corresponde el problema.....	5
1.5 Palabra clave	5
1.6 Justificación e importancia.....	6
1.6.1 Justificación académica.....	6
1.6.2 Justificación económica	6
1.6.3 Justificación Social.....	7
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	10
2.1 Estado del arte	10
2.1.1 Antecedentes de la investigación internacionales	10
2.1.2 Antecedentes de la investigación nacionales	15
2.2 Bases teóricas de la investigación	17
2.2.1 Sistema Dispatch	17
2.2.2 Elementos del sistema Dispatch	17
2.2.3 Elementos con los cuales trabaja el sistema Dispatch.....	18
2.2.4 Funciones que realiza el sistema Dispatch	20
2.2.5 Interfaz del sistema de despacho de Modular System.....	20
2.2.6 Panel maestro de despacho.....	21
2.2.7 Pantalla de rutas de carguío y acarreo (Haulroute)	22
2.2.8 Módulo de rutas de acarreo	22

2.2.9	Ciclo de carguío y acarreo	24
2.2.10	Clasificación de tiempos del Dispatch	25
2.2.11	Distancia equivalente horizontal (EFH - metros).....	26
2.2.12	Velocidad cargada (km/h).....	27
2.2.13	Velocidad vacía (km/h).....	27
2.2.14	Productividad de carguío (ton/h).....	28
2.2.15	Productividad de acarreo (ton/h).....	28
2.2.16	Parámetros y diseño de vías	28
2.2.17	Diseño geométrico.....	29
2.2.18	Diseño estructural.....	34
2.2.19	Diseño de acuerdo con la rotura.....	37
2.2.20	Diseño de mantenimiento.....	38
2.2.21	Front Runner	40
2.2.22	Sistema MineStar (CATERPILLAR).....	40
2.2.23	Reconocimiento LIDAR	42
2.2.24	Sistema de implementación de la Autonomía en Camiones mineros.....	43
2.2.25	Sistema de acarreo autónomo.....	43
2.2.26	Componentes Estándar de un Sistema de Gestión de Flota Autónoma.....	45
2.3	Hipótesis.....	46
2.3.1	Variable dependiente	46
2.3.2	Variable independiente	46
CAPÍTULO III		48
3.	ALCANCES Y LIMITACIONES	49
3.1	Alcances y limitaciones.....	49
3.2	Tipo y nivel de investigación	50
3.2.1	Tipo de investigación	50
3.2.2	Nivel de investigación.....	50
3.3	Población y muestra	51
3.3.1	Población.....	51
3.3.2	Muestra.....	51
3.4	Método, Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos	51
3.4.1	Procedimiento y técnica de recolección de datos.....	51
3.4.2	Técnicas de recolección de datos	52
3.4.3	Instrumentos de medición	52
3.5	Lugar de desarrollo de investigación	53

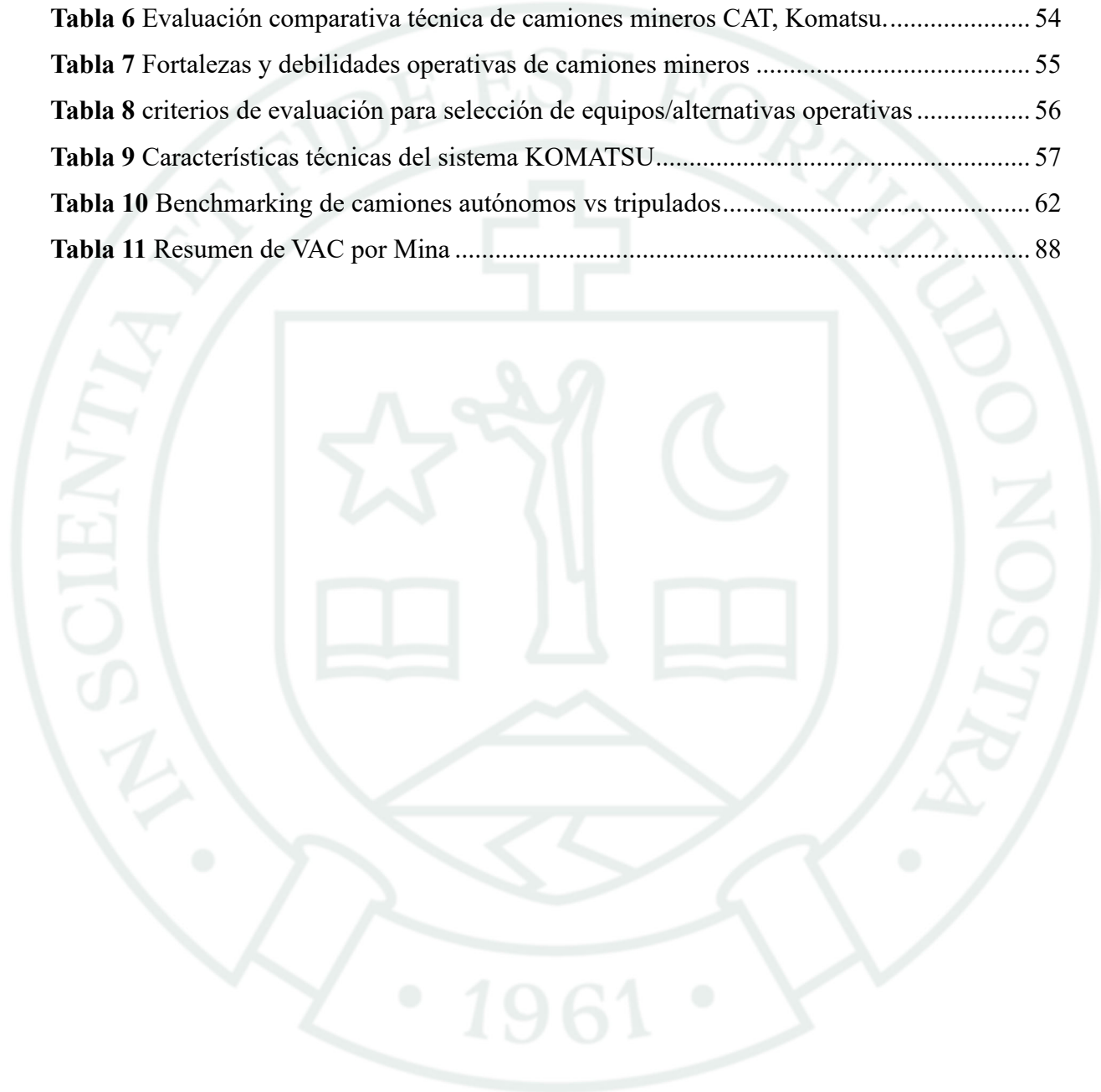
3.6	Evaluación comparativa técnica de camiones mineros	54
3.7	Ventajas y desventajas de camiones mineros autónom	55
3.8	Comparativa de camiones autónomos y convencionales	56
3.9	Sistema de operaciones autónomas FrontRunner y MineStar.....	56
3.9.1	Características del sistema FrontRunner y MineStar	57
3.10	Análisis Técnico De Kpis.....	59
3.11	Caso de Aplicación de benchmarking por Ferreyros/CAT	61
3.12	Análisis de datos Económicos.....	63
3.12.1	Beneficios.....	63
3.12.2	Costos de Operación.....	64
3.12.3	Costos AHS	64
3.12.4	Resultados Operacionales	65
3.12.5	Disponibilidad Mecánica.....	65
3.12.6	Utilización de Equipos	66
3.12.7	Vida útil de neumáticos	67
3.12.8	Consumo de combustible	68
3.12.9	Producción (Toneladas Movidas).....	69
3.12.10	Resumen Operacional Global.....	70
3.12.11	Evaluación Económica por mina (VAC).....	71
3.13	Evaluación técnica de camiones autónomos en unidades mineras	72
3.14	Escondida Norte – Localización Chile.....	72
3.14.1	Resultados del análisis Tajo Escondida Norte.....	73
3.14.2	Principales impactos identificados Tajo Escondida Norte	73
3.14.3	Conclusión Tajo Escondida Norte.....	74
3.15	Escondida	74
3.15.1	Resultados del análisis Tajo Escondida.....	75
3.15.2	Principales impactos económicos identificados Tajo Escondida	75
3.15.3	Conclusión Tajo Escondida	76
3.16	Gabriela Mistral – Localización Chile	76
3.16.1	Resultados del análisis Gabriela Mistral	77
3.16.2	Principales impactos económicos identificados Gabriela Mistral.....	77
3.16.3	Conclusión Gabriela Mistral	78
3.17	Radomiro Tomic – Localización Chile	78
3.17.1	Resumen de resultados Radomiro Tomic	79
3.17.2	Principales impactos económicos identificados Radomiro Tomic.....	79

3.17.3	Conclusión Radomiro Tomic.....	80
3.18	Camila Cu & Au – Localización Chile.....	80
3.18.1	Resultados del Análisis Camila Cu & Au.....	81
3.18.2	Principales Componentes Económicos Camila Cu & Au	81
3.18.3	Conclusión Camila Cu & Au.....	82
3.19	Antucoya – Localización Chile	83
3.19.1	Resultados del análisis Antucoya	84
3.19.2	Principales impactos identificados Antucoya.....	84
3.19.3	Conclusión Antucoya	85
CAPÍTULO IV		86
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	87
4.1	Comparación global VAC tripulado vs autónomo	87
4.1.1	Tabla Resumen de VAC por Mina.....	88
CONCLUSIONES		90
RECOMENDACIONES		92
REFERENCIAS		93



ÍNDICE DE TABLAS

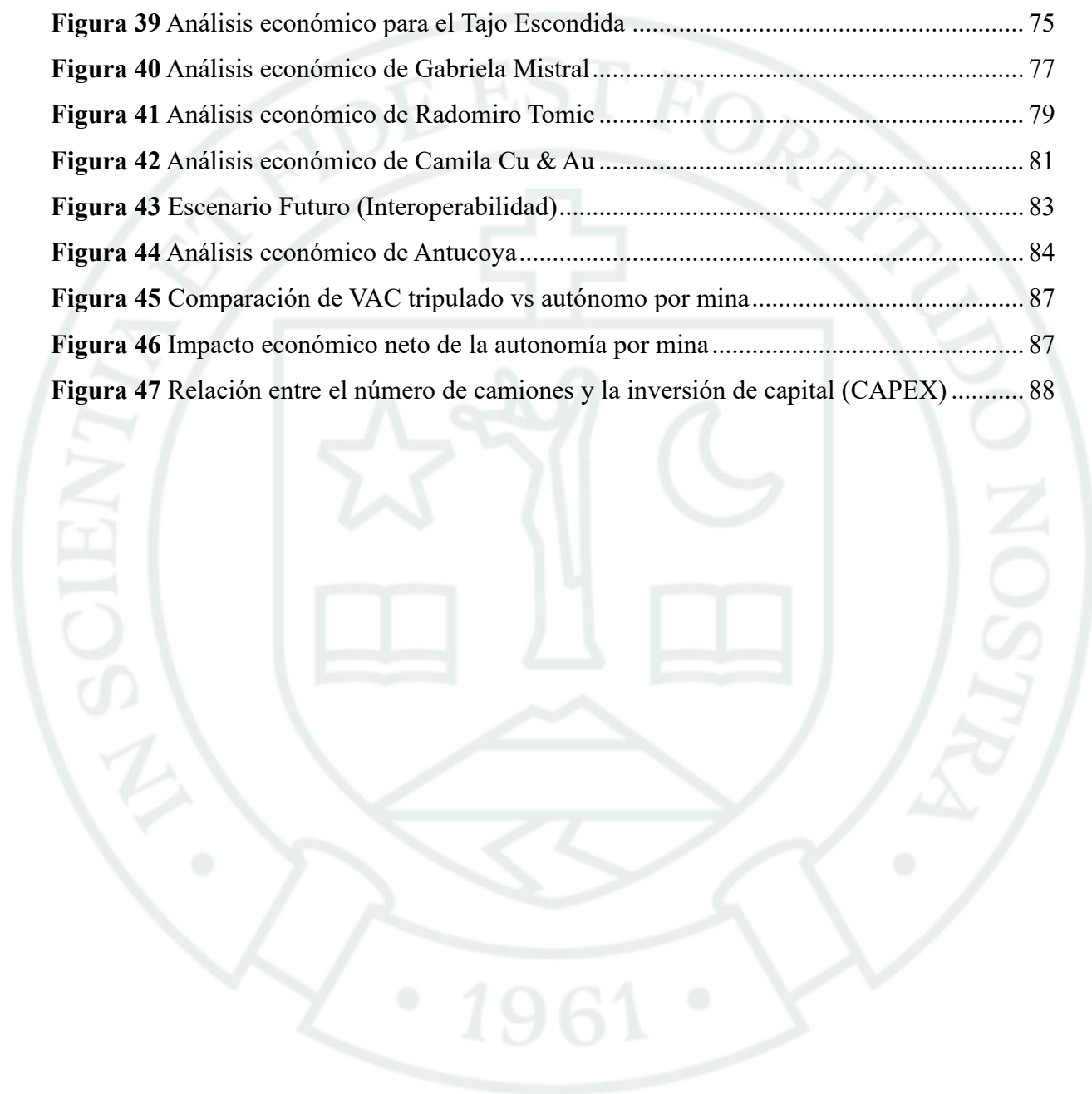
Tabla 1 Anchos recomendados según el ancho de los equipos	30
Tabla 2 Peraltes recomendados para curvas horizontales.....	32
Tabla 3 Resistencia a la rodadura típicos	37
Tabla 5 Operacionalización de variables	47
Tabla 6 Evaluación comparativa técnica de camiones mineros CAT, Komatsu.....	54
Tabla 7 Fortalezas y debilidades operativas de camiones mineros	55
Tabla 8 criterios de evaluación para selección de equipos/alternativas operativas	56
Tabla 9 Características técnicas del sistema KOMATSU.....	57
Tabla 10 Benchmarking de camiones autónomos vs tripulados.....	62
Tabla 11 Resumen de VAC por Mina	88



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Esquema del uso del sistema Dispatch	19
Figura 2 Panel Maestro del Sistema Dispatch de Modular	21
Figura 3 Tramo de ruta de trabajo	23
Figura 4 Ruta de trabajo de acarreo a botadero.....	23
Figura 5 Distancia equivalente horizontal (EFH - Metro)	27
Figura 6 Diseño de ancho de vía con pendiente.....	31
Figura 7 Grafica de peralte.....	32
Figura 8 Pendiente de una vía	33
Figura 9 Berma de seguridad	34
Figura 10 Estructura de diseño de una vía de acarreo.....	35
Figura 11 Clasificación de la resistencia de la capa base.....	36
Figura 12 Clasificación de las vías.....	39
Figura 13 Éxito de autonomía	41
Figura 14 Plataforma CAT MineStar	42
Figura 15 Command for Hauling - Liar	42
Figura 16 Command for Hauling - Ferreyros habilidades en autonomia.....	43
Figura 17 CAT Command	43
Figura 18 CAT Command	44
Figura 19 CAT Command	44
Figura 20 Componentes de un camión minero autónomo	45
Figura 21 Comparación de disponibilidad mecánica	59
Figura 22 Comparación de utilización	59
Figura 23 Incremento de producción	60
Figura 24 Comparación de consumo de combustible	61
Figura 25 Incremento en la utilización y eficiencia operativa de flotas autónomas	62
Figura 26 Evidencia de mejoras en eficiencia operativa.....	63
Figura 27 Disponibilidad mecánica	65
Figura 28 Disponibilidad mecánica	66
Figura 29 Utilización de equipos	66
Figura 30 Utilización de equipos	67
Figura 31 Vida útil de neumáticos.....	67
Figura 32 Consumo de neumáticos	68
Figura 33 Consumo de combustible.....	68

Figura 34 Representación gráfica del consumo de combustible	69
Figura 35 Comparación de producción: camiones tripulados vs. autónomos.....	69
Figura 36 Incremento de producción	70
Figura 37 Comparación de indicadores de camiones tripulados y autónomos	70
Figura 38 Análisis económico para el tajo Escondida Norte	72
Figura 39 Análisis económico para el Tajo Escondida	75
Figura 40 Análisis económico de Gabriela Mistral.....	77
Figura 41 Análisis económico de Radomiro Tomic	79
Figura 42 Análisis económico de Camila Cu & Au	81
Figura 43 Escenario Futuro (Interoperabilidad).....	83
Figura 44 Análisis económico de Antucoya.....	84
Figura 45 Comparación de VAC tripulado vs autónomo por mina.....	87
Figura 46 Impacto económico neto de la autonomía por mina	87
Figura 47 Relación entre el número de camiones y la inversión de capital (CAPEX)	88



INTRODUCCIÓN

La minería mundial atraviesa un proceso de transformación significativo, motivado por la necesidad de optimizar sus operaciones, disminuir costos, elevar los niveles de seguridad y responder a las exigencias de sostenibilidad y competitividad. En este escenario, la implementación de flotas autónomas de acarreo y perforación se ha consolidado como una estrategia clave en las operaciones mineras a cielo abierto.

La minería autónoma hace posible que los equipos funcionen de manera continua sin la intervención de conductores, gracias al uso de sensores avanzados, radares, sistemas LIDAR, GNSS y tecnologías de inteligencia artificial. Esta innovación no solo permite reducir gastos y aumentar la eficiencia operativa, sino que también mejora la seguridad al minimizar la presencia de trabajadores en áreas peligrosas.

El presente estudio se enfoca en el análisis de una operación minera ubicada en el sur del Perú, con el propósito de evaluar la viabilidad integral de la autonomía desde dos perspectivas principales:

Técnica: comparación del rendimiento de los camiones y equipos de perforación autónomos frente a los sistemas tradicionales.

Económica: evaluación del CAPEX, OPEX, posibles ahorros, Valor Actual de Costos (VAC).

Este proyecto pretende ofrecer un marco de análisis que permita a las compañías mineras del país tomar decisiones fundamentadas y sostenibles respecto a la adopción de tecnologías autónomas, impulsando así una actividad minera más productiva, segura y competitiva.



CAPÍTULO I

1. Planteamiento del problema

1.1 Determinación del problema

La minería a nivel global se encuentra en un proceso de transformación impulsado por la necesidad de mejorar la eficiencia operativa, reducir costos, responder a las crecientes exigencias de sostenibilidad. En este contexto, las flotas autónomas de acarreo y perforación han surgido como una alternativa tecnológica estratégica para las operaciones a cielo abierto. Sin embargo, la adopción de estas tecnologías requiere evaluar rigurosamente su desempeño técnico, impacto económico, y el grado de preparación organizacional necesario para su implementación.

En el caso de una operación minera ubicada al sur del Perú, surge la necesidad de determinar si la autonomía puede ser incorporada de manera viable y sostenible. Aunque existen evidencias de incrementos en productividad en otras operaciones a nivel internacional, aún no se cuenta con un análisis integral que permita comparar el rendimiento de los equipos autónomos frente a los convencionales, valorar los costos y beneficios financieros asociados (CAPEX, OPEX, VAC), ni establecer el nivel real de preparación tecnológica, operativa y social de la organización para adoptar esta innovación.

1.2 Objetivo del proyecto

1.2.1 Objetivo general

Evaluar comparativamente la viabilidad técnico-operativa y económica de los camiones autónomos de acarreo frente a los camiones convencionales, a partir de información documental y benchmarking de operaciones mineras nacionales e internacionales, con la finalidad de establecer condiciones para su aplicabilidad en operaciones mineras a cielo abierto del sur del Perú.

1.2.2 Objetivos específicos

- Comparar el desempeño técnico y operativo de los camiones autónomos y convencionales mediante indicadores de disponibilidad mecánica, utilización, producción, consumo de combustible y vida útil de neumáticos.
- Diseñar y validar documentalmente un marco metodológico para diagnosticar el nivel de preparación tecnológica, operativa, organizacional y económica de una operación minera para la implementación de camiones autónomos.
- Determinar el impacto económico de la implementación de camiones autónomos mediante la comparación del CAPEX, OPEX y Valor Actual de Costos de los casos mineros seleccionados.

1.3 Preguntas de investigación

1.3.1 Pregunta principal

¿Qué diferencias técnico-operativas y económicas presentan los camiones autónomos de acarreo frente a los camiones convencionales, según la evidencia documental de operaciones

mineras seleccionadas, y bajo qué condiciones podrían aplicarse en operaciones a cielo abierto del sur del Perú?

1.3.2 Preguntas específicas

- ¿Qué diferencias presentan los camiones autónomos y convencionales en disponibilidad mecánica, utilización, producción, consumo de combustible y vida útil de neumáticos?
- ¿Qué criterios debe contener un marco metodológico para diagnosticar el nivel de preparación de una operación minera para implementar camiones autónomos?
- ¿Qué impacto económico genera la autonomía en el CAPEX, OPEX y VAC de las operaciones mineras analizadas?

1.4 Línea de investigación a la que corresponde el problema

Según las líneas de investigación de la Universidad Católica de Santa María para la Escuela Profesional de ingeniería de minas e indicando que se presentan según la Modalidad Presencial AUTO N° 019-VRINV-2019; la presente investigación corresponde a “Optimización de procesos mineros”, ya que busca demostrar que la implementación de una flota autónoma de camiones mineros es más rentable que una flota convencional en minería superficial.

1.5 Palabra clave

- Flotas autónomas
- Flota convencional
- Minería a cielo abierto
- Operatividad

1.6 Justificación e importancia

1.6.1 Justificación académica

La presente investigación se justifica académicamente porque aborda un tema de alta relevancia y actualidad dentro de la ingeniería de minas: la incorporación de flotas autónomas de acarreo en operaciones mineras a cielo abierto. La autonomía minera constituye una línea de estudio vinculada a la innovación tecnológica, la optimización operativa y la transformación digital del sector, por lo que su análisis contribuye al desarrollo de conocimiento aplicado en contextos mineros contemporáneos.

La investigación tiene relevancia académica porque propone diseñar un marco metodológico para diagnosticar el nivel de preparación de una operación minera para la autonomía, lo cual representa un aporte que puede servir como referencia para futuros estudios, proyectos de implementación y evaluaciones comparativas en otras unidades mineras del país. En ese sentido, no solo describe una tecnología, sino que también propone una herramienta de análisis aplicable al contexto minero peruano.

Finalmente, este trabajo fortalece la producción académica en minería inteligente y automatización, generando una base teórica y aplicada que puede ser utilizada por estudiantes, investigadores y profesionales interesados en el desarrollo de operaciones mineras más seguras, eficientes y sostenibles.

1.6.2 Justificación económica

La investigación se justifica económicamente porque la implementación de camiones autónomos implica decisiones de inversión de gran magnitud, relacionadas con adquisición de tecnología, licencias, infraestructura de comunicaciones, soporte especializado y adecuaciones

operativas. Frente a ello, resulta indispensable evaluar si los beneficios generados por la autonomía compensan los costos iniciales y recurrentes del sistema.

Los informes revisados muestran que la autonomía puede generar mejoras en disponibilidad mecánica, utilización de equipos, productividad, consumo de combustible, vida útil de neumáticos y reducción de ciertos costos operativos, lo que repercute directamente en la rentabilidad de la operación. En varias minas analizadas, la disminución de costos de personal, mantenimiento y neumáticos supera los sobre costos asociados a la implementación tecnológica, lo que evidencia el potencial económico de esta alternativa.

1.6.3 Justificación Social

La presente investigación se justifica socialmente porque la implementación de flotas autónomas en minería a cielo abierto representa una transformación significativa en la forma de desarrollar las operaciones mineras, especialmente en relación con la seguridad del trabajador, la gestión del riesgo y la adaptación del capital humano frente a nuevas tecnologías. En este sentido, la autonomía minera no solo debe ser entendida como una herramienta orientada a mejorar la productividad y reducir costos, sino también como una alternativa capaz de disminuir la exposición directa del personal a condiciones operativas de alto riesgo.

Uno de los principales aportes sociales de los camiones autónomos es la reducción de la presencia humana en zonas peligrosas, tales como frentes de carguío, rutas de acarreo, botaderos, rampas de alta pendiente y áreas con tránsito constante de equipos de gran tonelaje. Al disminuir la intervención directa de operadores en estas zonas, se reducen los riesgos asociados a accidentes por fatiga, errores humanos, condiciones climáticas adversas, baja visibilidad, fallas de comunicación o exposición prolongada a ambientes operativos complejos. De esta manera, la

implementación de tecnologías autónomas contribuye al fortalecimiento de una cultura preventiva y a la mejora de las condiciones de seguridad ocupacional dentro de la operación minera.

Asimismo, esta investigación posee relevancia social porque reconoce que la incorporación de flotas autónomas genera cambios en la estructura laboral tradicional de la minería. Si bien la automatización puede reducir la demanda de ciertos puestos operativos convencionales, también crea la necesidad de nuevos perfiles técnicos vinculados al monitoreo remoto, mantenimiento especializado, análisis de datos, gestión de sistemas autónomos, telecomunicaciones, control operativo y soporte tecnológico. Por ello, la transición hacia la autonomía debe estar acompañada de programas de capacitación, reconversión laboral y fortalecimiento de competencias digitales, permitiendo que los trabajadores se adapten progresivamente a las nuevas exigencias del sector.



CAPÍTULO II

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Estado del arte

2.1.1 Antecedentes de la investigación internacionales

En la tesis titulada “Evaluación económica camiones autónomos vs convencionales”, tuvo como propósito comparar la conveniencia económica de operar una mina a rajo abierto con una flota de camiones autónomos frente a una flota convencional, en un horizonte de evaluación entre 2020 y 2027. El estudio se enfocó en una faena chilena que ya operaba con camiones autónomos Komatsu 930E-4AT, lo que permitió trabajar con datos históricos reales de operación y costos.

Metodológicamente, la investigación recopiló y comparó parámetros operacionales de ambas tecnologías, principalmente disponibilidad, uso operativo y UEBD, además de costos asociados a combustible, neumáticos, lubricantes, mantenimiento, operadores, contrato del sistema autónomo y equipos de apoyo. Posteriormente, calculó el tamaño de flota requerido para cumplir con la producción planificada y estimó tanto el costo unitario de transporte (USD/ton) como el Valor Actual de Costos (VAC) para cada alternativa. El estudio complementó este análisis con simulación de riesgo mediante Monte Carlo usando el software Risk.

Los resultados mostraron que la flota autónoma presentó mejores indicadores operacionales que la convencional, con valores de referencia de 84% de disponibilidad, 94% de uso operativo y 83% de UEBD, frente a 80%, 85% y 80%, respectivamente, para la flota convencional. Estas diferencias permitieron que la operación autónoma requiriera 18 camiones, mientras que la convencional necesitó 19 camiones para cumplir la misma exigencia productiva. Además, la flota autónoma evidenció menores consumos de combustible y neumáticos, así como menores costos de mantenimiento y de personal operativo.

En términos económicos, la tesis concluyó que la alternativa autónoma era más conveniente, registrando un costo de transporte promedio de 0,50 USD/ton, inferior al 0,57 USD/ton de la flota convencional. Asimismo, el VAC estimado para la flota autónoma fue de 218 MUSD, mientras que para la flota convencional alcanzó 246 MUSD, confirmando una ventaja económica a favor del sistema autónomo. El análisis de sensibilidad indicó que las variables con mayor influencia en el resultado fueron el uso operativo y la UEBD.

Como aporte para nuestra investigación, esta tesis constituye un antecedente relevante porque demuestra, con base en datos operacionales reales, que la implementación de camiones autónomos puede generar ventajas económicas concretas en minería a cielo abierto, especialmente por su efecto en la reducción de costos de transporte, mejora de indicadores operacionales y optimización del tamaño de flota. Su enfoque resulta útil para sustentar el análisis comparativo técnico-económico de camiones autónomos frente a convencionales en una mina del sur del Perú. (Zuñiga Estay, 2021)

En la tesis titulada “Análisis de implementación de camiones autónomos en mina a cielo abierto”, analiza la factibilidad de incorporar camiones autónomos en una operación minera a rajo abierto mediante una comparación técnica, operativa y económica entre un sistema convencional y uno autónomo. El estudio parte de un caso base de factibilidad con camiones manuales de 185 toneladas y construye dos escenarios comparativos con camiones de 220 toneladas: uno manual y otro autónomo.

La metodología empleada comprende la recopilación de antecedentes sobre camiones autónomos, el rediseño de fases mineras, la elaboración de planes de producción y la evaluación económica de los escenarios propuestos. La autora considera que la operación autónoma exige cambios en el diseño minero, principalmente por requerimientos de mayores anchos de rampa,

radios de giro más amplios y áreas de carguío más holgadas. Como resultado, el diseño para operación autónoma incrementa el pit final en aproximadamente 10% de material total respecto al caso base, debido sobre todo al aumento de estéril necesario para mantener condiciones adecuadas de operación.

En el plano técnico y operativo, la investigación identifica ventajas relevantes de la autonomía, como una menor variabilidad en la operación, mayor continuidad del proceso, mejor utilización de los equipos, reducción de la dotación de personal y mejoras en seguridad al disminuir la exposición de trabajadores a riesgos en faena. Además, se destacan beneficios en consumo de combustible, vida útil de neumáticos y control operativo, derivados de una conducción más uniforme y ajustada a parámetros de diseño. El trabajo también recopila antecedentes de implementación internacional y nacional, señalando el caso de Gabriela Mistral de Codelco como referente en Chile.

Desde el punto de vista económico, los resultados muestran que, al comparar los escenarios con camiones de 220 toneladas, la operación autónoma presenta una reducción del tamaño de flota de 13% y una disminución de la dotación de 14%, así como menores costos de combustible y mantención. Sin embargo, estos ahorros no logran compensar completamente los costos adicionales propios de la autonomía, como soporte técnico, mantención especializada, repuestos e inversiones complementarias, por lo que en el escenario actual la implementación autónoma representa un aumento de 3% en los costos totales frente a la operación manual equivalente.

La tesis concluye que, para el caso estudiado, no es posible afirmar que la implementación de camiones autónomos sea actualmente una alternativa económicamente rentable, debido a los altos costos de incorporación tecnológica y a la limitada masificación del sistema en el mercado chileno. No obstante, plantea que en un escenario de mediano plazo, con mayor madurez

tecnológica y mayor competencia entre proveedores, la autonomía podría transformarse en una alternativa rentable, especialmente por sus beneficios en productividad, confiabilidad y seguridad.

Como antecedente para nuestra investigación, esta tesis resulta especialmente valiosa porque demuestra que la evaluación de camiones autónomos no debe limitarse al ahorro operativo directo, sino que debe incorporar también los impactos en diseño minero, planificación, requerimiento de flota, costos de capital y condiciones de implementación. Su aporte fortalece el enfoque de nuestra tesis al mostrar que la viabilidad de la autonomía depende de un análisis integral técnico-económico y no solo de indicadores aislados de productividad o costo unitario. (Leiva Peña, Análisis de implementación de camiones autonomos en mina a cielo abierto, 2020)

En la tesis titulada “Revisión Sistemática de la Automatización de Camiones Autónomos en la Mitigación de Riesgos Operativos en Minas de Cielo Abierto”, tuvo como propósito sistematizar la investigación científica y técnica existente sobre cómo la automatización de camiones autónomos contribuye a la mitigación de riesgos operativos en minas de cielo abierto, así como analizar los principales desafíos asociados con su implementación. El estudio se enfoca en una revisión de literatura reciente y busca comprender el impacto de estas tecnologías desde una perspectiva de seguridad, productividad y sostenibilidad.

Metodológicamente, la investigación se desarrolló como una revisión sistemática basada en la metodología PRISMA, considerando estudios publicados entre 2020 y 2024. La búsqueda se realizó en Google Scholar con términos como Autonomous trucks, Open-pit mining, Risk mitigation, Mining automation y Safety in mining. A partir de los primeros 100 estudios identificados, luego del filtrado y la evaluación de elegibilidad, se seleccionaron 70 estudios para el análisis final. Además, el autor incorporó el uso de ChatGPT como herramienta auxiliar para la extracción, organización y síntesis de información, complementando el análisis manual tradicional.

El estudio organizó la evidencia en cuatro dimensiones principales: automatización y tecnologías autónomas, seguridad y mitigación de riesgos, sostenibilidad operativa y ambiental y desafíos futuros. Los resultados muestran que la dimensión con mayor cantidad de estudios fue Tecnologías Autónomas, con 23 investigaciones, seguida de Desafíos Futuros con 18, Seguridad y Riesgos Mitigados con 16, y finalmente Sostenibilidad Operativa y Ambiental con 13 estudios. Esto sugiere que la literatura reciente se ha concentrado principalmente en los avances tecnológicos, mientras que la sostenibilidad aún aparece como un campo menos explorado.

Entre los principales hallazgos, la tesis concluye que la automatización de camiones autónomos reduce la exposición del personal a zonas de alto riesgo, disminuye los accidentes asociados a fatiga y error humano, y mejora la seguridad general de las operaciones mineras. Asimismo, identifica beneficios en la optimización de recursos, la eficiencia operativa, el mantenimiento predictivo y la reducción de costos operativos a largo plazo. También resalta que tecnologías como mapas HD, sensores avanzados, inteligencia artificial, radar 4D, IoT y gemelos digitales se han vuelto centrales en el desarrollo de los sistemas autónomos aplicados a minería a cielo abierto.

Respecto de los desafíos, el estudio señala como principales barreras la alta inversión inicial, la necesidad de infraestructura especializada, la falta de estandarización global, la adaptación a condiciones extremas de operación, y la resistencia organizacional y social frente a la automatización. Además, el autor identifica vacíos importantes en la literatura, especialmente en torno a la sostenibilidad operativa y ambiental, indicando que esta dimensión requiere mayor desarrollo en futuras investigaciones.

En cuanto a la calidad metodológica, la tesis aplicó la herramienta AMSTAR, con la que el estudio obtuvo un cumplimiento de 8 de 11 criterios, por lo que fue clasificado con un nivel de

calidad moderada-alta. Esto respalda la consistencia general de la revisión, aunque también evidencia limitaciones en aspectos como el análisis de sesgo de publicación y conflictos de interés.

Como antecedente para nuestra investigación, esta tesis resulta relevante porque demuestra, desde un enfoque sistemático, que los camiones autónomos no solo representan una innovación tecnológica, sino también una herramienta concreta para la mitigación de riesgos operativos en minería a cielo abierto. Su aporte es valioso para sustentar la dimensión de seguridad y viabilidad operativa en nuestra tesis, además de reforzar la necesidad de analizar la autonomía no solo por productividad, sino también por su impacto en la gestión del riesgo, la sostenibilidad y los desafíos de implementación. (Morales Manríquez, 2024)

2.1.2 Antecedentes de la investigación nacionales

En la tesis titulada “Gestión de mantenimiento para incrementar la disponibilidad de la flota de camiones autónomos de la Minera Quellaveco, Moquegua - 2024”, tuvo como objetivo principal incrementar la disponibilidad de la flota de camiones autónomos mediante la gestión de mantenimiento en Minera Quellaveco. El estudio se desarrolló desde un enfoque aplicado, cuantitativo y descriptivo, con diseño no experimental y transversal, tomando como muestra a 10 colaboradores del área de mantenimiento y 30 camiones autónomos 794AC.

La investigación identificó que los principales problemas del área de mantenimiento eran la alta recurrencia del mantenimiento correctivo, la ausencia de stock oportuno de repuestos y componentes, el uso inadecuado de equipos, la falta de una metodología de trabajo definida, la escasa supervisión, la ausencia de indicadores de gestión y la falta de programación preventiva. El diagnóstico, sustentado en observación, entrevistas, encuestas y análisis documental, mostró que estas deficiencias afectaban directamente la disponibilidad de la flota de camiones autónomos. El

diagrama de Ishikawa del capítulo de resultados resume estas causas en factores asociados a método, mano de obra, maquinaria y recursos.

Como propuesta de mejora, la tesis planteó la implementación de una gestión de mantenimiento basada en TPM (Mantenimiento Productivo Total), complementada con reforzamiento de 5S, mantenimiento autónomo, mantenimiento preventivo, mantenimiento de calidad, programas de capacitación, medidas de seguridad e higiene, y además un rediseño del layout del área de mantenimiento para mejorar la organización de espacios, herramientas y flujo de atención. La figura de fases propuestas para la ejecución del TPM y la programación del mantenimiento preventivo muestran la estructura metodológica aplicada.

Para medir los resultados, el estudio utilizó indicadores clásicos de mantenimiento: MTBF (tiempo medio entre fallas), MTTR (tiempo medio de reparación) y disponibilidad, calculada como la relación entre MTBF y la suma de MTBF más MTTR. Antes de la propuesta, la flota presentaba una disponibilidad promedio de 77,04%. Después de la implementación, la disponibilidad alcanzó 91,07%, lo que representó una mejora de 14,03%. Asimismo, la evaluación de 5S mejoró de un promedio general de 1,3 a 4,75, evidenciando una mejora significativa en orden, limpieza y disciplina operativa.

En el aspecto económico, la tesis estimó un beneficio total de S/. 40.247,00, derivado principalmente del ahorro por reducción de tiempos de parada por averías, frente a un costo total de implementación de S/. 30.500,00. Con ello, obtuvo un beneficio/costo de 1,32, concluyendo que la propuesta era económicamente viable y favorable para la empresa.

Como aporte para nuestra investigación, esta tesis es relevante porque demuestra que la disponibilidad de una flota de camiones autónomos no depende únicamente de la tecnología, sino

también de la eficiencia de la gestión de mantenimiento, la planificación preventiva, la organización del área y la capacitación del personal. Su principal valor como antecedente radica en mostrar que una mejora en los procesos de mantenimiento puede elevar significativamente la disponibilidad operativa y, con ello, impactar positivamente en la continuidad de la operación minera. Este enfoque resulta útil para complementar nuestra tesis, especialmente en la dimensión operativa y de preparación organizacional para la autonomía. (Casquino Bernedo, 2024)

2.2 Bases teóricas de la investigación

2.2.1 *Sistema Dispatch*

El sistema Dispatch, constituye una herramienta de gestión minera de gran escala orientada al control y optimización de las operaciones en minas a cielo abierto. Su funcionamiento integra tecnologías como el Sistema de Posicionamiento Global (GPS), comunicaciones de datos y plataformas computacionales, con la finalidad de asignar de manera automática y eficiente los camiones de acarreo. Además de mejorar la distribución de equipos, este sistema permite supervisar la operación en tiempo real, resolver contingencias operativas, generar reportes y almacenar información histórica de la mina para posteriores análisis.

Asimismo, el Dispatch puede incorporar funciones complementarias que contribuyen al incremento de la productividad y a la reducción de costos, entre ellas el monitoreo por GPS de palas, perforadoras y equipos auxiliares, el control de dilución, la mezcla de materiales y la simulación de escenarios operativos.

2.2.2 *Elementos del sistema Dispatch*

Para su funcionamiento, el sistema Dispatch reconoce diversos componentes dentro de la operación minera. En primer lugar, considera a la mina como el espacio total delimitado mediante

dimensiones máximas y mínimas expresadas en coordenadas x, y, z. Dentro de ella se ubica el tajo, entendido como la unidad de mayor tamaño que el sistema puede identificar, el cual está conformado por un conjunto de regiones.

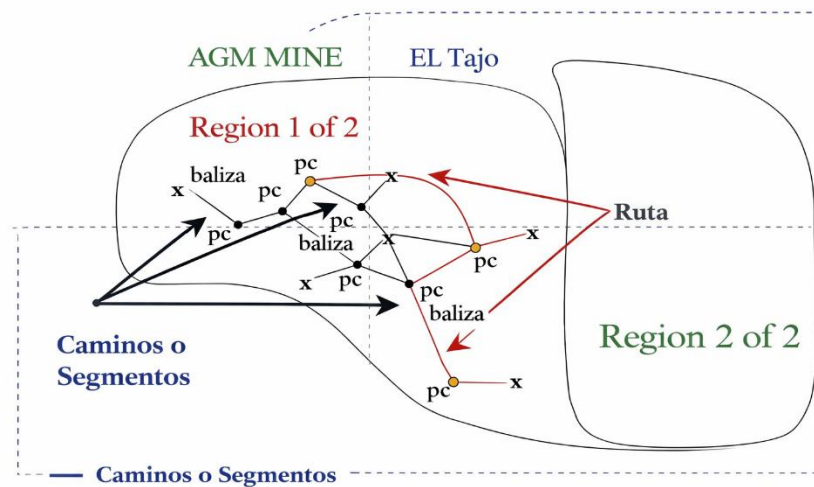
Las regiones comprenden agrupaciones de ubicaciones como zonas de excavación, puntos de descarga, talleres, stockpiles y puntos de comunicación. A su vez, los puntos de comunicación o nodos se definen mediante coordenadas y sirven para estructurar caminos o tramos de ruta. De igual forma, las balizas virtuales funcionan como radios de reconocimiento que permiten localizar en tiempo real los equipos, asociándose a nodos, palas y ubicaciones estratégicas. Finalmente, los caminos representan las conexiones entre nodos, lo que posibilita calcular distancias y pendientes entre diferentes puntos operativos.

2.2.3 Elementos con los cuales trabaja el sistema Dispatch

- **Mina:** En el sistema Dispatch, la mina se delimita a partir de sus dimensiones principales: longitud, ancho y profundidad. Estos límites se representan mediante coordenadas mínimas y máximas en los ejes x, y, z.
- **Tajo:** Es la unidad de mayor jerarquía reconocida por el sistema Dispatch. Se encuentra conformado por un conjunto de regiones y constituye el elemento mínimo indispensable para que el sistema pueda operar.
- **Regiones:** Las regiones están integradas por diferentes ubicaciones operativas, tales como zonas de excavación, puntos de descarga, áreas de comunicación, talleres y stockpiles. Cada una de estas ubicaciones se define mediante coordenadas x, y, z.

- **Puntos de comunicación o nodos:** Son puntos establecidos por coordenadas específicas y se emplean para estructurar los caminos o los distintos segmentos de ruta dentro de la mina.
- **Balizas virtuales:** Son radios de identificación que permiten ubicar a los equipos en tiempo real. Aunque no se definen directamente con coordenadas, se vinculan a puntos de comunicación, ubicaciones determinadas y equipos de carguío como las palas.
- **Caminos:** Corresponden a las conexiones existentes entre nodos o puntos de comunicación. A través de ellos es posible calcular distancias y pendientes entre diferentes ubicaciones de la operación minera.

Figura 1
Esquema del uso del sistema Dispatch



Nota. Esquema grafico del sistema Dispatch, se ve su manera de uso y su toma de decisiones.

2.2.4 Funciones que realiza el sistema Dispatch

El sistema Dispatch incorpora modelos computacionales orientados a la solución de problemas operativos en tiempo real. Asimismo, cumple una función importante como herramienta de captura, gestión y almacenamiento de grandes volúmenes de información generada en la operación minera.

Debido a que su estructura se basa en modelos matemáticos, este sistema presenta una dinámica flexible que le permite adaptarse a distintos tipos de operaciones mineras. En términos generales, su finalidad es optimizar el proceso productivo, incrementando la producción y disminuyendo los costos operacionales. Entre sus principales funciones se encuentran las siguientes:

- Realiza de manera automática y eficiente la asignación de camiones.
- Registra y almacena información relacionada con equipos auxiliares y actividades de mantenimiento.
- Efectúa asignaciones automáticas para el suministro de combustible.
- Permite efectuar procesos de mezcla de materiales.
- Elabora reportes masivos de producción.

2.2.5 Interfaz del sistema de despacho de Modular System

- **PIT GRAFIC**

Este módulo muestra de forma gráfica la dimensión general del tajo y permite visualizar la ubicación de los principales equipos y componentes de la operación, tales como camiones, palas, perforadoras, equipos auxiliares, botaderos, chancadoras, grifos, caminos, nodos y balizas, entre

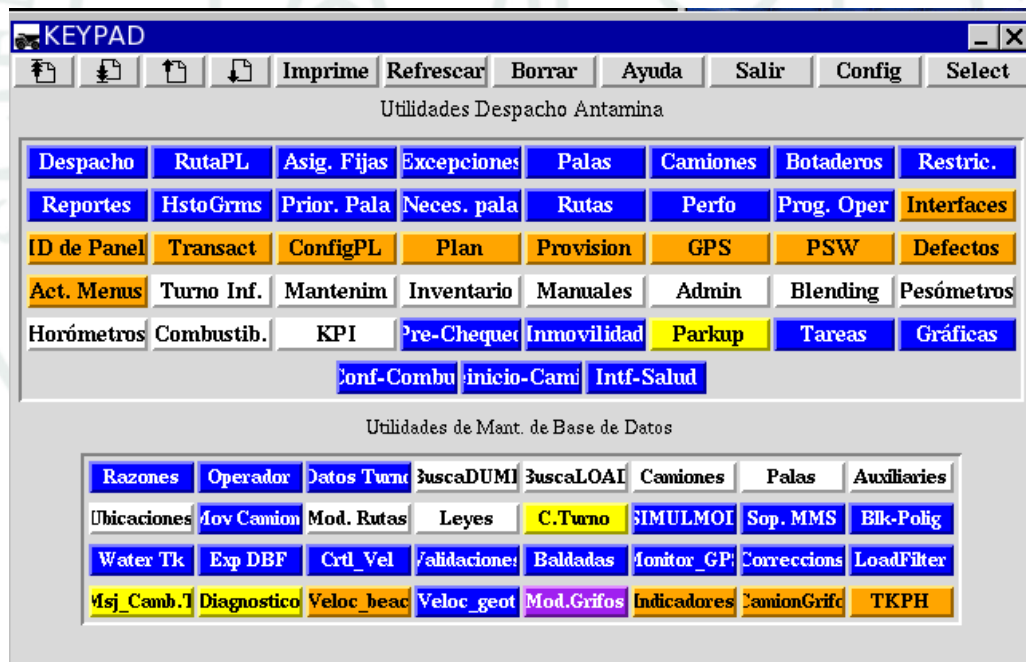
otros puntos de interés. Asimismo, ofrece la posibilidad de modificar ubicaciones, crear o eliminar caminos y establecer la ruta de acarreo más conveniente para la operación.

2.2.6 Panel maestro de despacho

Este módulo constituye la interfaz principal del software para la gestión de las operaciones mineras. A través del uso adecuado de sus distintas herramientas, es posible mejorar y optimizar el desarrollo de las actividades en mina. Entre sus componentes más importantes se encuentran los módulos de programación lineal, el monitoreo del estado de camiones y palas, la información de mantenimiento de todos los equipos, los datos del turno y la información de los operadores, entre otros elementos necesarios para el control operativo.

Figura 2

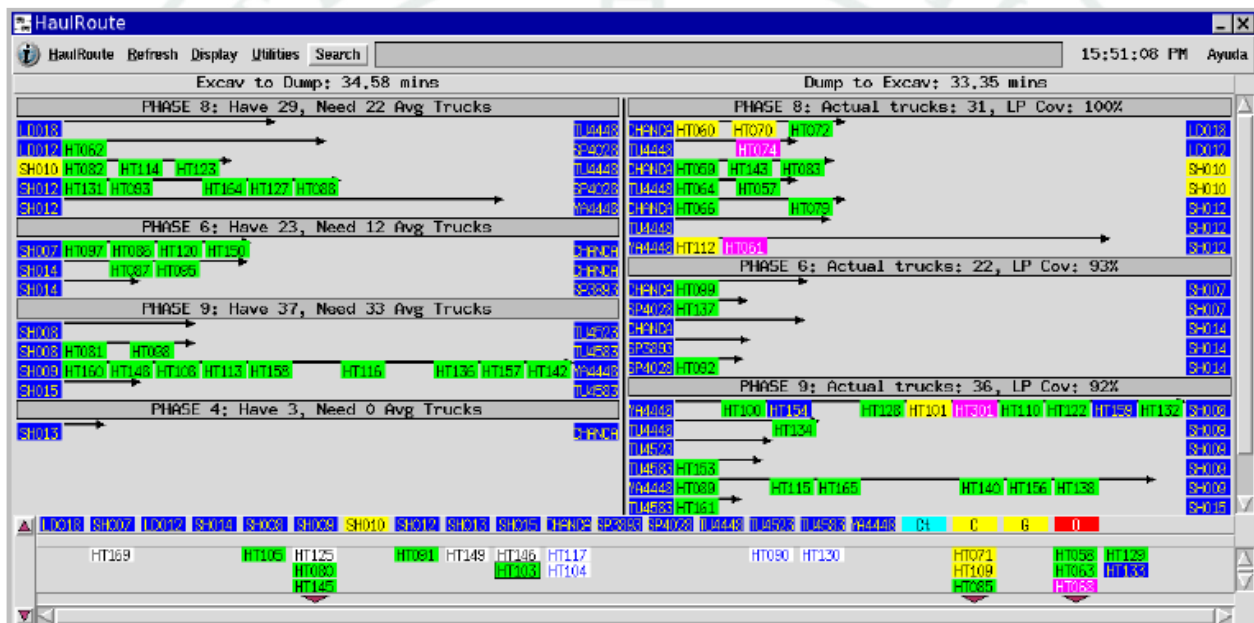
Panel Maestro del Sistema Dispatch de Modular



Nota. Sistema de interfase Dispatch modular

2.2.7 Pantalla de rutas de carguío y acarreo (Haulroute)

Este módulo es uno de los principales para supervisar el desarrollo de las operaciones en tiempo real. Su funcionamiento se apoya en la programación lineal y, a partir de las decisiones que se tomen en campo, permite realizar ajustes mediante programación dinámica. En su interfaz es posible visualizar las palas, los camiones y las zonas de descarga, así como también identificar el estado operativo de todos los equipos involucrados en la operación.



Nota. Pantalla de trabajo Haulroute

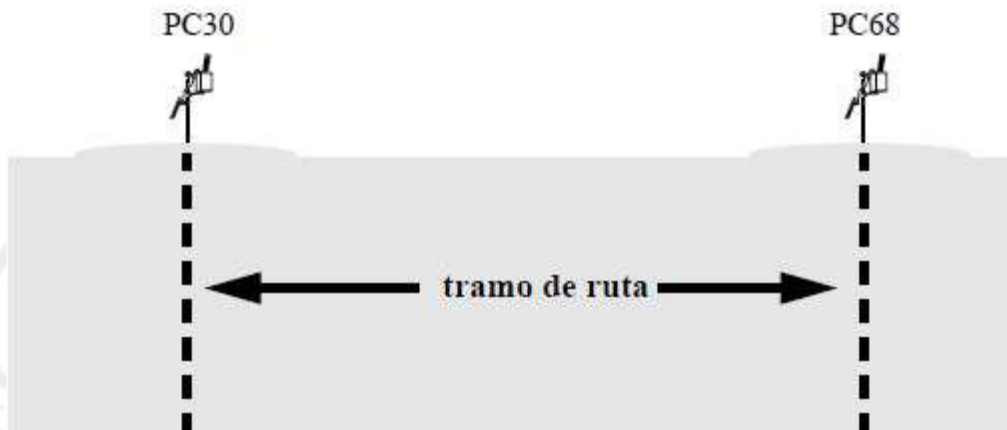
2.2.8 Módulo de rutas de acarreo

Este módulo del sistema Dispatch está orientado al control de los patrones de tránsito dentro de la mina, permitiendo habilitar o restringir tramos y rutas registradas en la base de datos de la operación. Durante la preparación del turno, los despachadores lo emplean para verificar las condiciones de los distintos tramos y rutas de acarreo. A medida que avanza la jornada, pueden decidir la apertura o cierre de rutas según los requerimientos operativos. En este contexto, un tramo

de ruta corresponde al segmento comprendido entre dos ubicaciones consecutivas o puntos intermedios dentro de la mina.

Figura 3

Tramo de ruta de trabajo

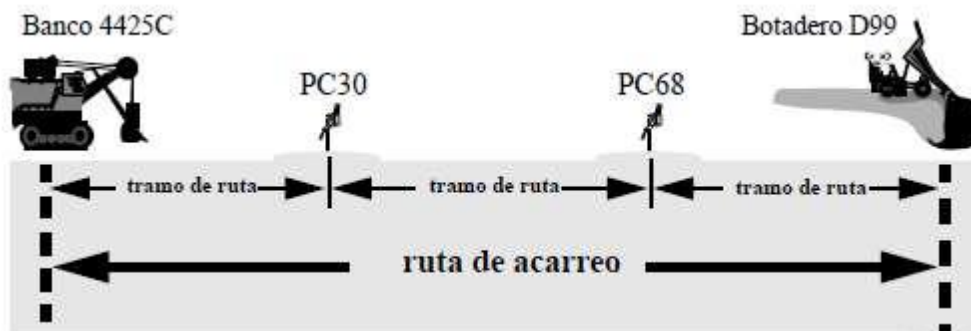


Nota. Tramo de ruta de trabajo

La cantidad de tramos de ruta está en función del número de ubicaciones existentes dentro de la operación minera, tales como balizas, talleres, botaderos y chancadoras. Por otro lado, una ruta de acarreo corresponde al recorrido que enlaza dos puntos de destino, por ejemplo, una pala y una chancadora. En consecuencia, dicha ruta está conformada por todos los tramos intermedios que se encuentran entre ambos puntos.

Figura 4

Ruta de trabajo de acarreo a botadero



Nota. Representación de ruta de acarreo a botadero

2.2.9 *Ciclo de carguío y acarreo*

El ciclo de carguío y acarreo se expresa con la siguiente formula:

$$T_{ciclo} = T_{Hang} + T_{spot} + T_{load}$$

Donde:

- T Hang: Es el periodo durante el cual el equipo de carguío permanece sin atención de camiones. Este tiempo se contabiliza desde la salida del último camión del frente de carguío hasta el momento en que se registra la llegada del siguiente camión.
- T spot: Corresponde al tiempo empleado en las maniobras necesarias para que el equipo de carguío pueda posicionarse y efectuar la carga del camión. Su duración puede variar según las características y condiciones del frente de minado.
- T load: Corresponde al tiempo efectivo durante el cual se realiza la carga del material en el camión. Por otro lado, el ciclo de acarreo dentro de la operación se encuentra conformado por una secuencia de etapas que describen el desplazamiento completo del camión desde el punto de carguío hasta el destino de descarga y su posterior retorno.

$$T_{Ciclo} = T_{Cola} + T_{cuadrado} + T_{carguio} + TV_{cargado} + T_{Descarga} + TV_{Vacio}$$

- T Cola: Corresponde al tiempo durante el cual el camión permanece en espera hasta que el equipo de carguío quede disponible para su ingreso.
- T cuadrado: Se refiere al tiempo que emplea el camión en realizar las maniobras necesarias para ubicarse correctamente en la posición de carguío.

- T carguío: Representa el periodo en el que el equipo de carguío completa el llenado del camión.
- TV cargado: Inicia en el momento en que el operador de pala autoriza la salida del camión cargado hacia el punto de destino.
- T Descarga: Comprende tanto el tiempo de espera en la zona de descarga como el tiempo que tarda el camión en vaciar el material transportado.
- TV vacío: Corresponde al tiempo de retorno del camión sin carga hacia el equipo de carguío, ya sea asignado automáticamente por el sistema o definido manualmente por el despachador.

2.2.10 Clasificación de tiempos del Dispatch

- Tiempo operativo: Corresponde al periodo en que el equipo permanece encendido y ejecutando actividades productivas, ya sean rutinarias o no rutinarias. Por ejemplo, una pala realizando carguío, una perforadora desplazándose hacia otro taladro o una excavadora efectuando trabajos de desatado en un talud.
- Detención de proceso (DP): Se refiere al tiempo en que el equipo está encendido, pero no genera producción. Esto puede ocurrir, por ejemplo, cuando una pala se moviliza fuera de una zona de voladura o cuando un camión se encuentra en proceso de abastecimiento de combustible.
- Detención de equipo (DE): Hace referencia al tiempo en que el equipo se encuentra fuera de servicio por fallas mecánicas, ya sea en taller o desde el momento en que el operador reporta la avería.

- Standby (SB): Es el tiempo durante el cual el equipo está en condiciones de operar, pero permanece apagado. Generalmente sucede cuando existe exceso de camiones y es necesario detener algunos para evitar congestión operativa, o cuando no se dispone de una tarea asignada.
- Tiempos muertos: En el caso del acarreo, el indicador QVEVE % (cola) representa la suma de los tiempos de espera de los camiones cuando más de una unidad permanece esperando atención en el equipo de carguío.

$$Queve = \frac{T. Cola}{T. Producción} * 100\%$$

- Carguío: HANG % corresponde al tiempo acumulado en el que las palas permanecen sin atención de camiones, es decir, cuando no tienen ninguna unidad disponible para continuar con el proceso de carguío.

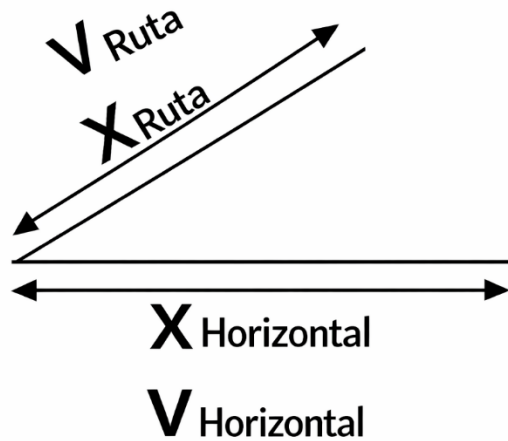
$$Hang = \frac{T. Hang}{T. Producción} * 100\%$$

2.2.11 Distancia equivalente horizontal (EFH - metros)

La distancia equivalente horizontal representa la longitud que un camión podría recorrer sobre un tramo horizontal en el mismo tiempo que le toma desplazarse por una pendiente, ya sea ascendente o descendente. Su cálculo se realiza considerando el desempeño de toda la flota de camiones, con el fin de estandarizar la comparación entre diferentes condiciones de recorrido.

Figura 5

Distancia equivalente horizontal (EFH - Metro)



Nota. Representación de la distancia EFH – Metro.

$$EFH = \frac{X \text{ Ruta} * V \text{ Horizontal}}{V \text{ Ruta}}$$

2.2.12 Velocidad cargada (km/h)

El cálculo de este indicador se inicia con el registro de las velocidades alcanzadas por los camiones cuando transportan material. Para ello, se consideran los datos de cada flota durante los distintos recorridos realizados con carga.

$$Vel. \text{ Carg} = \frac{\text{Distancia cargado}}{\text{Tiempo de viaje cargado}}$$

2.2.13 Velocidad vacía (km/h)

El cálculo de este indicador comienza con la recopilación de las velocidades registradas por la flota de camiones durante los recorridos efectuados sin carga en la tolva. Para ello, se consideran los distintos viajes realizados por las unidades en condición de vacío.

$$\text{Velocidad vacio} = \frac{\text{Distancia vacío}}{\text{Tiempo de viaje vacío}}$$

2.2.14 Productividad de carguío (ton/h)

Este indicador expresa el rendimiento conjunto de la flota durante la operación de carguío. Para su determinación, primero se calculan las productividades correspondientes a cada flota de palas y, a partir de ello, se obtiene el desempeño global del sistema de carguío.

$$\text{Productividad Carguío} = \frac{\text{Toneladas Cargadas}}{\text{Tiempo Ciclo}} = \frac{\text{Toneladas Cargadas}}{T.Hang + T.Spot + T.Load}$$

En determinados casos de estudio, pueden considerarse indicadores de productividad específicos que permiten un análisis más detallado del rendimiento operacional.

- Productividad efectiva

$$\text{Productividad Efectiva} = \frac{\text{Toneladas Cargadas}}{T.Spot + T.Load}$$

- Dig Rate

$$\text{Dig Rate} = \frac{\text{Toneladas Cargadas}}{T.Load}$$

2.2.15 Productividad de acarreo (ton/h)

Este indicador representa el rendimiento global de la flota de camiones durante la operación de acarreo. Para su cálculo, primero se determinan las diferentes productividades generadas por cada flota y, posteriormente, se obtiene el desempeño conjunto del sistema de transporte.

$$\text{Productividad de Acarreo} = \frac{\text{Toneladas Cargadas}}{\text{Tiempo Ciclo}}$$

2.2.16 Parámetros y diseño de vías

En la actualidad, la ingeniería vial viene siendo adaptada al diseño, construcción y gestión de caminos destinados al tránsito de equipos pesados en minería. No obstante, debido a que la actividad minera presenta condiciones distintas a las de la construcción civil, existen diferencias

importantes relacionadas con las cargas aplicadas sobre las vías, la intensidad del tránsito vehicular, los grandes volúmenes de material transportado, la calidad del camino, los factores climáticos, la disponibilidad de equipos, la vida útil del diseño y los costos involucrados en comparación con una vía convencional.

El diseño adecuado de vías y caminos seguros permite alcanzar mejores niveles de rendimiento y, en consecuencia, elevar la productividad de la operación minera. Por el contrario, cuando el diseño vial es deficiente, no se logra un desempeño óptimo, lo que puede ocasionar situaciones no previstas, como mantenimientos correctivos no programados. Esto incrementa los costos, acelera el desgaste de los equipos y no constituye una solución sostenible en el tiempo, ya que únicamente atenúa de manera temporal los efectos de una vía mal diseñada.

2.2.17 Diseño geométrico

El diseño geométrico constituye la etapa inicial en la planificación de las vías de acarreo. Comprende la definición del trazado y alineamiento de los caminos tanto en sentido horizontal, considerando aspectos como el ancho de vía, la curvatura y el radio de giro, como en sentido vertical, incluyendo gradientes de rampas, peraltes y elevaciones. Los parámetros permitidos para este diseño están condicionados por el método de explotación empleado en la mina. Asimismo, dentro de este diseño también se contemplan las bermas de seguridad y los sistemas de drenaje.

El propósito del diseño geométrico es lograr una vía segura y eficiente. En ese sentido, un diseño óptimo no depende únicamente de sus características geométricas, sino también de su integración con los diseños estructural, funcional y de mantenimiento.

- Ancho de vía horizontal: Cuyo criterio de definición se basa en las dimensiones del equipo de mayor tamaño que opera en la mina. Por ello, como referencia técnica,

se recomienda utilizar el ancho de los equipos para establecer el ancho adecuado de la vía.

Tabla 1

Anchos recomendados según el ancho de los equipos

Ancho del vehículo	1 carril	2 carriles	3 carriles
8	16	28.0	40
9	18	31.5	45
10	20	35.0	50
11	22	38.2	55
12	24	42.0	60
13	26	45.5	65
14	28	49.0	70
15	30	52.5	75
16	32	56.0	80
17	34	59.5	85
18	36	63.0	90
19	38	66.5	95
20	40	70.0	100
21	42	73.5	105
22	44	77.0	110
23	46	80.5	115
24	48	84.0	120
25	50	87.5	125
26	52	91.0	130
27	54	94.5	135

Nota. Thompson, R. (2003). *Mine Haul Road Design, Construction & Maintenance Management*. Australia: MIEAust PrEng.

De manera práctica, el ancho de vía también puede determinarse mediante la expresión:

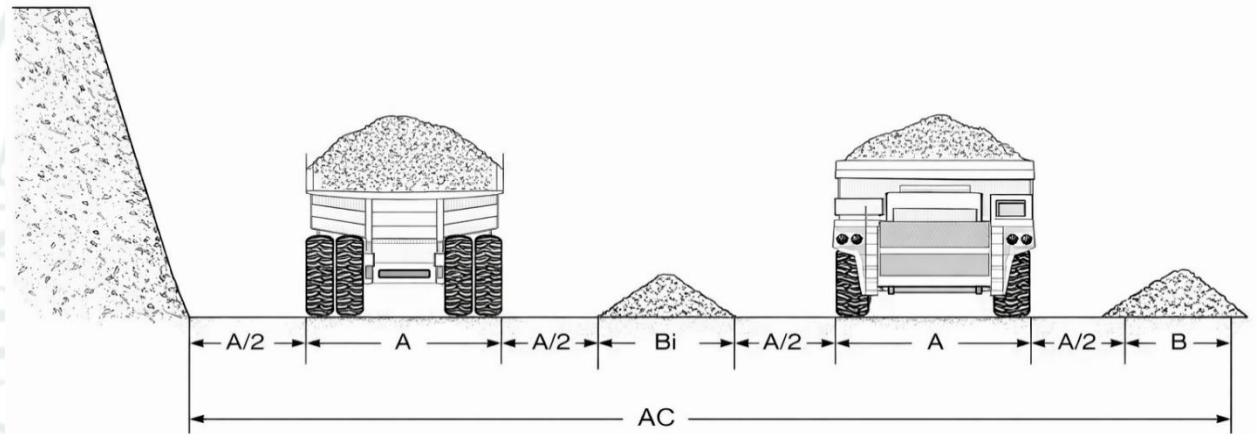
$$AV = 3.5A + B$$

Donde AV representa el ancho de la vía, A corresponde al ancho del camión y B al ancho de la berma. Esta relación permite estimar de forma rápida el espacio necesario para el tránsito seguro de los equipos en la vía.

- Ancho de vía horizontal: En este tipo de vías se debe considerar un espacio libre a ambos lados del camión, equivalente a la mitad del ancho del equipo por cada lado. En términos de diseño, se recomienda que el ancho total de la vía resulte de sumar cuatro veces el ancho del camión, más el ancho de la berma intermedia y el de la berma de seguridad.

Figura 6

Diseño de ancho de vía con pendiente



Nota. Grafica de diseño de vía con camiones mineros cargados.

De manera práctica, el ancho de vía puede estimarse mediante la siguiente expresión:

$$AV = 4A + Bi + B$$

Donde AV corresponde al ancho total de la vía, A representa el ancho del camión de mayores dimensiones, Bi es el ancho de la berma intermedia y B el ancho de la berma de seguridad. Esta fórmula permite definir de manera referencial el espacio necesario para una circulación segura en vías de acarreo.

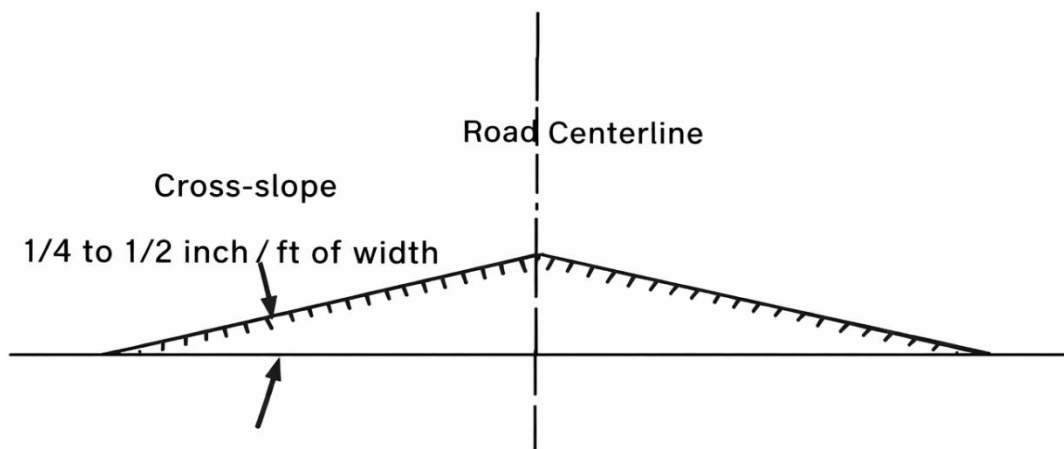
- Peralte de una curva: Cuando un camión circula por una curva, está sometido a una fuerza centrífuga que tiende a desplazarlo hacia la parte exterior del recorrido. Por esta razón, el peralte, entendido como la inclinación transversal de la vía en curva, se diseña con el fin de contrarrestar dicho efecto y contribuir a una circulación más segura y estable del equipo.

Tabla 2
Peraltes recomendados para curvas horizontales

Radio de curvatura	Velocidad del camión (Km/h)				
	10	15	20	25	35 a más
50	0.04	0.04			
100	0.04	0.04	0.04		
150	0.04	0.04	0.04	0.05	
250	0.04	0.04	0.04	0.04	0.06
300	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05
600	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
1000	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04

Nota. Radio de curvatura con relación a la velocidad de camión.

Figura 7
Grafica de peralte

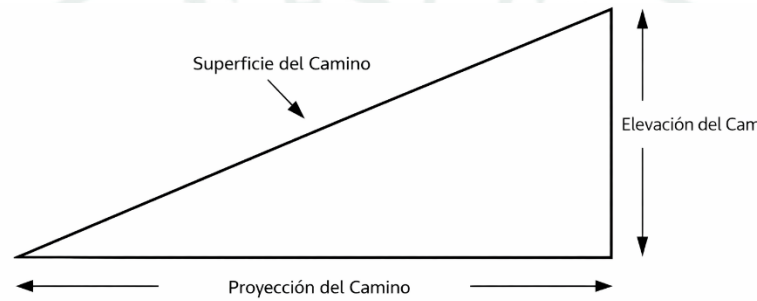


Nota. Grafica de peralte, medida en pies.

- Pendiente: La pendiente corresponde a la inclinación que presenta la vía con respecto a un plano horizontal. Su determinación se realiza mediante una relación que permite expresar el desnivel existente en función de la distancia recorrida.

Figura 8

Pendiente de una vía



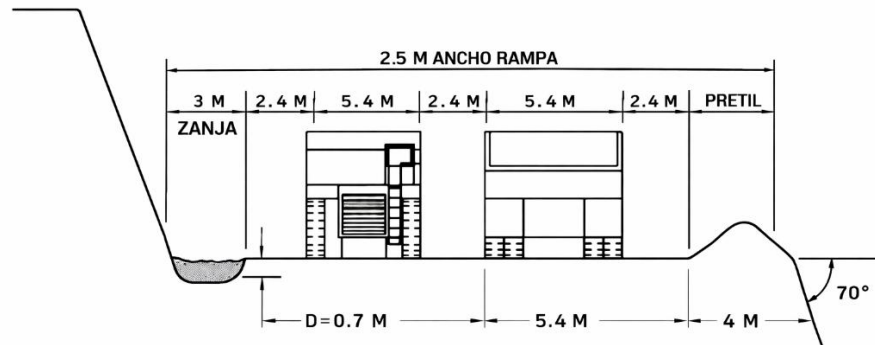
$$\text{Pendiente en \%} = \frac{\text{Elevación}}{\text{Proyección}} \times 100$$

Nota. Representación grafica de pendiente, proyección de camino y elevación de camino.

El límite máximo recomendable para rampas principales es del 10% y rampas auxiliares del 8%. (CATERPILLAR, 2009)

- Bermas de seguridad: Como parte de los criterios de seguridad, las bermas deben construirse en los extremos laterales de los caminos. Se recomienda que su altura sea equivalente a la mitad del diámetro del neumático del equipo de mayor tamaño que opera en la mina.

Figura 9
Berma de seguridad



Nota. Representación gráfica de berma de seguridad con camiones mineros

- Cunetas: Las cunetas constituyen un elemento fundamental del sistema de drenaje en el diseño de vías, ya que permiten evacuar el agua y evitar que esta provoque daños o deterioro en la superficie del camino. Para su diseño adecuado deben considerarse cuatro aspectos principales: la profundidad, el perfil, la pendiente y la capacidad hidráulica.

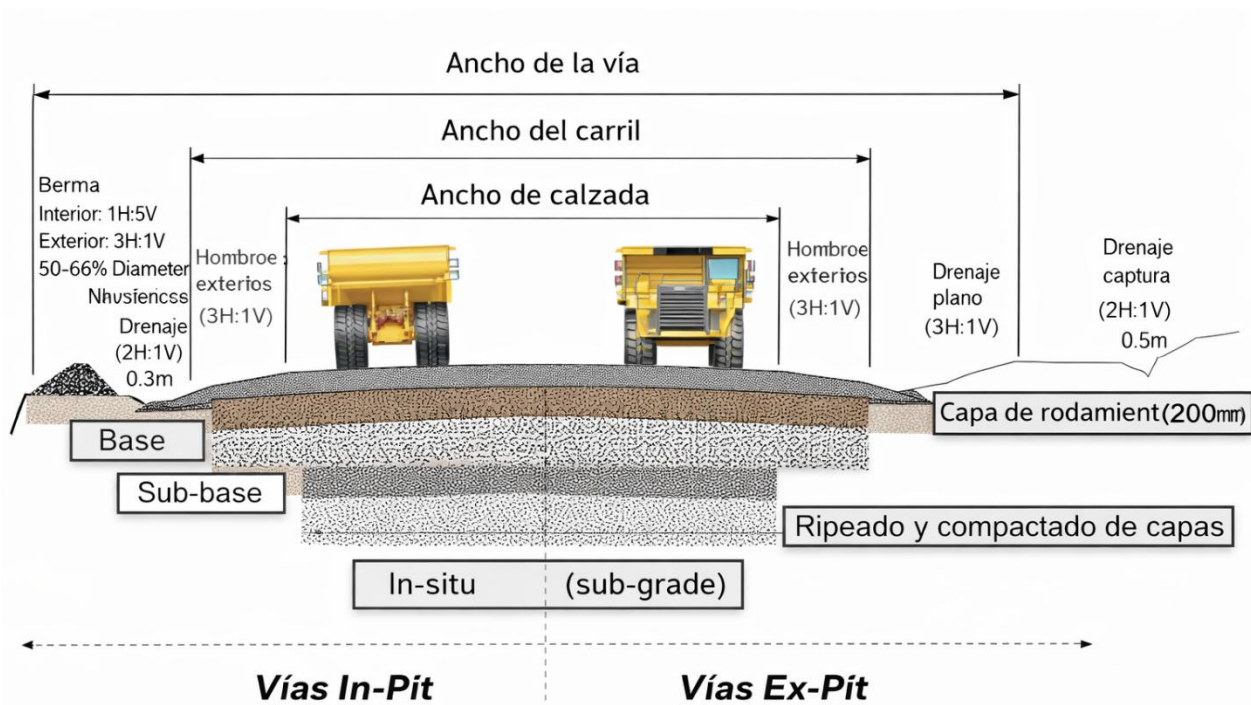
2.2.18 Diseño estructural

El diseño estructural tiene como finalidad proporcionar a las vías de acarreo la resistencia necesaria para soportar las cargas aplicadas durante su vida útil, evitando así la ocurrencia de mantenimientos no programados.

Las deformaciones que con frecuencia se presentan en estas vías suelen originarse por fallas en sus capas estructurales, generalmente asociadas al uso de materiales de baja calidad, poca resistencia mecánica y alta sensibilidad frente a factores externos.

Figura 10

Estructura de diseño de una vía de acarreo



Número de capas varía según el diseño de mina

Nota. Diseño grafico de vía de acarreo con camión minero.

- **Capa de rodamiento:** Es la capa superior de la vía de acarreo y constituye la superficie de contacto directo con los equipos. Su diseño y desempeño están estrechamente relacionados con el plan de mantenimiento vial. Generalmente, para su conformación se emplea material de lastre.
- **Base:** Capa ubicada debajo de la capa de rodamiento. Su selección y colocación dependerá del diseño estructural.

Figura 11*Clasificación de la resistencia de la capa base*

Tipo	Descripción	Mpa equivalente
Tipo 1	Se trata de una estructura de alta calidad, correctamente nivelada y conformada por roca limpia de buena calidad, dispuesta de manera compacta y con un fuerte intertrabado entre sus elementos, en capas escalonadas de 300 mm.	2000 Mpa
Tipo 2	Material de mina estéril	1000 Mpa
Tipo 3	Corresponde al material predominante existente en el terreno, compuesto por una mezcla nivelada de suelo grueso y fragmentos rocosos con escasa unión entre sí.	500 MPa

Nota. Clasificación de resistencia por tipo.

- Sub-base: Esta capa se localiza por debajo de la base y cumple un papel importante en la estructura de la vía, ya que debe estar conformada por materiales con proporciones adecuadas y suficiente resistencia para soportar las presiones transmitidas desde las capas superiores. Además, debe presentar buen comportamiento frente a condiciones de alta presencia de agua. En muchos casos, puede emplearse una combinación de materiales para conformar de manera conjunta las capas de base y sub-base.
- Capa in situ o relleno: Corresponde al material existente en el nivel natural del terreno. Su evaluación se centra en su capacidad resistente, debido a que, si este material no presenta condiciones mecánicas adecuadas, las capas superiores deben compensar dicha deficiencia estructural.
- Resistencia a la rodadura: La resistencia a la rodadura es la oposición que presenta el terreno al desplazamiento de un equipo determinado. Este valor depende tanto del

tipo de superficie como del sistema de tracción del equipo, ya sea con neumáticos o con cadenas. Para su determinación se emplea la siguiente expresión:

$$Rr = Kr * Pt$$

Donde:

- Rr: Resistencia a la rodadura (Kg)
- Pt: Peso del vehículo en marcha, con carga (Ton)
- Kr: Coeficiente de rodadura (Kg/Ton)

Donde el coeficiente de rotura se determina por:

Tabla 3
Resistencia a la rodadura típicos

Superficie del terreno	Resistencia a la rodadura
Asfalto	1.5
Concreto	1.5
Terreno llano, duro, seco, libre de material suelto	2
Terreno seco, pero no compacto	3
Terreno suave, sin rippear, con escasa mantención	4
Terreno suave, ripeado	8
Terreno con rellenos pocos sólidos	8
Terreno profundamente surcado	16
Terreno de ripio muy compacto, seco, libre de material suelto	2
Terreno de ripio no firme, no compactado, seco	3
Terreno de ripio con material suelto	10
Terreno fangoso, pero sólido	4
Terreno fangoso suave, poroso	16
Terreno arenoso, con material suelto	10
Terreno nevado y compacto	2.5

Nota. (Thompson, 2003)

2.2.19 Diseño de acuerdo con la rotura

El diseño funcional se sustenta en el comportamiento que tendrá la capa de rodadura de las vías, así como en la selección de los materiales que conforman cada una de sus capas y en la

respuesta de estos frente a las diferentes cargas transmitidas por los equipos que circulan sobre ellas.

Cuando una vía presenta un diseño deficiente, puede generar un incremento en la resistencia a la rodadura, lo que ocasiona daños en los neumáticos, acelera el deterioro de los componentes y afecta el desempeño operativo. Por ello, el objetivo del diseño funcional es reducir los tiempos de degradación y mejorar la resistencia al rodamiento.

Entre los materiales típicos considerados en este tipo de diseño se encuentran los siguientes:

- Materiales in situ: comprenden suelos naturales, material erosionado, rocas de baja competencia y coberturas de roca sólida.
- Capas de base y sub-base: deben estar conformadas por materiales de buena calidad, no erosionados y libres de arcilla, agua o tierra, ya que se requieren elementos duros, en bloque y con un contenido de finos menor al 20 %. Asimismo, se recomienda que el tamaño de los bloques corresponda aproximadamente a dos tercios del espesor de la capa de diseño.
- Superficie de rodamiento: esta capa puede estar formada por uno o varios materiales combinados. Para garantizar un desempeño adecuado, debe presentar una resistencia superior al 80 % de CBR (California Bearing Ratio), ya que se requieren materiales duros y con elevada resistencia al desgaste y a la erosión provocada por el tránsito de camiones de gran tonelaje.

2.2.20 Diseño de mantenimiento

El diseño de mantenimiento permite establecer la frecuencia con la que deben ejecutarse las actividades de conservación en cada componente de las vías. De este modo, el mantenimiento

puede organizarse, programarse y aplicarse de manera diferenciada, con el propósito de alcanzar un desempeño adecuado y reducir el costo total del sistema vial.

Cuando una red vial se encuentra en malas condiciones, se incrementa la necesidad de realizar mantenimientos no planificados, lo que afecta negativamente la productividad de los camiones y genera tiempos de reparación mayores incluso que los requeridos para la propia construcción de la vía.

Por ello, una inversión apropiada de tiempo y recursos en el diseño adecuado de las vías resulta beneficiosa en el largo plazo, ya que contribuye a disminuir los costos asociados a mantenimientos imprevistos y mejora el rendimiento de los equipos que transitan por ellas.

El diseño de mantenimiento puede clasificarse en función de los siguientes criterios:

- El volumen de tránsito estimado durante la vida útil de la vía.
- El tipo de camión que circulará por ella.
- El nivel de desempeño esperado.

Figura 12
Clasificación de las vías

CATEGORÍA CAMINO DE VIAS	Volumen de tránsito diario (Max t turn) Mk	Tipo de vehículo GVM (vehículo bruto cargado)	Nivel de desempeño requerido #	Descripción
CATEGORÍA I	>150	391	3	Caminos semi-permanente de alto volumen caminos – la rampa del rajo principal. Funcionamiento de la vida de al menos 6 –12 años
CATEGORÍA II	100 – 150	391	3	Caminos semi-permanente de mediano volumen. Funcionamiento de la vida de al menos 2 – 5 años
CATEGORÍA III	<100	391	1	Caminos transitorio, medio a bajo volumen caminos. Funcionamiento de la vida de 1 años
Notas # Nivel de rendimiento definido como: 1 Adecuada a corto plazo, pero bastante mate mantenimiento intensivo como vida de diseño o volumen de trafico previsto o cambio GVM superado. 2 Buena con las intervenciones de mantenimiento durante la vida de de diseño. 3 Excelente con requisitos de mantenimiento bajos sobre la vida de diseño.				

Nota. Clasificación de vías de acuerdo con su tipo de categoría.

2.2.21 *Front Runner*

Sistema Autónomo de Komatsu 930E

El Komatsu 930E es un camión autónomo de 290 toneladas desarrollado por Komatsu en colaboración con Modular Mining. Opera mediante una red inalámbrica que integra diversos sistemas para garantizar una operación segura, eficiente y sin intervención humana directa:

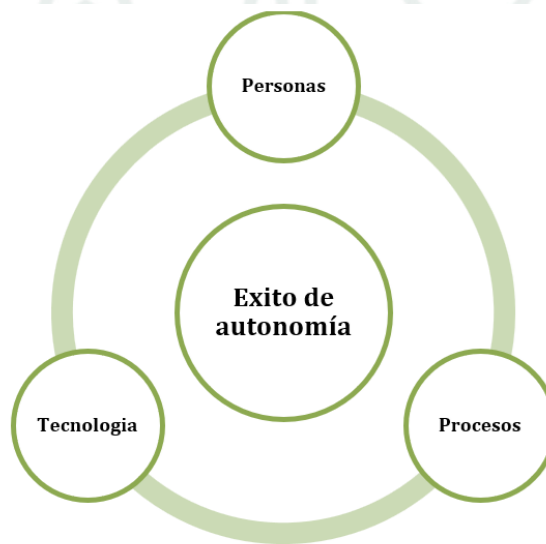
- Sistema de Monitoreo General (GMS): Supervisa sensores y controladores para ajustar parámetros del vehículo y evitar comandos erróneos.
- Sistema de Navegación (NS): Gestiona rutas programadas y mantiene distancias seguras. Ante desviaciones, reduce la velocidad hasta detener el camión. Utiliza antena, giroscopio de fibra óptica, sensor láser pulsante y sensor de rotación de rueda.
- Sistema de Detección de Obstáculos (ODS): Detecta objetos hasta 100 metros mediante tres subsistemas: sensor táctil (corto alcance), sensor ultrasónico (hasta 15 m) y radar láser (1.5 a 100 m).
- Sistema de Monitoreo del Vehículo: Evalúa el estado técnico del camión. En caso de fallas, reduce la velocidad y permite control remoto desde el cargador o una consola externa. El vehículo puede reactivarse en modo autónomo mediante un botón de reinicio en cabina.

2.2.22 *Sistema MineStar (CATERPILLAR)*

Los camiones CAT integran tecnologías avanzadas para operación autónoma:

- VIMST™ (Vital Information Management System): Monitorea más de 250 parámetros técnicos y de carga útil en tiempo real.
- TPMS (Truck Payload Management System): Detecta sobrecargas y alerta al operador.
- CAT MineStar: Plataforma centralizada para gestión autónoma.
- Product Link: Diagnóstico remoto, planificación de rutas y mantenimiento optimizado.

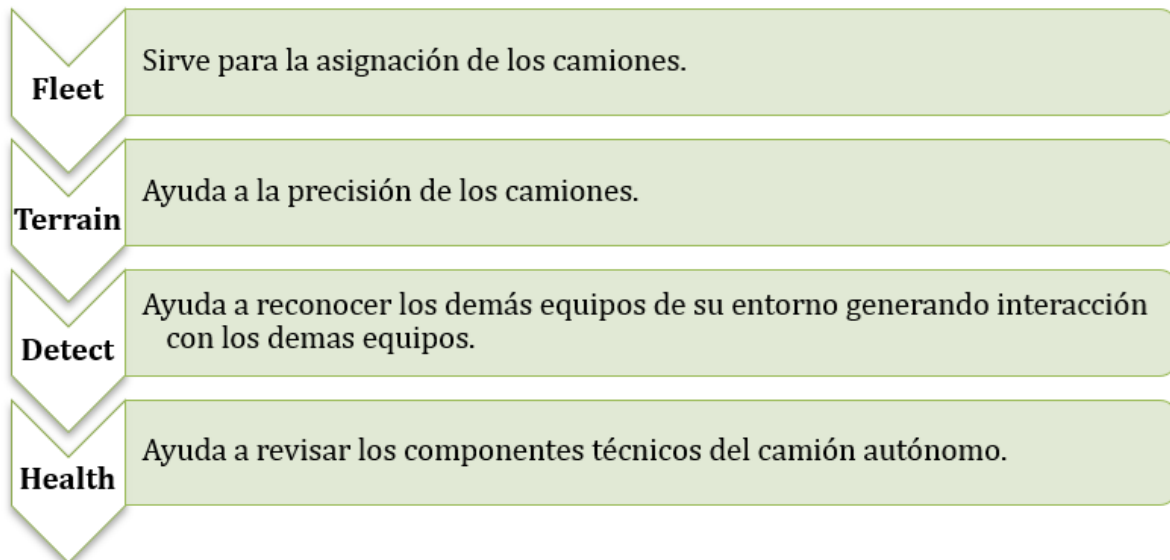
Figura 13
Éxito de autonomía



Nota. Diagrama del éxito de autonomía, personas, tecnología y procesos.

CAT COMMAND cuenta con una plataforma CAT MineStar:

Figura 14
Plataforma CAT MineStar



Nota. Plataforma CAT Minestar explicación grafica.

2.2.23 Reconocimiento LIDAR

Figura 15
Command for Hauling - Liar



Nota. Reconocimiento LIDAR del camión minero autónomo.

2.2.24 Sistema de implementación de la Autonomía en Camiones mineros

Figura 16

Command for Hauling - Ferreyros habilidades en autonomía



Nota. Sistema de implementación de autonomía.

2.2.25 Sistema de acarreo autónomo

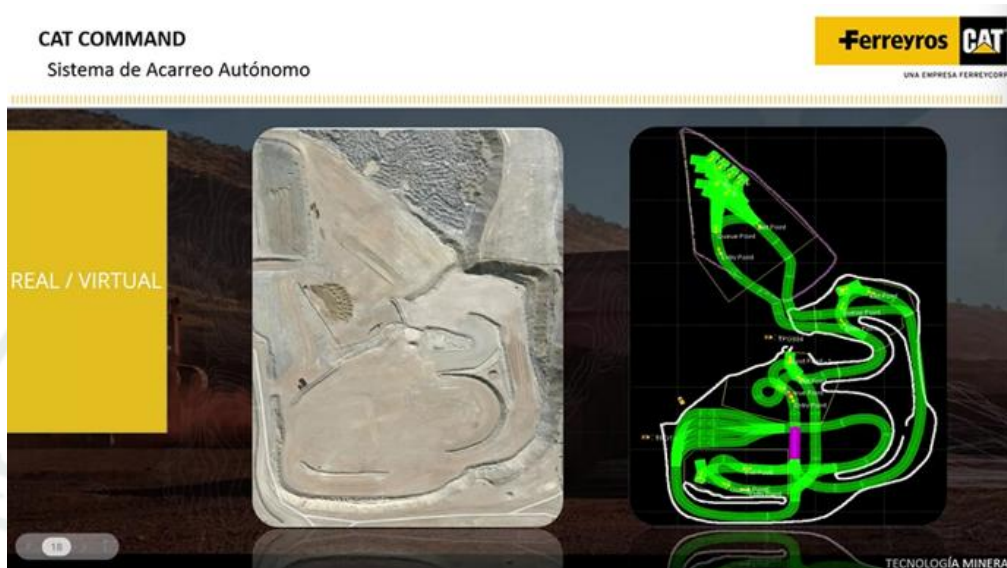
Figura 17

CAT Command



Nota. Proceso de conexión del CAT COMMAND entre oficina y camión.

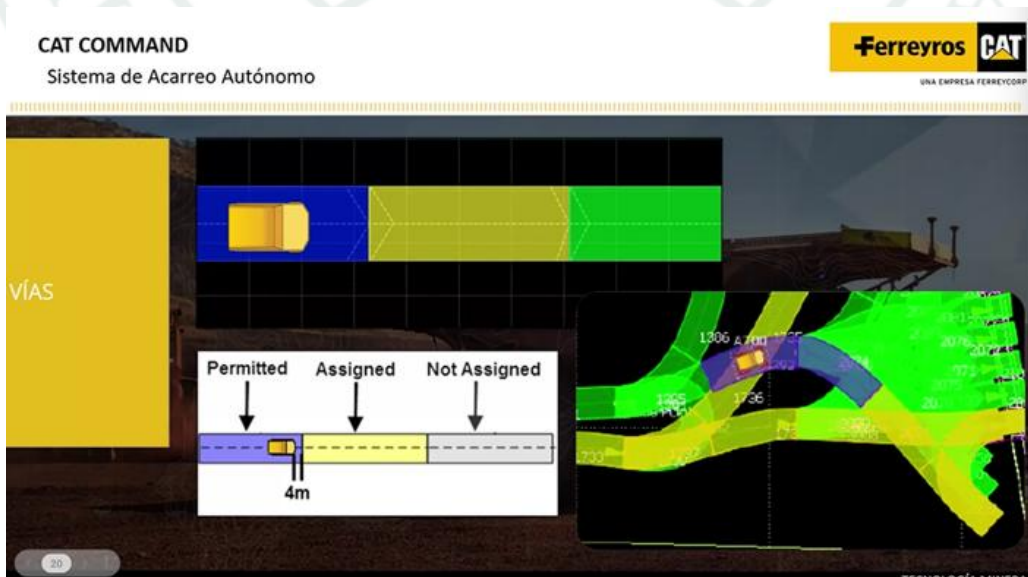
Figura 18
CAT Command



Nota. Comparación entre vista en terreno y visualización en pantalla del sistema autónomo.

CAT COMMAND nos permite la asignación de vías por segmentación por la que el primer camión que llegue a alguna intersección tiene ganada el segmento.

Figura 19
CAT Command



Nota. Tipos de asignación de rutas en intersecciones para sistemas autónomos.

- AZUL = Ruta asignada al camión, acorde a la velocidad que puede tomar.
- AMARILLO = Ruta potencial que podrá recorrer, dependiendo del acceso que se le otorgue por el centro de control de la mina.
- VERDE = Ruta no asignada ni accesible para el camión minero.

2.2.26 Componentes Estándar de un Sistema de Gestión de Flota Autónoma

Kit para Camión Minero de Extracción

Figura 20
Componentes de un camión minero autónomo



Nota. Grafica de los componentes de un camión minero autónomo.

- Gabinete de Autonomía: Es el cerebro del Camión
- Antenas y Luces: Indicadores del modo del camión mediante luces, donde el modo manual es verde y el modo automatizado es de color Azul.
- Switch Cambio de Modo: Es el paso para cambio de modo mediante Switch.

- Antena GNSS: Ubicación, cuenta con una precisión menor a 1cm los cuales al ser añadidos al camión cuenta con una precisión menor a 10 cm, con el uso de equipos TRIMBLE.
- LIDAR e IMU: Sensores que emiten aseres de Luz que ayudan al levantamiento del entorno del camión. Tienen retos para trabajar en zonas de neblina y polvo.
- Radares: Emite ondas de radio que ayuda a trabajar en zonas de neblina o polvo al LIDAR evitando así paradas por neblina o polvo.

2.3 Hipótesis

En los casos mineros documentados seleccionados, los camiones autónomos de acarreo presentan mejores indicadores técnico-operativos y, en la mayoría de los escenarios, un menor valor actual de costos que los camiones convencionales; sin embargo, su conveniencia depende de la escala de producción, infraestructura tecnológica, costos de implementación y nivel de preparación organizacional de cada operación.

2.3.1 Variable dependiente

- Implementación de flotas autónomas

2.3.2 Variable independiente

- Viabilidad de la operación minera

Tabla 4*Operacionalización de variables*

Variable	Tipo	Dimensión	Indicadores
Implementación de flotas autónomas	Independiente	Tecnológica	Sistema autónomo instalado, sensores, radar, LIDAR, GNSS, software de gestión
		Operativa	Nivel de automatización del acarreo, continuidad operacional, control de rutas, interacción con equipos tripulados
		Organizacional	Capacitación, soporte técnico, mantenimiento especializado, adaptación operativa
Viabilidad de la operación minera	Dependiente	Técnica	Disponibilidad, utilización, productividad de acarreo, tiempos de ciclo, desempeño frente a flota convencional
		Económica	CAPEX, OPEX, costo unitario de transporte, VAC, ahorro en combustible, neumáticos y mantenimiento
		Seguridad operativa	Reducción de exposición al riesgo, disminución de accidentes, menor fatiga, reducción de error humano

Nota. Tipo de variables aplicado en la tesis que tiene como base la autonomía de flotas mineras.



CAPÍTULO III

3. ALCANCES Y LIMITACIONES

3.1 Alcances y limitaciones

La presente investigación tiene como alcance evaluar la viabilidad de la implementación de flotas autónomas en minería a cielo abierto, aplicada al caso de una mina del sur del Perú, desde una perspectiva técnica, económica y operativa. El estudio comprende el análisis comparativo entre camiones autónomos y convencionales, considerando variables como disponibilidad mecánica, utilización, productividad, consumo de combustible, vida útil de neumáticos, costos de inversión, costos operativos y rentabilidad mediante indicadores como el Valor Actual de Costos (VAC). Asimismo, incluye el análisis del nivel de preparación organizacional requerido para la incorporación de esta tecnología.

En cuanto a sus limitaciones, la investigación se desarrolla a partir de revisión documental, análisis comparativo y uso de datos técnicos y económicos reportados en estudios previos, tesis, benchmarking técnico y documentación especializada, por lo que no contempla experimentación directa en campo ni pruebas piloto con flota autónoma en una unidad minera real del sur del Perú. Del mismo modo, los resultados están condicionados a la disponibilidad y calidad de la información secundaria utilizada, así como a las diferencias operativas, geográficas, tecnológicas y económicas entre las minas analizadas y el contexto de aplicación del caso estudiado. También debe considerarse que la autonomía minera es una tecnología en evolución, por lo que algunos costos, rendimientos y condiciones de implementación pueden variar en el tiempo.

3.2 Tipo y nivel de investigación

3.2.1 Tipo de investigación

La investigación es de tipo aplicada, porque busca generar conocimiento útil orientado a resolver un problema concreto del sector minero, referido a la evaluación de la viabilidad técnica, económica y operativa de implementar flotas autónomas en minería a cielo abierto. Su propósito no se limita a describir una tecnología, sino que pretende aportar criterios de análisis y toma de decisiones para su posible adopción en una operación minera del sur del Perú.

Asimismo, presenta un enfoque cuantitativo, ya que emplea indicadores medibles y comparables, tales como disponibilidad mecánica, utilización, producción, consumo de combustible, VAC, con el fin de analizar diferencias entre flotas convencionales y autónomas. Complementariamente, incorpora elementos de análisis descriptivo-documental, debido a que parte de la revisión sistemática y técnica de fuentes secundarias especializadas, informes de benchmarking y estudios comparativos previos.

3.2.2 Nivel de investigación

El nivel de investigación es descriptivo-comparativo. Es descriptivo porque caracteriza el comportamiento técnico, económico y operativo de las flotas autónomas y convencionales en minería superficial. Es comparativo porque contrasta ambas modalidades de operación a partir de indicadores de desempeño, costos, identificando ventajas, desventajas y condiciones de implementación.

De manera complementaria, el estudio alcanza un nivel explicativo básico, en la medida en que interpreta cómo la implementación de la autonomía influye en la mejora o variación de los resultados operacionales y económicos, asociando dichos cambios con factores como reducción del error humano, mayor control de rutas, mejor utilización de equipos y menores tiempos improductivos.

3.3 Población y muestra

3.3.1 Población

La población de estudio está conformada por la información técnica, económica y operativa relacionada con flotas de camiones autónomos y convencionales empleadas en minería a cielo abierto, así como por estudios, informes técnicos, tesis, benchmarking y documentación especializada referida a su implementación, desempeño y viabilidad. Esta población incluye indicadores operacionales, costos de inversión y operación, condiciones de infraestructura y criterios de preparación organizacional vinculados al uso de sistemas autónomos de acarreo.

3.3.2 Muestra

La muestra fue no probabilística e intencional y estuvo conformada por los documentos y casos que presentaron información cuantitativa comparable sobre disponibilidad, utilización, producción, consumo de combustible, neumáticos, CAPEX, OPEX o VAC.

3.4 Método, Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

3.4.1 Procedimiento y técnica de recolección de datos

El procedimiento de recolección de datos se realizó en cuatro etapas. En la primera, se efectuó la búsqueda y selección de fuentes documentales especializadas, tales como tesis, informes técnicos, estudios de benchmarking y literatura académica relacionada con flotas autónomas en minería a cielo abierto. En la segunda etapa, se organizó la información de acuerdo con las dimensiones de análisis del estudio: técnica, económica, operativa. En la tercera, se extrajeron los indicadores más relevantes para la comparación entre flotas autónomas y convencionales. Finalmente, en la cuarta etapa, se sistematizó la información para su posterior análisis comparativo e interpretación.

La técnica principal empleada fue el análisis documental, dado que la investigación se sustenta en el examen y comparación de información secundaria proveniente de documentos técnicos y académicos. Esta técnica permitió identificar variables, indicadores, resultados operativos y parámetros económicos útiles para responder a las preguntas de investigación.

3.4.2 Técnicas de recolección de datos

Las técnicas de recolección de datos utilizadas fueron las siguientes:

- Revisión documental: permitió recopilar información de tesis, artículos, informes técnicos y benchmarking sobre autonomía minera, desempeño de flotas y evaluación económica.
- Análisis comparativo: permitió contrastar indicadores técnicos y económicos entre operaciones autónomas y convencionales, así como evaluar diferencias en productividad, utilización, disponibilidad y costos.
- Sistematización de información secundaria: permitió ordenar los datos extraídos en tablas comparativas, cuadros de indicadores y criterios de evaluación para facilitar su interpretación.

3.4.3 Instrumentos de medición

Los instrumentos de medición utilizados en la investigación fueron:

- Ficha de análisis documental: empleada para registrar información clave de cada fuente revisada, como autor, año, objetivo, metodología, resultados técnicos, económicos y conclusiones.
- Matriz de comparación de indicadores: utilizada para organizar y comparar variables como disponibilidad mecánica, utilización, producción, consumo de combustible, costos operativos, CAPEX, OPEX, VAC.

- Matriz de evaluación de viabilidad: diseñada para integrar los resultados técnicos, económicos y operativos y facilitar la interpretación global de la conveniencia de implementar flotas autónomas en el caso de estudio.

Para el análisis de los datos se empleará estadística descriptiva y comparativa. En primer lugar, los datos serán organizados en tablas y cuadros resumen, según las dimensiones técnica, económica y operativa. Posteriormente, se calcularán medidas descriptivas como promedios, porcentajes y diferencias relativas entre los indicadores de flotas autónomas y convencionales. Entre los principales indicadores a comparar se encuentran la disponibilidad mecánica, la utilización de equipos, la producción, el consumo de combustible, la vida útil de neumáticos y los costos asociados a la operación.

En el análisis económico se empleará la comparación de indicadores financieros como el CAPEX, OPEX, VAC, a fin de determinar la conveniencia económica de la implementación de flotas autónomas. Además, los resultados serán presentados mediante cuadros comparativos y gráficos de barras, según corresponda, para facilitar la interpretación de los efectos de la autonomía en cada caso evaluado. El análisis se centrará en identificar tendencias, diferencias y relaciones entre variables, más que en la inferencia estadística experimental, debido a que se trabaja con información secundaria y no con datos obtenidos mediante diseño experimental o muestreo probabilístico.

3.5 Lugar de desarrollo de investigación

La presente investigación se desarrolla en el contexto de una mina a cielo abierto ubicada en el sur del Perú, considerada como caso de estudio teórico para la evaluación de la implementación de flotas autónomas de acarreo. En ese sentido, el trabajo no se ejecuta mediante intervención directa en campo ni en una operación minera específica, sino que se sustenta en el análisis técnico, económico y operativo de información documental, antecedentes

de investigaciones previas y experiencias de implementación de autonomía en minería superficial.

Desde esta perspectiva, el lugar de desarrollo de la investigación corresponde al ámbito minero del sur del Perú, tomando como referencia las condiciones generales de una operación minera superficial de dicha zona, tales como requerimientos de producción, condiciones operativas, infraestructura y posibilidades de adopción tecnológica. Esto permite contextualizar el estudio dentro de la realidad minera peruana y orientar sus resultados hacia una posible aplicación en unidades mineras con características semejantes.

3.6 Evaluación comparativa técnica de camiones mineros

Tabla 5

Evaluación comparativa técnica de camiones mineros CAT, Komatsu.

Criterio	CAT 794 AC	Komatsu 930E-5	Komatsu 930E-5SE
Potencia del motor (HP)	3,500 HP	2,700 HP	3,500 HP
Carga útil (toneladas cortas)	327 TN	320 TN	320 TN
Capacidad de carga útil (toneladas métricas)	297 TN (m3)	290 TN (m3)	290 1TN (m3)
Peso bruto nominal (t)	521 TN	502 TN	521 TN
Motor	C175-16 (Nivel 4)	Komatsu SSDA16V160	Komatsu SSDA18V170
Número de cilindros	16	16	18
Velocidad máxima (km/h)	60 km/h	64.5 km/h	64 km/h
Sistema autónomo disponible	MineStar Command Cat	Komatsu AHS	Komatsu AHS

Radio de giro cerrado	15 m	15.8 m	15.8 m
Diámetro de giro	32.4 m	32 m	32 m
Cabina	ROPS, Rollover Protective Structure	ROPS/FOPS Nivel 2 (ISO 3449)	ROPS/FOPS nivel 2 (ISO 3449)
Tamaño de neumático	53/80R63	53/80R63	53/80R63
Deposito tanque combustible	3785 L (1,000 gal)	4,542 litros (1,200 gal)	4,542 litros (1,200 gal)
Carga útil nominal	297 TN	290 TN	290 TN
Nunca debe excederse el peso bruto vehicular	521 TN	579 TN	579 TN

Nota. Comparativa de características de camiones mineros. Elaboración propia

3.7 Ventajas y desventajas de camiones mineros autónom

Tabla 6

Fortalezas y debilidades operativas de camiones mineros

Aspectos	Ventajas	Desventajas
Seguridad laboral	Reducción significativa de accidentes al eliminar el error humano.	Requiere sistemas muy robustos de detección y respuesta ante obstáculos impredecibles.
Costo operativo	Disminución del gasto en combustible (optimización de rutas), mantenimiento y salarios.	Inversión inicial muy alta en tecnología, infraestructura y capacitación.
Productividad	Operación continua 24/7, sin necesidad de turnos ni descansos.	Riesgo de congestión si no se optimiza adecuadamente el despacho.
Sostenibilidad	Compatible con energías renovables (ej. Quellaveco usa 100% energía limpia).	Alta dependencia de infraestructura tecnológica, aún no común en todas las minas.
Control y monitoreo	Seguimiento en tiempo real del desempeño del vehículo y condiciones del terreno.	Requiere una red de sensores, GPS y conectividad constante, incluso en zonas remotas.

Adaptación del personal	Creación de nuevos perfiles laborales más técnicos y especializados.	Pérdida de empleos tradicionales y necesidad de reconversión laboral costosa.
Mantenimiento predictivo	Los sistemas autónomos detectan fallas antes de que ocurran.	Tecnología aún susceptible a fallas si no se monitorea constantemente.
Compatibilidad con equipos actuales	En muchos casos, se pueden adaptar camiones convencionales con kits autónomos.	No todos los camiones antiguos son compatibles, lo que puede requerir reemplazos completos.

Nota. Fortalezas y debilidades operativas de camiones mineros. Elaboración propia.

3.8 Comparativa de camiones autónomos y convencionales

Tabla 7
criterios de evaluación para selección de equipos/alternativas operativas

Criterios de Evaluación para Selección de Equipos/Alternativas Operativas		
Criterio	Camión Autónomo	Camión Convencional
Conducción	Sin operador; guiado por sensores y algoritmos.	Operado por humanos; dependiente de la experiencia.
Costo a largo plazo	Menor, tras amortizar inversión inicial.	Mayor, por salarios, errores humanos y mantenimiento.
Riesgo de accidente	Bajo (sistemas automatizados de frenado y visión).	Alto (fatiga, errores humanos, condiciones peligrosas).
Reacción ante fallas	Automática y conectada a centros de monitoreo.	Depende del operador y sus reflejos.
Implementación inicial	Alta inversión en tecnología y red de soporte.	Menor inversión inicial, pero más costos recurrentes.

Nota. Comparativa técnica entre Camiones autónomos y convencionales. Elaboración propia.

3.9 Sistema de operaciones autónomas FrontRunner y MineStar

El sistema FrontRunner es una plataforma de operación autónoma que gestiona la navegación, programación de rutas, control de velocidad y monitoreo de condiciones del terreno para flotas de camiones.

3.9.1 Características del sistema FrontRunner y MineStar

Tabla 8

Características técnicas del sistema KOMATSU

CARACTERISTICAS	KOMATSU FrontRunner	CAT MINESTAR
Optimización de la Flota	Utiliza el sistema de gestión de flotas Modular para optimizar la asignación de camiones y mejorar la eficiencia operativa	Utiliza Command para rastrear, asignar y optimizar flotas en tiempo real. Permite gestionar cargas útiles, identificar cuellos de botella, reducir tiempos de ciclo y maximizar la utilización de equipos.
Reducción de Costos y Seguridad	Ofrece ahorros de costos de hasta un 15% y mejora la vida útil de neumáticos en un 40%, esto no solo reduce los costos, sino que también mejora la seguridad al minimizar la intervención humana en condiciones peligrosas.	Command permite operaciones autónomas y remotas, eliminando la exposición del operador a zonas peligrosas. Reduce costos operativos al disminuir el desgaste de componentes, mejorar la eficiencia del combustible y minimizar errores humanos.
Operación Consistente	Proporciona un rendimiento predecible y los resultados se mantienen estables, obteniendo datos en tiempo real y el cumplimiento de los planes mineros	El uso de IA en MineStar Edge permiten decisiones precisas (hasta 98% de exactitud), reduciendo la variabilidad entre operadores y mejorando la consistencia operativa.
Mantenimiento Proactivo	Facilita un mantenimiento más proactivo y reduce los costos generales de mantenimiento	MineStar Health ofrece monitoreo continuo del estado de los equipos, alertas de eventos críticos y análisis predictivo, permitiendo mantenimiento planificado y reducción de tiempos de inactividad.
Precisión	• FrontRunner utiliza GPS de alta precisión y sistemas de detección de obstáculos (ODS) que combinan radar y láser para asegurar una navegación precisa y segura de los camiones autónomos • La integración con el sistema de gestión de flotas DISPATCH optimiza la asignación de camiones,	MineStar Terrain proporciona guía GPS de alta precisión, seguimiento de materiales y cumplimiento exacto del plan de perforación, mejorando la fragmentación y reduciendo retrabajos.

mejorando la precisión en la
operación de acarreo

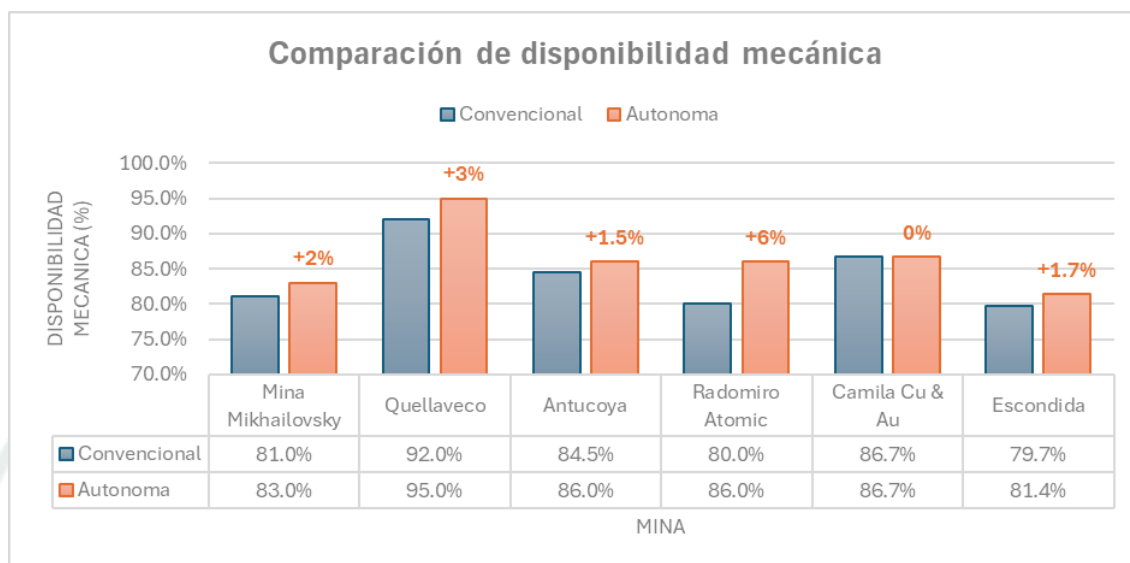
Tiempo de respuesta	• FrontRunner está diseñado para tomar decisiones en tiempo real, optimizando la asignación de camiones y mejorando la eficiencia operativa. Esto se logra mediante el uso de datos en tiempo real y algoritmos avanzados. • La capacidad de operar de manera consistente y predecible también contribuye a una respuesta rápida y eficiente	MineStar Edge permite decisiones inmediatas con datos precisos y automatización. La integración entre módulos (Fleet, Health, Terrain) permite respuestas rápidas ante eventos operativos.
Integración con equipos	• FrontRunner se integra con los camiones de accionamiento eléctrico de Komatsu, combinando durabilidad y tecnología autónoma avanzada. Esta integración asegura una operación fluida y eficiente. • Además, el sistema puede trabajar con tecnologías adicionales como el sistema de asistencia de trole, mejorando aún más la eficiencia energética y la productividad	Compatible con equipos Cat y de otros fabricantes. Command y Terrain se integran directamente con los controles electrónicos de fábrica, reduciendo tiempos de instalación y mejorando la interoperabilidad. Disponible para camiones, perforadoras, tractores y más.
Beneficios Ambientales	Además de mejorar la eficiencia y la seguridad, el sistema FrontRunner también contribuye a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, apoyando los objetivos de sostenibilidad de las empresas mineras	La automatización y optimización de rutas reducen el consumo de combustible y emisiones. La operación remota disminuye la infraestructura en sitio, apoyando los objetivos de sostenibilidad minera.

Nota. Características técnicas del sistema KOMATSU (FrontRunner) y CAT (MINESTAR).

3.10 Análisis Técnico De Kpis

Figura 21

Comparación de disponibilidad mecánica

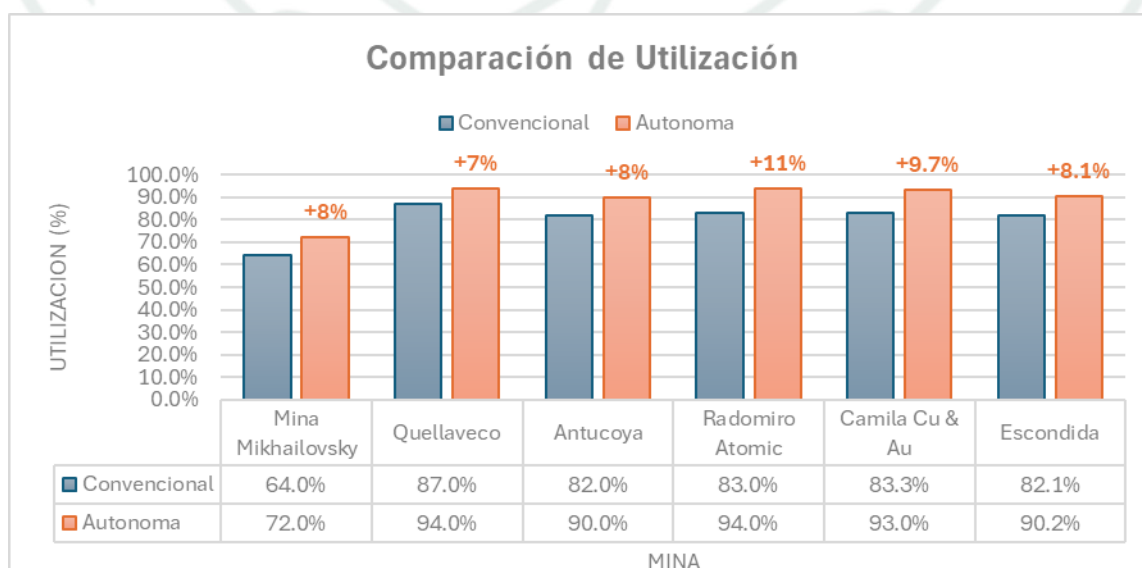


Nota. Disponibilidad mecánica (%) en minas seleccionadas: operación Convencional vs. Autónoma. Elaboración propia.

La disponibilidad mecánica mejoró en promedio un 2.4% con camiones autónomos. Más tiempo operativo, menos paradas. La autonomía también se traduce en mayor confiabilidad del equipo.

Figura 22

Comparación de utilización

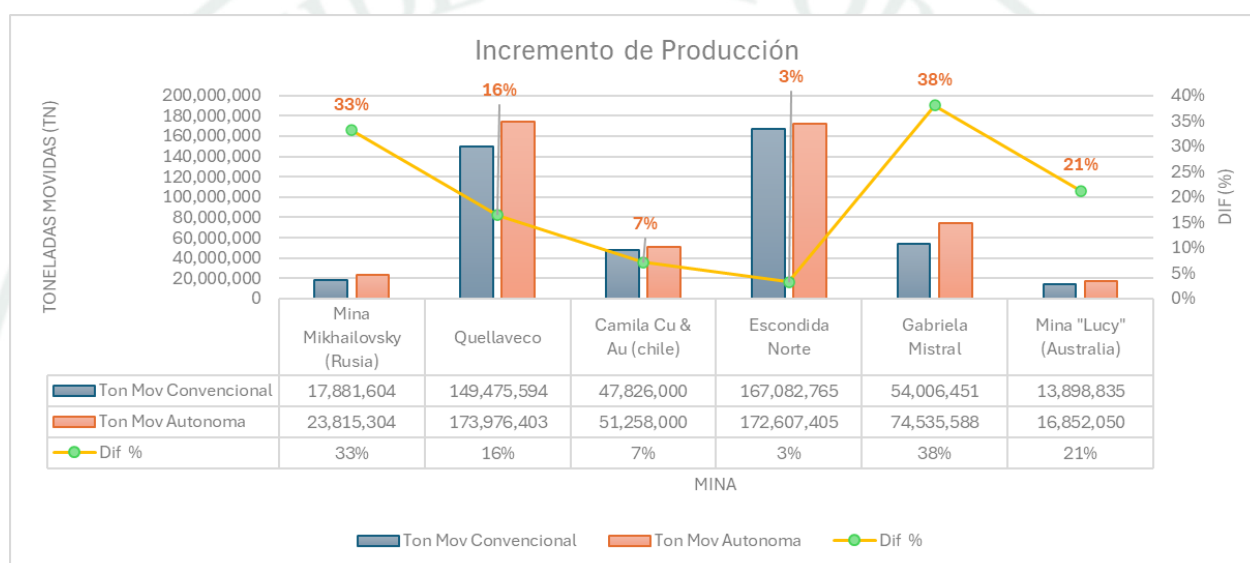


Nota. Análisis comparativo de utilización entre flotas convencionales y autónomas.

Elaboración propia.

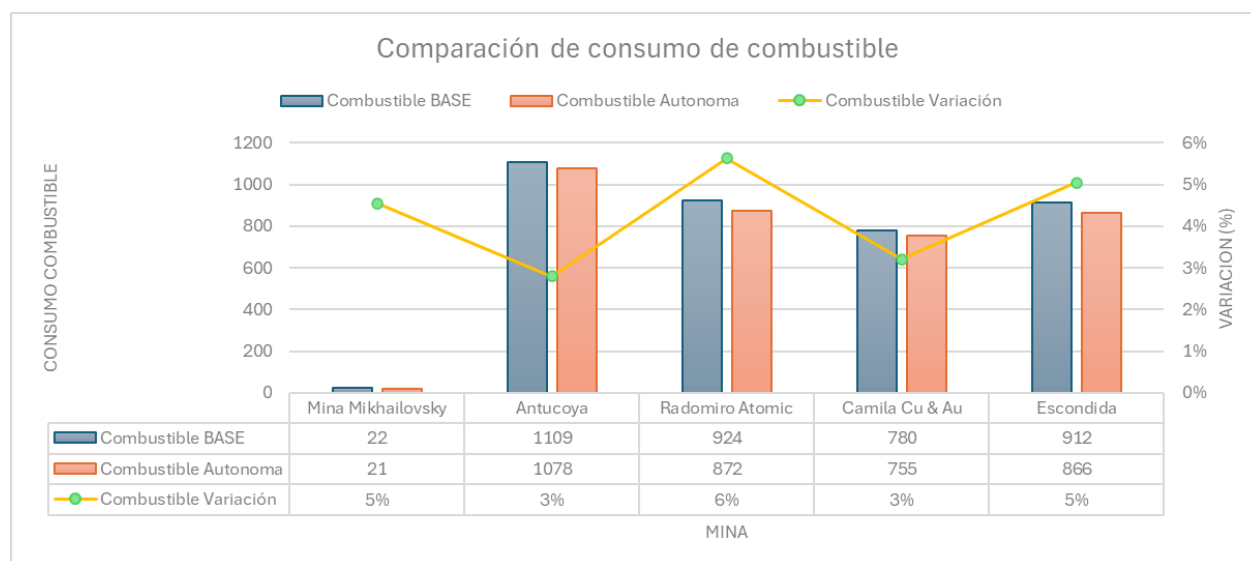
La autonomía elevó la utilización de camiones en un promedio de 8.6%. Más horas efectivas de trabajo por equipo, mayor rendimiento sin necesidad de ampliar la flota.

Figura 23
Incremento de producción



Nota. Análisis comparativo del rendimiento operativo: tonelaje movido convencional vs. Autónomo. Elaboración propia.

Las minas que implementaron camiones autónomos lograron un aumento promedio del 19.89% en su producción.

Figura 24*Comparación de consumo de combustible*

Nota. Análisis comparativo del consumo de combustible: operación convencional vs. Autónoma. Elaboración propia.

Las minas con camiones autónomos redujeron su consumo de combustible en promedio un 4.24%. Menor consumo, menor costo operativo y menor huella ambiental. La autonomía también optimiza el uso de recursos.

3.11 Caso de Aplicación de benchmarking por Ferreyros/CAT

En el marco de la evaluación de desempeño entre operaciones mineras autónomas y convencionales, Ferreyros/CAT realizó una comparación directa entre una mina equipada con camiones autónomos y otra con camiones tripulados, utilizando equipos equivalentes en ambas operaciones. A continuación, se detalla la flota utilizada en cada una:

- 04 Palas eléctricas CAT 7495
- 02 Palas hidráulicas CAT 6060
- 01 Cargador frontal Komatsu K2350
- 32 camiones de acarreo CAT 794

Esta configuración permitió establecer una base técnica homogénea para analizar el impacto de la autonomía en indicadores clave como productividad, eficiencia operativa, consumo de combustible, entre otras.

3.11.1.1 Benchmarking

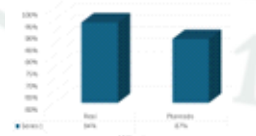
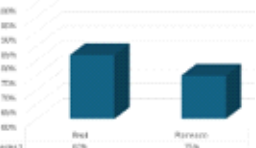
Los siguientes datos reflejan los principales hallazgos compartidos por Ferreyros/Caterpillar en relación con el desempeño de la tecnología autónoma CAT MineStar:

Tabla 9
Benchmarking de camiones autónomos vs tripulados

KPI's	TRIPULADA	AUTONOMA	IMPACTO	INTERPRETACIÓN
Utilización	87	94%	7%	+ Mayor tiempo operativo
Uso	92	96%	4%	- Demoras Operativas
Spot	50 seg	35 seg	15 seg	- Menor tiempo de estacionamiento del camión
Disponibilidad	92	95%	3%	+ Tiempo operativo
Productividad	690 tph	695 tph	0.70%	+ Productivo
Velocidad Vacio	21 kph	24 kph	3 kph	+ Productivo
Velocidad Cargado	18kph	20 kph	2 kph	+ Productivo

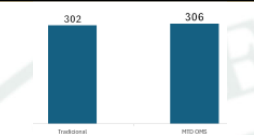
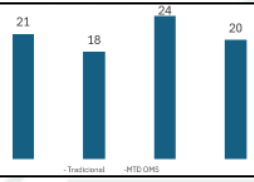
Nota. Benchmarking de camiones autónomos vs tripulados basada en una ponencia de Ferreyros.

Figura 25
Incremento en la utilización y eficiencia operativa de flotas autónomas

KPI's	Impacto - Periodo 1 año	Mejor	Valor	Definición
Utilización			7%	Porcentaje del tiempo que los equipos están operativos respecto del tiempo total disponible
Eficiencia Operativa			7%	+ Mayor tiempo de operación. - Demoras.

Nota. Incremento en la utilización y eficiencia operativa de flotas autónomas. Basada en una ponencia de Ferreyros.

Figura 26
Evidencia de mejoras en eficiencia operativa

KPI's	Impacto - Periodo 2 año	Mejor	Valor	Definición
Payload			4 Toneladas	Estrategia de acarreo que maximiza máquina, componentes y mantiene la media de todas las cargas a la carga útil nominal
Velocidad			2.5 km	Proceso de cálculo de la división entre la Distancia/Tiempo registrado en cada uno de los ciclos.
Producción	+ Tonelaje		17%	Conunto de operaciones que sirven para mejorar e incrementar la utilidad.

Nota. Evidencia de mejoras en eficiencia operativa: Payload, velocidad y productividad en flotas autónomas. Basada en una ponencia de Ferreyros.

Catterpillar nos permitió conocer más a fondo el sistema CAT MineStar, destacando cómo la autonomía ha mejorado diversos indicadores clave como la utilización, disponibilidad, tiempos de cuadrado, productividad, velocidades de acarreo (cargado y vacío) y el Payload.

También se resaltaron beneficios en seguridad, al reducir riesgos de accidentes, fatiga y errores humanos, así como en eficiencia operativa, al optimizar el consumo de combustible, extender la vida útil de componentes y facilitar la planificación del mantenimiento, lo que en conjunto contribuye a una reducción significativa de costos.

3.12 Análisis de datos Económicos

3.12.1 Beneficios

La incorporación de Autonomía en operaciones mineras representa una innovación estratégica que impacta directamente en la eficiencia y sostenibilidad del sistema. Si bien esta

tecnología ofrece múltiples beneficios: Costos de Operación, Productividad y Costos AHS, siendo como parte de los puntos relevantes en la implementación de autonomía los Costos de Operación y Costos AHS los cuales comprenden.

3.12.2 Costos de Operación

- Dotación: La implementación de equipos autónomos provoca una reducción de personal evitando así la exposición de un operador, lo cual conlleva una operatividad menor riesgosa y favorable pudiendo así operar más equipos con poco personal, reubicándose así mayor personal en equipos auxiliares que va directamente proporcional a la cantidad de camiones autónomos requeridos.
- Combustible: La operación dentro de parámetros óptimos de diseño permite reducir la variabilidad del proceso, lo que contribuye a un menor consumo de combustible. Esto se debe a que los camiones autónomos mantienen una aceleración más uniforme al seguir instrucciones operativas precisas de forma remota.
- Vida útil neumáticos: El consumo de neumáticos para estos casos se reduce en la implementación de camiones autónomos ya que estos logran una mayor vida útil generados por la alta sensibilidad y menor exigencias, como también la exigencia del mantenimiento de las vías generando así una reducción al impacto de las bandas laterales.

3.12.3 Costos AHS

Una consideración importante de esta tecnología está relacionada a los costos para su implementación, los cuales abarcan principalmente los siguientes elementos:

- Kit de autonomía para camiones.

- Licencia de autonomía.
- Infraestructura AHS.

3.12.4 Resultados Operacionales

La implementación de la autonomía ha demostrado generar mejoras en diversos indicadores operacionales, como la disponibilidad mecánica, la utilización de equipos, el consumo de combustible y la vida útil de neumáticos reflejándose en el incremento de producción los cuales impactan las toneladas movidas. Se reconoce que estas mejoras son fundamentales para explicar los beneficios económicos observados posteriormente.

A continuación, se presentan los cuadros generales que resumen estos resultados. Su propósito es contextualizar el análisis económico, mostrando que la autonomía no solo implica una transformación tecnológica, sino también una mejora en la eficiencia operativa.

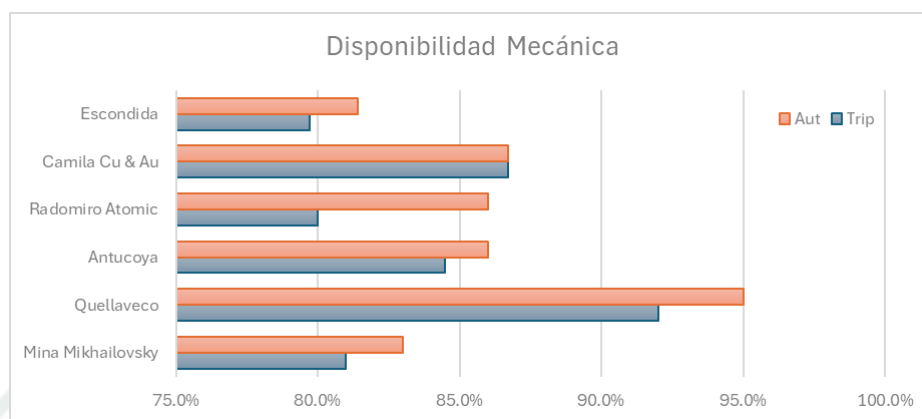
3.12.5 Disponibilidad Mecánica

Figura 27
Disponibilidad mecánica

Disponibilidad Mecánica					
	Minas	Trip	Aut	Dif	
Rusia	Mina Mikhailovsky	81.0%	83.0%	▲	2.0%
Perú	Quellaveco	92.0%	95.0%	▲	3.0%
Chile	Antucoya	84.5%	86.0%	▲	1.5%
	Radomiro Atomic	80.0%	86.0%	▲	6.0%
	Camila Cu & Au	86.7%	86.7%	▼	0.0%
	Escondida	79.7%	81.4%	▲	1.7%

Nota. Incremento de disponibilidad mecánica. Elaboración propia.

Figura 28
Disponibilidad mecánica



Nota. Comparativa de disponibilidad mecánica. Elaboración propia.

Según el cuadro estadístico 5 muestra que la unidad que tuvo mayor impacto con respecto a la implementación en autonomía es la mina Quellaveco.

3.12.6 Utilización de Equipos

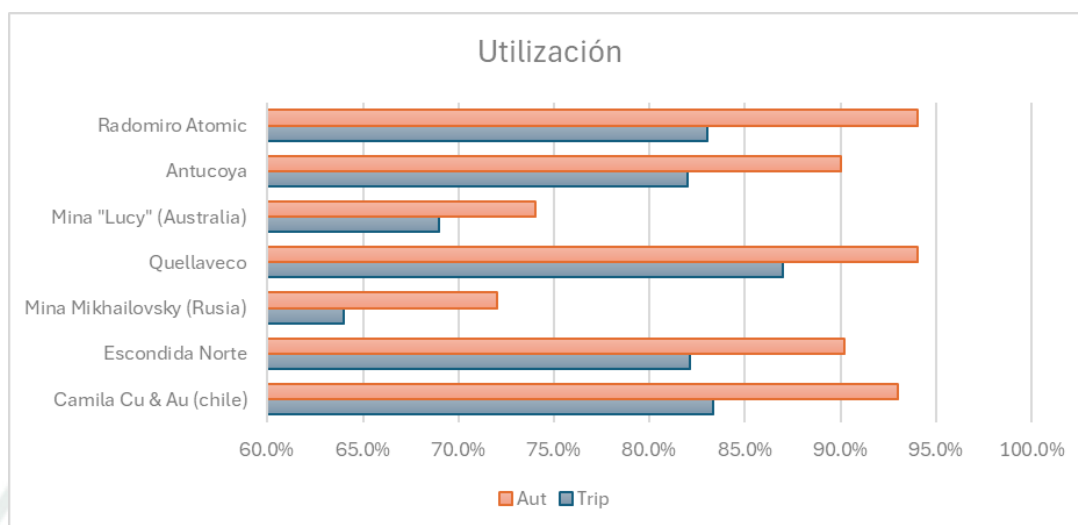
Figura 29
Utilización de equipos

Utilización				
Minas	Trip	Aut	Dif	
Camila Cu & Au (chile)	83.3%	93.0%	▲	9.7%
Escondida Norte	82.1%	90.2%	▲	8.1%
Mina Mikhailovsky (Rusia)	64.0%	72.0%	▲	8.0%
Quellaveco	87.0%	94.0%	▲	7.0%
Mina "Lucy" (Australia)	69.0%	74.0%	▲	5.0%
Antucoya	82.0%	90.0%	▲	8.0%
Radomiro Atomic	83.0%	94.0%	▲	11.0%

Nota. Incremento de Utilización. Elaboración propia.

En la figura 29 se muestra el incremento que hubo por la implementación de autonomía de cada unidad minera siendo esta representativa del 10.32% promedio.

Figura 30
Utilización de equipos



Nota. Comparativa de disponibilidad mecánica. Elaboración propia.

3.12.7 Vida útil de neumáticos

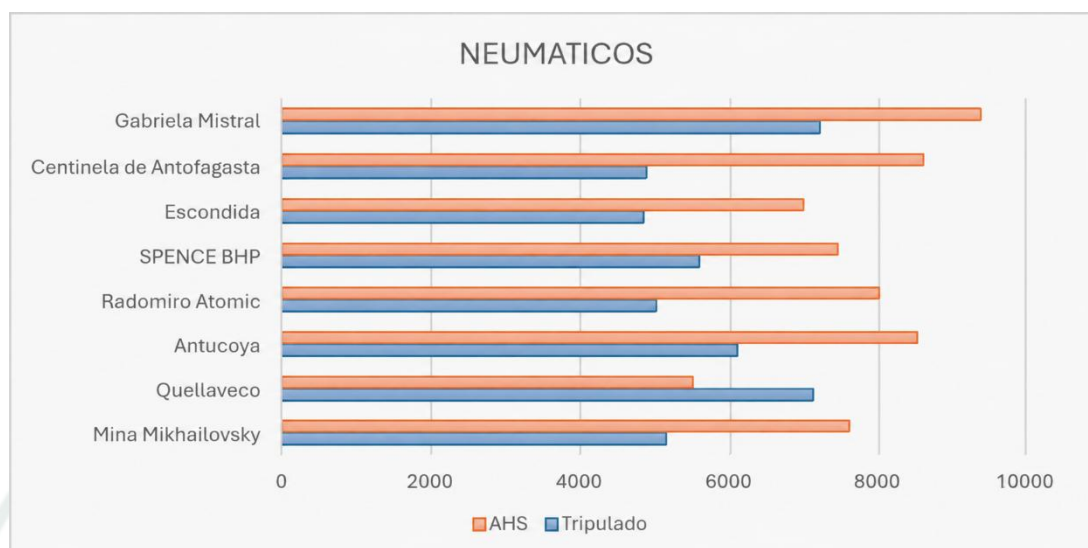
Figura 31
Vida útil de neumáticos

		Neumáticos				
		Minas	Tripulado	AHS	Dif	
Rusia		Mina Mikhailovsky	5000	7500	▲	2500 50%
Perú		Quellaveco	7000	5500	▼	-1500 -21%
Chile		Antucoya	6045	8500	▲	2455 41%
		Radomiro Atomic	4800	8000	▲	3200 67%
		SPENCE BHP	5400	7128	▲	1728 32%
		Escondida	4600	6900	▲	2300 50%
		Centinela de Antofagasta	4500	8500	▲	4000 89%
		Gabriela Mistral	7000	9500	▲	2500 36%

Nota. Comparación de la vida útil de neumáticos entre operaciones con camiones tripulados y autónomos (AHS) en distintas minas de Rusia, Perú y Chile. Elaboración propia.

La figura 30 muestra las horas de vida útil de neumáticos utilizados en distintas minas de Rusia, Perú y Chile, comparando operaciones con camiones tripulados versus autónomos (AHS). Las flechas indican si el consumo aumentó o disminuyó con la implementación de AHS.

Figura 32
Consumo de neumáticos



Nota. Representación gráfica del consumo de neumáticos por tipo de operación en distintas minas. Elaboración propia.

3.12.8 Consumo de combustible

Figura 33
Consumo de combustible

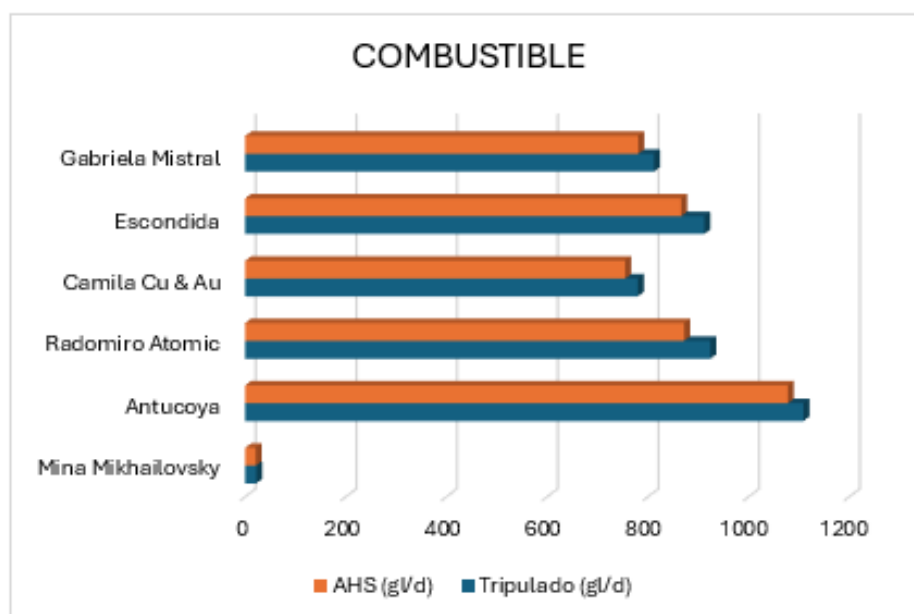
Combustible						
	Minas	Modelo	Tripulado (g/l/d)	AHS (g/l/d)	Dif	
Rusia	Mina Mikhailovsky	BELAZ (130 t)	22	21	▲	5%
	Antucoya	930 E4 (295 t)	1109	1078	▲	3%
Chile	Radomiro Atomic	930 E4 (295 t)	924	872	▲	6%
	Camila Cu & Au	930 E AT (295 t)	780	755	▲	3%
	Escondida	Komatsu 960E (321 t)	912	866	▲	5%
		Caterpillar CAT 797 (343 t)				
	Gabriela Mistral	930 E4 (295 t)	812	781	▲	4%

Nota. Comparación del consumo de combustible entre operaciones con camiones tripulados y autónomos (AHS) en distintas minas de Rusia y Chile. Elaboración propia.

La figura 32 muestra el consumo de combustible utilizado en distintas minas de Rusia y Chile, comparando operaciones con camiones tripulados versus autónomos (AHS). Las flechas indican si el consumo aumentó o disminuyó con la implementación de AHS.

Figura 34

Representación gráfica del consumo de combustible



Nota. Representación gráfica del consumo de combustible por tipo de operación en distintas minas.

3.12.9 Producción (Toneladas Movidas)

Figura 35

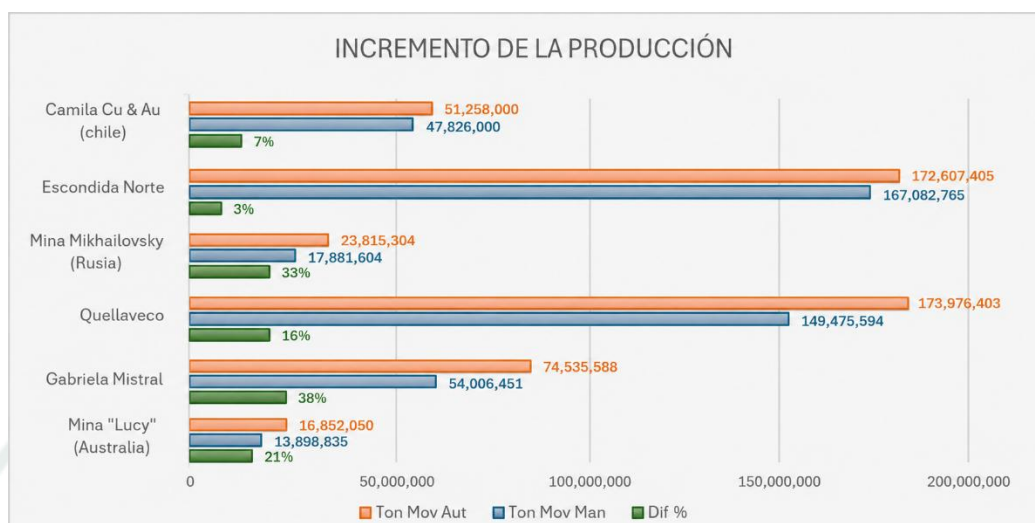
Comparación de producción: camiones tripulados vs. autónomos

Producción	Parámetros	Camila Cu & Au (chile)	Escondida Norte	Mina Mikhailovsky (Rusia)	Quellaveco	Gabriela Mistral	Mina "Lucy" (Australia)
	Ton Mov Trip	47,826,000	167,082,765	17,881,604	149,475,594	54,006,451	13,898,835
	Ton Mov Aut	51,258,000	172,607,405	23,815,304	173,976,403	74,535,588	16,852,050
	Dif (tn)	▲ 3,432,000	▲ 5,524,640	▲ 5,933,700	▲ 24,500,809	▲ 20,529,137	▲ 2,953,215
	Dif %	▲ 7%	▲ 3%	▲ 33%	▲ 16%	▲ 38%	▲ 21%

Nota. Comparación de producción entre operaciones con camiones tripulados y autónomos (AHS) en distintas minas. Elaboración propia.

Según la figura 33 se presenta el incremento de producción por cada operación entre la implementación de camiones tripulados a autónomos (AHS) teniendo un incremento promedio del 13.97% y mostrándose así el incremento de cada unidad operativa por año.

Figura 36
Incremento de producción



Nota. Representación gráfica del incremento de producción por tipo de operación en distintas minas. Elaboración propia.

Según el cuadro estadístico 8 la unidad con mayor impacto en la implementación autónoma representa a Gabriela Mistral dado que esto se debe también a varios factores el cuales impactan como tecnologías que van en conjunto con estas.

3.12.10 Resumen Operacional Global

Figura 37
Comparación de indicadores de camiones tripulados y autónomos

Indicador	Promedio Tripulado	Promedio Autónomo	Diferencia Absoluta	Mejora Relativa (%)
Disponibilidad Mecánica (%)	83.98%	86.35%	▲ 2.37%	↑ 2.82%
Utilización de Equipos (%)	78.63%	86.74%	▲ 8.11%	↑ 10.32%
Consumo de Combustible (gl/día)	759.8	728.8	▲ 31	↑ 4.08%
Vida Útil de Neumáticos (hrs)	5543.125	7691	▲ 2147.875	↑ 38.75%
Producción (Toneladas Movidas)	75,028,542	85,507,458	▲ 10,478,917	↑ 13.97%

Nota. Resumen de indicadores entre operaciones con camiones tripulados y autónomos (AHS) en distintas minas. Elaboración propia.

Estos resultados evidencian que la operación autónoma no solo mejora la disponibilidad y utilización de equipos, sino que también reduce el consumo de combustible, extiende la vida útil de los neumáticos y aumenta la producción total. Estos beneficios operacionales son clave para justificar la inversión en autonomía y deben ser considerados en la evaluación económica y estratégica del proyecto.

3.12.11 Evaluación Económica por mina (VAC)

La presente sección analiza el impacto económico de la implementación de volquetes autónomos en seis minas a tajo abierto, mediante la comparación del Valor Actual de Costos (VAC) entre dos escenarios: operación convencional (camiones tripulados) y operación autónoma (camiones AHS).

El análisis económico considera un enfoque de evaluación financiera tradicional, en el que se integran:

- Costos operativos (OPEX): mano de obra, mantenimiento, consumo de combustible y neumáticos, etc.
- Costos de capital (CAPEX): inversión en sistemas autónomos, infraestructura tecnológica y centros de control.
- Costos asociados a la operación autónoma (OPEX AHS): costos recurrentes por soporte técnico, licencias, actualizaciones y monitoreo remoto.

Para cada mina se elaboró una gráfica de cascada que refleja el impacto acumulado de cada componente en el VAC total, permitiendo identificar las áreas donde la autonomía genera mayores beneficios o incrementos de costo. Estas gráficas fueron construidas a partir de la información contenida en estudios técnicos y tesis de casos reales.

En las siguientes secciones se detalla la evaluación económica individual de cada mina, considerando sus particularidades y el comportamiento específico de cada componente dentro del sistema autónomo.

3.13 Evaluación técnica de camiones autónomos en unidades mineras

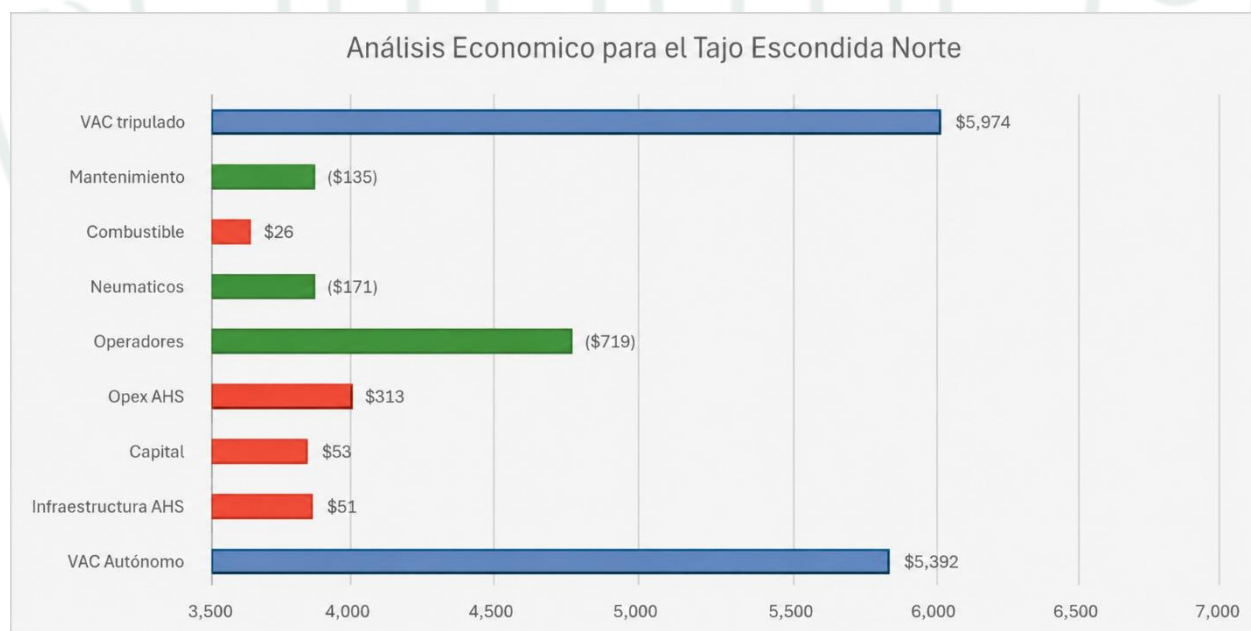
3.14 Escondida Norte – Localización Chile

Se llevó a cabo un análisis del Valor Actual de Costos (VAC) para el Tajo Escondida Norte, con el objetivo de comparar el desempeño económico entre el sistema de acarreo convencional (camiones tripulados) y el sistema autónomo (AHS).

La evaluación considera un horizonte de análisis de 5 años, aplicando los flujos de costos operativos y de capital asociados a cada escenario. La figura adjunta presenta el resultado mediante una gráfica de cascada que permite visualizar el impacto incremental por componente.

Figura 38

Análisis económico para el tajo Escondida Norte



Nota. Análisis económico de la operación Escondida Norte (VAC).

3.14.1 Resultados del análisis Tajo Escondida Norte

En el escenario base (tripulado), el VAC asciende a US\$ 5,974 millones.

En el escenario autónomo, el VAC se reduce a US\$ 5,392 millones, generando un ahorro acumulado de US\$ 582 millones, equivalente a una mejora del 9.7% respecto al sistema convencional.

3.14.2 Principales impactos identificados Tajo Escondida Norte

- Reducción de costos por personal operativo: ahorro de US\$ 719 millones, debido a la eliminación de turnos y optimización del despacho.
- Disminución en el desgaste de neumáticos y componentes: ahorro conjunto de US\$ 171 millones, atribuido a la conducción controlada y operación estable del sistema autónomo.
- Menores costos de mantenimiento correctivo y preventivo: ahorro de US\$ 135 millones.

Por otro lado, se identifican incrementos de costo atribuibles a la adopción tecnológica:

- Costos operativos asociados al AHS (soporte, software, monitoreo): US\$ 313 millones.
- CAPEX asociado a equipos y tecnología autónoma: US\$ 53 millones.
- Inversión en infraestructura de soporte (torres, redes, centro de control): US\$ 51 millones.
- Incremento marginal en consumo de combustible: US\$ 26 millones.

3.14.3 Conclusión Tajo Escondida Norte

La implementación de autonomía en el Tajo Escondida Norte representa una solución económicamente viable, con una reducción sostenida en costos operativos que supera los incrementos asociados a la inversión inicial y operación del sistema AHS. El principal factor de beneficio es la optimización del recurso humano, complementado por la mejora en desgaste y mantenimiento.

Este resultado valida la autonomía como una estrategia económicamente favorable para operaciones de mediana a gran escala con condiciones operativas estables y alta repetitividad en los ciclos de acarreo.

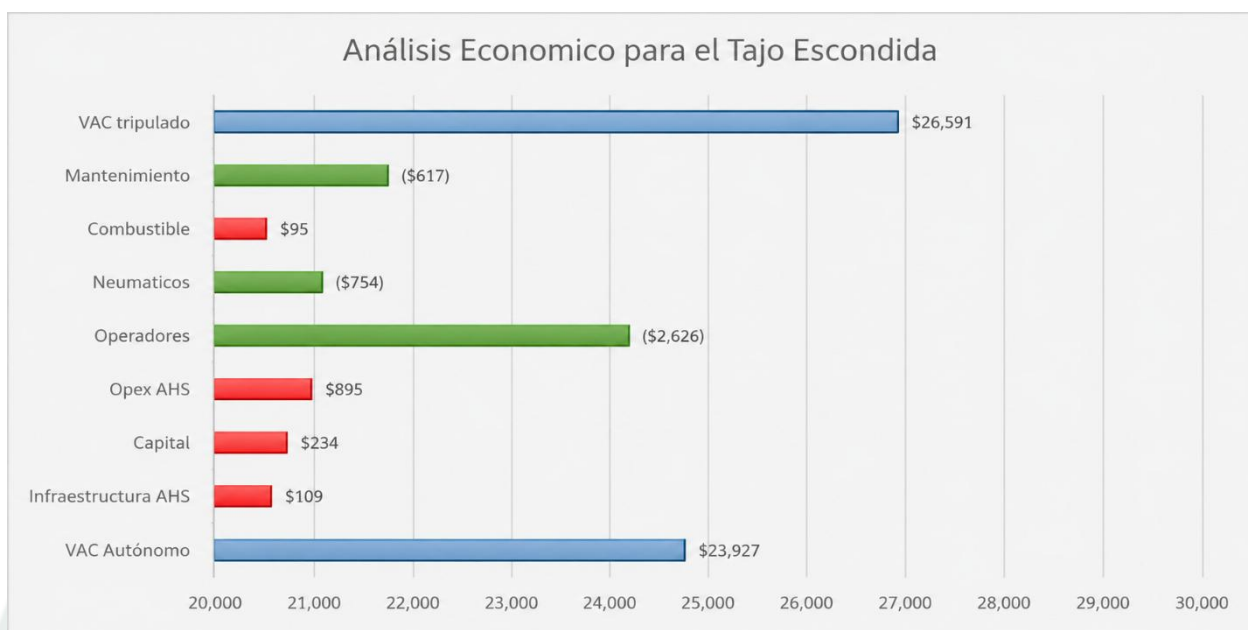
3.15 Escondida

En el Tajo Escondida, se desarrolló un análisis detallado del Valor Actual de Costos (VAC) para comparar el sistema de acarreo convencional (camiones tripulados) frente al sistema de acarreo autónomo (AHS). El objetivo es identificar los impactos económicos directos de la autonomía en los principales componentes operativos y de capital de la operación.

La gráfica de cascada adjunta resume el comportamiento económico entre ambos escenarios analizado en un horizonte de 5 años, permitiendo visualizar los principales factores de ahorro y los sobrecostos vinculados a la implementación del sistema autónomo.

Figura 39

Análisis económico para el Tajo Escondida



Nota. Análisis económico de la operación Escondida (VAC).

3.15.1 Resultados del análisis Tajo Escondida

El VAC del sistema convencional (tripulado) asciende a US\$ 26,591 millones.

El VAC del sistema autónomo se reduce a US\$ 23,927 millones, generando un ahorro acumulado de US\$ 2,664 millones, lo que representa una mejora del 10%.

3.15.2 Principales impactos económicos identificados Tajo Escondida

- Reducción en costos de personal operativo: Ahorro de US\$ 2,626 millones, representando el mayor impacto económico positivo. Se debe a la eliminación de turnos de operadores y menor rotación de personal.
- Ahorro en neumáticos: US\$ 754 millones, debido a la conducción más controlada y reducción de agresividad en pendientes y curvas.
- Reducción en costos de mantenimiento: US\$ 617 millones, como resultado de menor exigencia mecánica y fallas asociadas al factor humano.

En contrapartida, se registran sobrecostos asociados a la autonomía:

- Opex del sistema AHS: US\$ 895 millones, correspondiente a servicios de monitoreo, soporte técnico, licencias y operación remota.
- Inversión de capital (CAPEX): US\$ 234 millones en adaptación tecnológica de equipos.
- Infraestructura tecnológica: US\$ 109 millones, asociados a redes, comunicaciones y centros de control.
- Aumento marginal en combustible: US\$ 95 millones, posiblemente vinculado a rutas más conservadoras del algoritmo de navegación.

3.15.3 Conclusión Tajo Escondida

La evaluación demuestra que la autonomía en el Tajo Escondida genera un beneficio económico sustancial, con una reducción significativa del VAC impulsada principalmente por la optimización del recurso humano y mejoras en mantenimiento y desgaste de componentes.

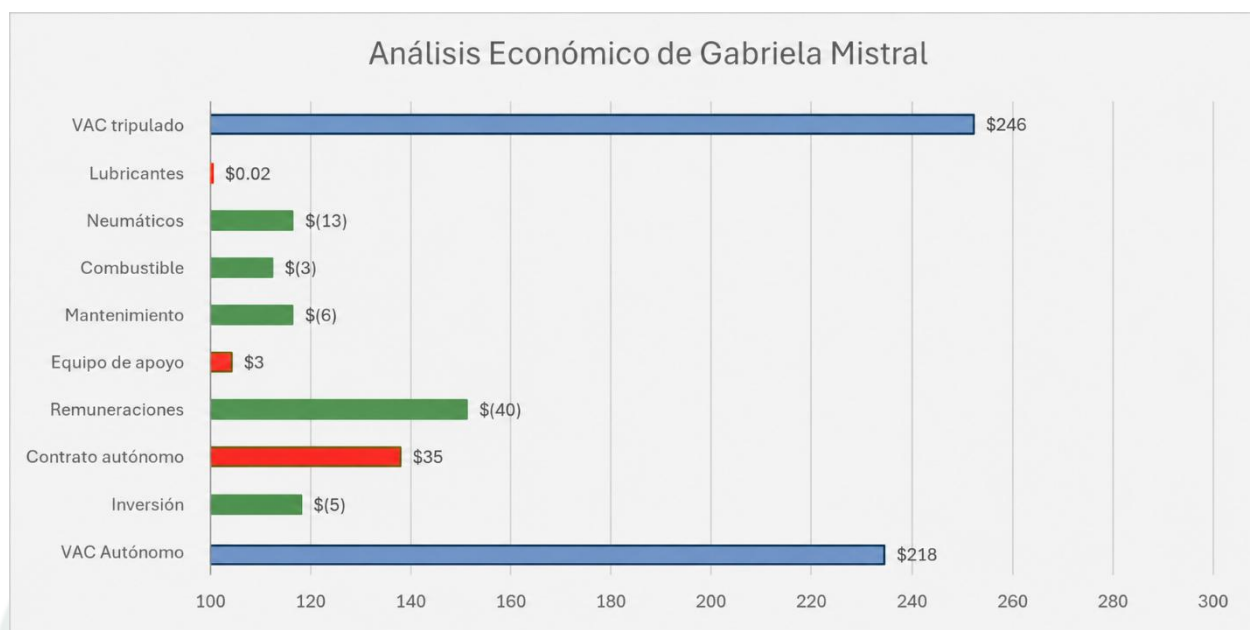
El balance global indica que la inversión en tecnología autónoma es financieramente justificada, con un retorno económico claro en el horizonte evaluado. El Tajo Escondida presenta condiciones altamente favorables para la implementación de autonomía a gran escala.

3.16 Gabriela Mistral – Localización Chile

En la mina Gabriela Mistral, se realizó un análisis detallado del Valor Actual de Costos (VAC) para comparar el sistema de acarreo convencional (camiones tripulados) frente al sistema de acarreo autónomo (AHS). El objetivo fue identificar los impactos económicos directos de la autonomía en los principales componentes operativos y de capital de la operación.

Figura 40

Análisis económico de Gabriela Mistral



Nota. Análisis económico de la operación Gabriela Mistral (VAC).

3.16.1 Resultados del análisis Gabriela Mistral

El VAC del sistema convencional (tripulado) asciende a US\$ 246 millones.

El VAC del sistema autónomo se reduce a US\$ 218 millones, generando un ahorro acumulado de US\$ 28 millones, lo que representa una mejora del 11.4%.

3.16.2 Principales impactos económicos identificados Gabriela Mistral

Según el VAC de Gabriela Mistral se registró ahorros en:

- Reducción en remuneraciones: Ahorro de US\$ 40 millones, el mayor impacto positivo, asociado a la disminución de personal operativo.
- Ahorro en neumáticos: US\$ 13 millones, debido a una conducción más eficiente y menor desgaste.
- Reducción en mantenimiento: US\$ 6 millones, por menor exigencia mecánica y reducción de fallas humanas.

- Ahorro en combustible: US\$ 3 millones, posiblemente por una operación más controlada.
- Reducción en inversión: US\$ 5 millones, en comparación con el sistema convencional.

Por otro lado, se presentaron Sobre costos asociados a la autonomía.

- Contrato autónomo: US\$ 35 millones, correspondiente a servicios de operación remota, soporte y licencias.
- Equipo de apoyo: US\$ 3 millones, por requerimientos adicionales de soporte en terreno.
- Lubricantes: US\$ 0.02 millones, un impacto marginal.

3.16.3 Conclusión Gabriela Mistral

La evaluación económica en Gabriela Mistral demuestra que la implementación del sistema autónomo genera un beneficio económico neto, con una reducción del VAC impulsada principalmente por la optimización de recursos humanos y menores costos operativos.

Aunque existen sobrecostos asociados a la autonomía, estos son compensados por los ahorros estructurales, lo que justifica la inversión en tecnología autónoma. Gabriela Mistral presenta condiciones adecuadas para avanzar hacia una operación más eficiente y tecnológicamente avanzada.

3.17 Radomiro Tomic – Localización Chile

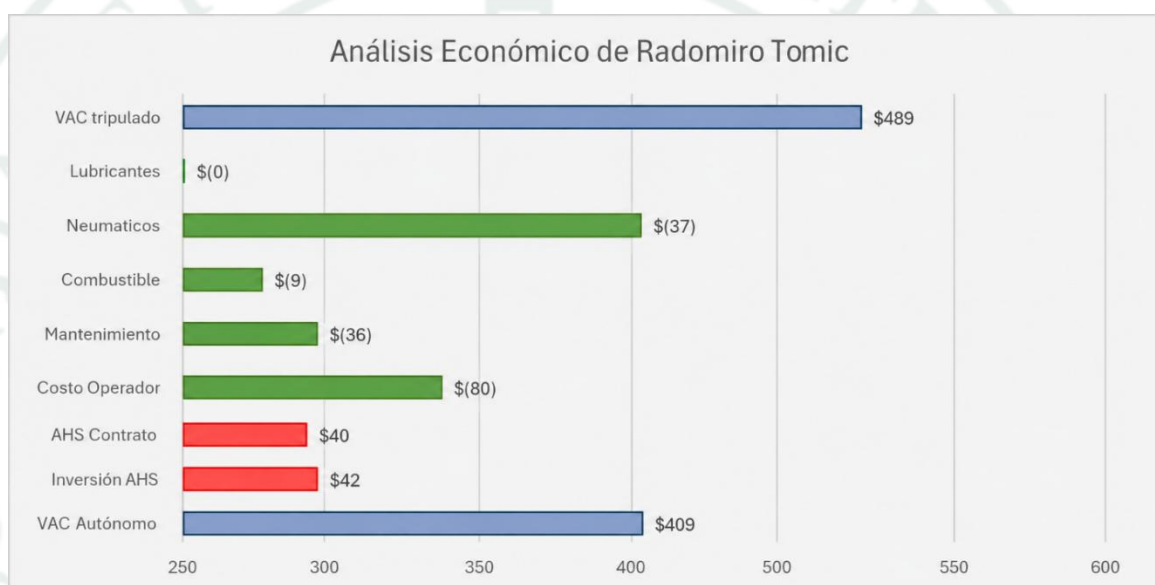
Con base en información obtenida de estudios previos, se presenta un análisis comparativo del Valor Actual de Costos (VAC) entre el sistema de acarreo convencional (camiones tripulados) y el sistema autónomo (AHS) en la operación minera Radomiro Tomic.

Este análisis tiene carácter referencial y busca destacar los principales impactos económicos identificados en la literatura técnica.

La información se resume mediante una gráfica de cascada analizado en un horizonte de 8 años que permite visualizar los factores que contribuyen a la variación del VAC entre ambos escenarios.

Figura 41

Análisis económico de Radomiro Tomic



Nota. Análisis económico de la operación Radomiro Tomic (VAC).

3.17.1 Resumen de resultados Radomiro Tomic

- VAC sistema tripulado: USD 489 millones.
- VAC sistema autónomo: USD 409 millones.
- Ahorro neto estimado: USD 80 millones, equivalente a una mejora del 16.4% respecto al escenario base.

3.17.2 Principales impactos económicos identificados Radomiro Tomic

Reducciones de costo:

- Costo de operador: ahorro de USD 80 millones.
- Mantenimiento: ahorro de USD 36 millones.
- Neumáticos: ahorro de USD 37 millones.
- Combustible: ahorro de USD 9 millones.
- Otros costos operativos: Lubricantes.

Incrementos de costo

- Contrato AHS: incremento de USD 40 millones
- Inversión en tecnología AHS: incremento de USD 42 millones

3.17.3 Conclusión Radomiro Tomic

La evaluación demuestra que la autonomía en la mina Radomiro Tomic genera un beneficio económico sustancial, con una reducción significativa del VAC impulsada principalmente por la mano de obra en operadores, Mantenimiento, Neumáticos y Combustible.

El balance global indica que la inversión en tecnología autónoma es financieramente justificada, con un retorno económico claro en el horizonte evaluado. La Mina Radomiro Tomic presenta condiciones altamente favorables para la implementación de autonomía a gran escala.

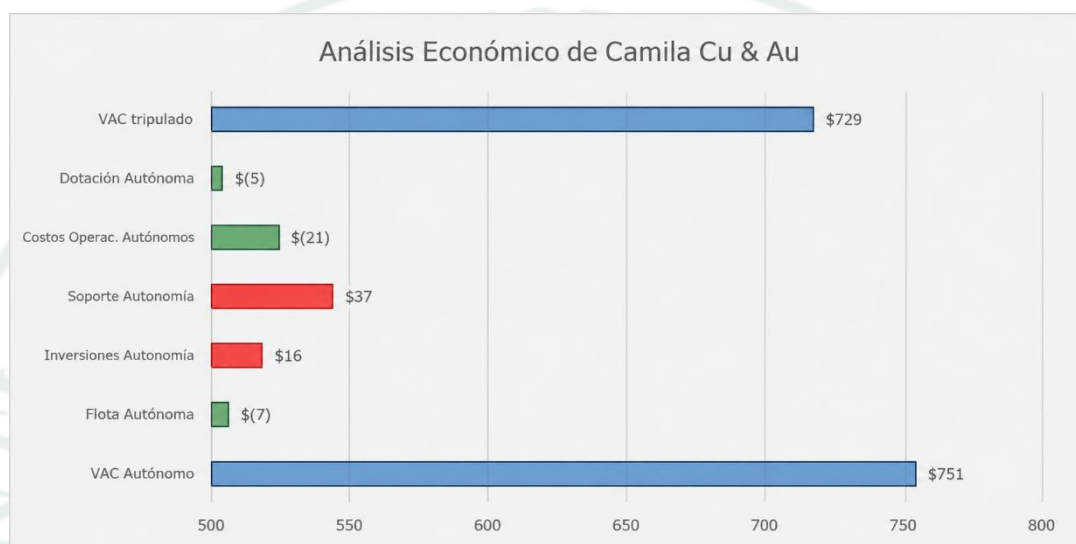
3.18 Camila Cu & Au – Localización Chile

Se presenta un análisis económico referencial con base a información de estudios previos, el cual compara el Valor Actual de Costos (VAC) entre un sistema de acarreo convencional (camiones tripulados) y un sistema autónomo (AHS) en una operación minera chilena con producción de cobre y oro. El objetivo es identificar los principales impactos económicos asociados a la implementación de autonomía en los componentes operativos y de capital.

La información se resume mediante una gráfica de cascada analizado en un horizonte de 13 años que permite visualizar los factores que contribuyen al aumento o disminución del VAC en ambos escenarios.

Figura 42

Análisis económico de Camila Cu & Au



Nota. Análisis económico de una mina de Cu & Au de Chile (VAC).

3.18.1 Resultados del Análisis Camila Cu & Au

- En el escenario base (tripulado), el VAC asciende a US\$ 729 millones.
- En el escenario autónomo, el VAC aumenta a US\$ 751 millones, generando un aumento acumulado de US\$ 22 millones, equivalente a un sobre costo del 3% respecto al sistema Autónomo.

3.18.2 Principales Componentes Económicos Camila Cu & Au

Reducciones de costo

- Costos operativos autónomos: ahorro de USD 21 millones.
- Reducción de dotación: ahorro de USD 5 millones.
- Optimización de flota: ahorro de USD 7 millones.

Incrementos de costo

- Soporte a la autonomía: incremento de USD 37 millones, asociado a servicios de monitoreo, soporte técnico y licencias.
- Inversiones en autonomía: incremento de USD 16 millones, correspondiente a la adaptación tecnológica de equipos y sistemas.

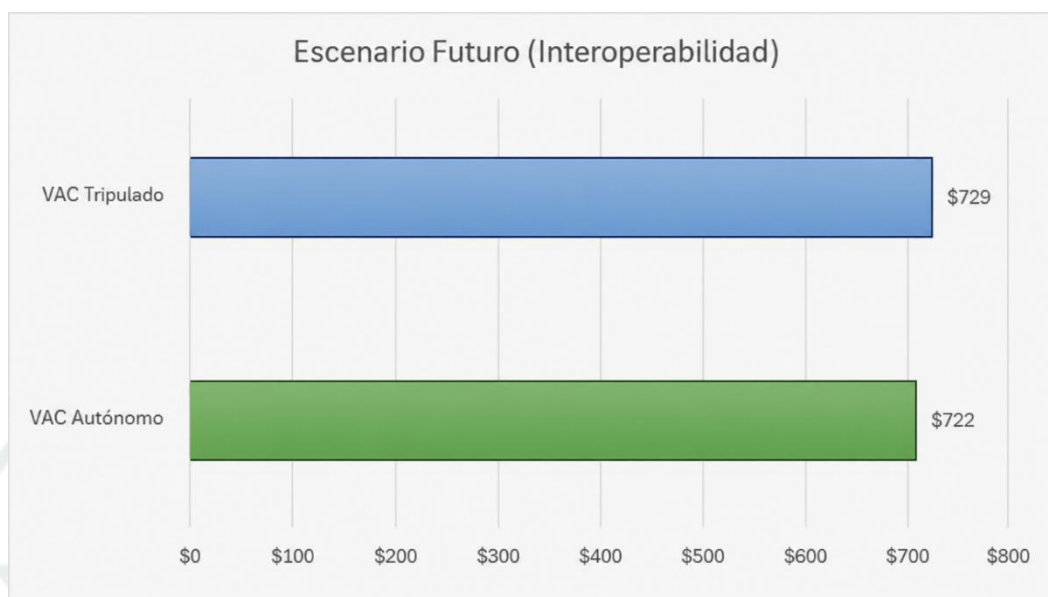
3.18.3 Conclusión Camila Cu & Au

El análisis económico indica que, bajo las condiciones evaluadas en el estudio, la implementación del sistema autónomo en esta operación minera genera un aumento neto del VAC, lo que implica un mayor costo total respecto al sistema tripulado.

A pesar de los beneficios operativos observados, como la reducción de flota, menor dotación y ahorro en combustible y mantenimiento, estos no logran compensar los altos costos de implementación y soporte asociados a la autonomía. Esto se debe, en gran parte, a que la tecnología aún no está masificada y existen pocas empresas proveedoras, lo que eleva significativamente los costos de entrada.

Sin embargo, se plantea un escenario futuro con interoperabilidad tecnológica y mayor competencia de mercado, en el cual se considera una reducción del 30% en los costos adicionales asociados a la autonomía. Bajo este supuesto, se proyecta una disminución de USD 7 millones en el VAC respecto al sistema tripulado, lo que posicionaría a la autonomía como una alternativa económicamente favorable.

Figura 43
Escenario Futuro (Interoperabilidad)



Nota. Comparativa entre VAC tripulado y VAC autónomo en un escenario de Interoperabilidad.

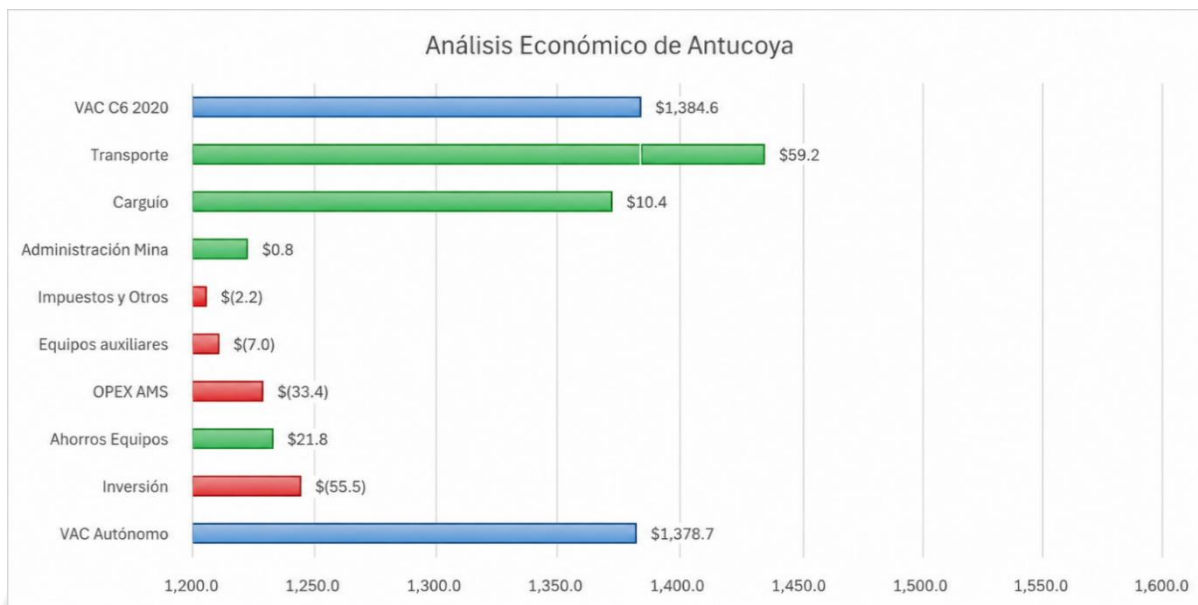
3.19 Antucoya – Localización Chile

Se llevó a cabo un análisis del Valor Actual de Costos (VAC) de la minera Antucoya, con el objetivo de comparar el desempeño económico entre el sistema de acarreo convencional (camiones tripulados) y el sistema autónomo (AHS).

La evaluación considera un horizonte de análisis de 15 años, aplicando los flujos de costos operativos y de capital asociados a cada escenario. La figura adjunta presenta el resultado mediante una gráfica de cascada que permite visualizar el impacto incremental por componente.

Figura 44

Análisis económico de Antucoya



Nota. Análisis económico de la operación Antucoya (VAC).

3.19.1 Resultados del análisis Antucoya

- En el escenario base (tripulado), el VAC asciende a US\$ 1384.6 millones.
- En el escenario autónomo, el VAC se reduce a US\$ 1378.7 millones, generando un ahorro acumulado de US\$ 5.9 millones, equivalente a una mejora del 0.42% respecto al sistema convencional.

3.19.2 Principales impactos identificados Antucoya

- Reducción de costos de transporte: ahorro de US\$ 59,2 millones, gracias a una menor flota y mayor eficiencia del sistema autónomo.
- Reducción de costos en administración mina: ahorro de US\$ 0.8 millones por gestionar mejor los recursos.
- Ahorros en equipos optimización de flota: ahorro de US\$ 21,8 millones por menor requerimiento de equipos.

- Disminución de costos en Carguío: ahorro de US\$ 10.4 millones, atribuible a la mejora de la eficiencia de las palas.

Por otro lado, se identifican incrementos de costo atribuibles a la adopción tecnológica:

- Costos operativos asociados al AHS (soporte, software, monitoreo): US\$ 33.4 millones.
- CAPEX asociado a autónoma: US\$ 55.5 millones.
- Incremento equipos auxiliares por autonomía: US\$ 7 millones.
- Impuestos y otros: US\$ 2.2 millones.

3.19.3 Conclusión Antucoya

La evaluación económica de minera Antucoya demuestra que la implementación del sistema autónomo genera un beneficio económico neto, con una reducción del VAC en base al análisis de sensibilidad realizado por Antofagasta Minerals con el modelo Financiero de AMSA que incorpora el efecto de impuestos, a diferencia del modelo VAC concluyéndose que el escenario AHS más favorable es el de Komatsu que podría generar valor económico si se reduce sutilmente los costos de capital y operación.



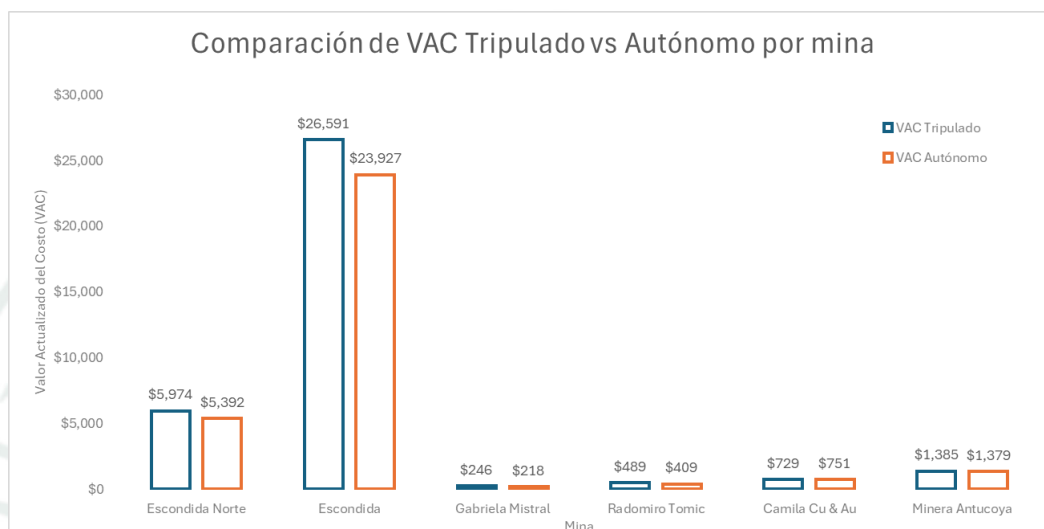
CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Comparación global VAC tripulado vs autónomo

Figura 45

Comparación de VAC tripulado vs autónomo por mina

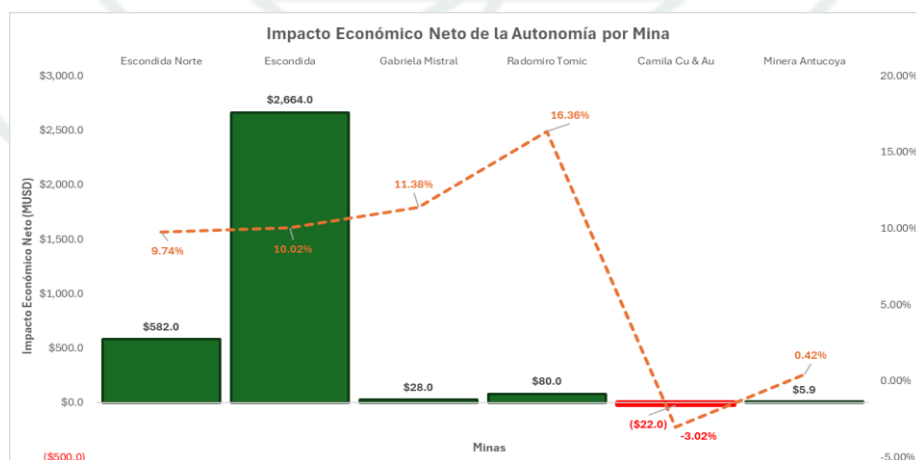


Nota. Comparación de VAC Tripulado vs VAC Autónomo. Elaboración propia.

Según la gráfica siguiente se presenta una comparativa entre el VAC tripulado y el VAC autónomo representando así el impacto significativo que tiene la implementación de autonomía en el horizonte evaluado de cada uno.

Figura 46

Impacto económico neto de la autonomía por mina



Nota. Incremento neto por implementación de autonomía de cada Operación.

Elaboración propia.

En el cuadro estadístico 17 se presenta el incremento neto de cada unidad que implementó autonomía resultando así un valor positivo con respecto a la unidad minera denotándose así que la unidad con mayor representatividad es Escondida y Escondida Norte.

4.1.1 Tabla Resumen de VAC por Mina

Tabla 10
Resumen de VAC por Mina

	Numero de camiones	CAPEX (MUSD)
División Radomiro Tomic (DRT)	5	16
Proyecto AHS en minera Antucoya	16	60.4 Komatsu 63.71 CAT
Rusia	3	14.98
Camila	20	208
Escondida	119	2917

Nota. Representación de la inversión de capital (CAPEX) de distintas minas.

Elaboración propia.

En la tabla 11 muestra la relación entre el número de camiones y la inversión de capital (CAPEX) en millones de dólares (MUSD) para distintas operaciones mineras en Chile y Rusia.

Figura 47
Relación entre el número de camiones y la inversión de capital (CAPEX)

Mina	VAC Tripulado	VAC Autónomo	Impacto Neto	%	Disminuciones (Ahorros)	Aumentos (Costos)
Escondida Norte	\$5,974	\$5,392	▲ \$582.0	▲ 9.74%	Mantenimiento, Neumáticos, Operadores	Combustible, Opex AHS, Capital, Infraestructura AHS
Escondida	\$26,591	\$23,927	▲ \$2,664.0	▲ 10.02%	Mantenimiento, Neumáticos, Operadores	Combustible, Opex AHS, Capital, Infraestructura AHS
Gabriela Mistral	\$246	\$218	▲ \$28.0	▲ 11.38%	Neumáticos, Combustible, Mantenimiento, Remuneraciones, Inversión	Lubricantes, Equipo de apoyo, Contrato autónomo
Radomiro Tomic	\$489	\$409	▲ \$80.0	▲ 16.36%	Neumáticos, Combustible, Mantenimiento, Costo Operador	AHS Contrato, Inversión AHS
Camila Cu & Au	\$729	\$751	▼ (\$22.0)	▼ -3.02%	Dotación Autónoma, Costos Operac. Autónomos, Flota Autónoma	Soporte Autonomía, Inversiones Autonomía
Minera Antucoya	\$1,385	\$1,379	▲ \$5.9	▲ 0.42%	Transporte, Carguío, Ingeniería y Administración, Ahorro Equipos	CAPEX, OPEX, Equipos Auxiliares, Impuestos y Otros
Camila Cu & Au (interoperabilidad) 30%	\$729	\$722	▲ \$7.0	▲ 0.96%	Dotación Autónoma, Costos Operac. Autónomos, Flota Autónoma	Soporte Autonomía, Inversiones Autonomía

Nota. Resumen del VAC entre operaciones con camiones tripulados y autónomos (AHS) en distintas minas. Elaboración propia.

La figura 35 muestra la relación entre el número de camiones y la inversión de capital (CAPEX) en millones de dólares (MUSD) para distintas operaciones mineras en Chile y Rusia.



CONCLUSIONES

- A partir del análisis documental y comparativo efectuado, se concluye que los camiones autónomos de acarreo presentan un desempeño técnico-operativo favorable y una viabilidad económica condicionada por las características de cada operación. Los resultados obtenidos constituyen evidencia referencial para operaciones mineras del sur del Perú, pero no permiten confirmar su viabilidad en una mina específica sin realizar previamente un diagnóstico de infraestructura, conectividad, mantenimiento, organización y costos reales.
- La comparación técnico-operativa mostró que la disponibilidad mecánica promedio aumentó de 83,98 % a 86,35 %, equivalente a 2,37 puntos porcentuales; mientras que la utilización aumentó de 78,63 % a 86,74 %, correspondiente a 8,11 puntos porcentuales. Asimismo, el resumen global mostró una reducción relativa de 4,08 % en el consumo de combustible, un incremento de 38,75 % en la vida útil de los neumáticos y un aumento agregado de 13,97 % en las toneladas movidas. Estos resultados evidencian un mejor desempeño operativo de los camiones autónomos en los casos documentados analizados.
- El marco metodológico desarrollado integró seis dimensiones: tecnología y conectividad, operación e infraestructura, seguridad, mantenimiento, organización y viabilidad económica. Su validación documental permitió identificar como condiciones críticas la cobertura de comunicaciones, el adecuado diseño de las vías de acarreo, la existencia de soporte especializado, la capacitación del personal y la disponibilidad de un análisis económico específico. Sin embargo, la ausencia de información primaria de una mina del

sur del Perú impidió asignar un nivel definitivo de preparación, por lo que su aplicación final requiere un diagnóstico directo de la operación seleccionada.

- El análisis económico mostró que cinco de los seis casos evaluados redujeron el Valor Actual de Costos mediante la implementación de autonomía. Las reducciones variaron desde 0,42 % en Antucoya hasta 16,4 % en Radomiro Tomic; también se identificaron disminuciones de 9,7 % en Escondida Norte, 10 % en Escondida y 11,4 % en Gabriela Mistral. En contraste, el caso Camila Cu-Au presentó un incremento de 3 % en el VAC debido a los costos de soporte e implementación. Por tanto, la autonomía no garantiza rentabilidad en todos los escenarios, ya que su conveniencia depende de la escala de la flota, el horizonte de evaluación, los costos AHS y la interoperabilidad tecnológica.

RECOMENDACIONES

- Antes de implementar flotas autónomas, se recomienda realizar un diagnóstico integral de preparación tecnológica, operativa y organizacional que permita identificar brechas en infraestructura digital, sistemas de comunicación, diseño de vías, mantenimiento y capacitación del personal.
- Se recomienda desarrollar la incorporación de autonomía de manera progresiva mediante proyectos piloto, permitiendo validar indicadores de productividad, seguridad, disponibilidad y costos antes de una implementación a gran escala.
- Se recomienda fortalecer los programas de capacitación y gestión del cambio para reducir la resistencia organizacional y asegurar que el personal adquiera competencias relacionadas con monitoreo remoto, análisis de datos, mantenimiento especializado y operación de sistemas autónomos.
- Las operaciones interesadas en adoptar autonomía deben priorizar el mejoramiento de sus vías de acarreo, sistemas de comunicación, centros de control y plataformas digitales, debido a que estos elementos constituyen requisitos fundamentales para el funcionamiento seguro y eficiente de los sistemas autónomos.
- Se recomienda desarrollar estudios aplicados en operaciones mineras peruanas que incluyan pruebas piloto y análisis económicos reales de CAPEX, OPEX, VAC, con la finalidad de validar los resultados obtenidos mediante revisión documental y generar evidencia específica para el contexto nacional.

REFERENCIAS

- Ahumada Oppici, J. P. (2018). *Evaluación y simulación de sistemas de transporte basados en tecnología autónoma en Minera Escondida*. [Memoria para optar al título de Ingeniero Civil de Minas, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería de Minas].
- Braga Calderon, I. (2021). *Evaluación económica camiones autónomos vs convencionales*. [Tesis de maestría, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Industrial].
- Casquino Bernedo, C. A. (2024). *Gestión de mantenimiento para incrementar la disponibilidad de la flota de camiones autónomos de la Minera Quellaveco, Moquegua - 2024*. [Tesis de licenciatura, Universidad Señor de Sipán]. Repositorio institucional. <https://hdl.handle.net/20.500.12802/13083>
- Díaz Azócar, R. R. (2024). *Diseño a nivel de perfil de la implementación de camiones de extracción autónomos en Minera Antucoya*. [Tesis para optar al grado de Magíster en Gestión y Dirección de Empresas, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Industrial].
- Leiva Peña, C. I. (2020). *Análisis de implementación de camiones autonomos en mina a cielo abierto*. [Tesis de licenciatura, Universidad de Chile]. Repositorio Institucional. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/177041>
- Leiva Peña, C. I. (2020). *Análisis de implementación de camiones autónomos en mina a cielo abierto*. [Memoria para optar al título de Ingeniera Civil de Minas, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería de Minas].
- Morales Manríquez, C. (2024). *Revisión sistemática de la automatización de camiones autónomos en la mitigación de riesgos operativos en minas de cielo abierto*. [Tesis de licenciatura, Universidad Tecnica Federico Santa Maria], Repositorio institucional. <https://repositorio.usm.cl/handle/123456789/76689>
- Mujica Morovic, Á. E. (2019). *Factibilidad de implementación de camiones autónomos en división Radomiro Atomic, CODELCO*. [Tesis de Magíster, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería de Minas].
- Zuñiga Estay, M. H. (2021). *Evaluación económica camiones autónomos vs convencionales*. [Tesis de maestria, Universidad de Chile], Repositorio institucional. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/181055>