Universidad Católica de Santa María

Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales

Escuela Profesional de Ingeniería de Minas

Evaluación del impacto de la implementación de camiones autónomos en la productividad de una unidad minera del sur del Perú

Tesis presentada por:

Yabar Valdivia, Jose Alfredo

ORCID: 0009-0004-0110-8555

para optar el Título Profesional de Ingeniero de Minas

Asesor (a):

Mg. Paredes Salas, Omar Willy

ORCID: 0009-0000-9860-6630

Arequipa - Perú

2026

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

INGENIERIA DE MINAS

TITULACIÓN CON TESIS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 17 de Junio del 2026

Dictamen: 016143-C-EPIM-2026

Visto el borrador del expediente 016143, presentado por:

2016600321 - YABAR VALDIVIA JOSE ALFREDO

Titulado:

EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE CAMIONES AUTÓNOMOS EN LA PRODUCTIVIDAD DE UNA UNIDAD MINERA DEL SUR DEL PERÚ

Nuestro dictamen es:

APROBADO

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

INGENIERO DE MINAS

29688402 - BARREDA DE LA CRUZ MIGUEL ALBERTO
DICTAMINADOR



40902304 - LINARES FLORES CASTRO ANTONIO ERICK
DICTAMINADOR



29640854 - MONTESINOS SOLORZANO CESAR GERARDO
DICTAMINADOR



Evaluación del impacto de la implementación de camiones autónomos en la productividad de una unidad minera del sur del Perú

INFORME DE ORIGINALIDAD

7%	6%	2%	3%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.ucsm.edu.pe Fuente de Internet	2%
2	Naranjo, Ana María Ruiz. "Aplicación de redes neuronales y simulación inversa en el diseño de sistemas de producción y servicios.", Universidad de La Sabana (Colombia) Publicación	<1%
3	Submitted to Universidad Católica de Santa María Trabajo del estudiante	<1%
4	Submitted to Docentes Trabajo del estudiante	<1%
5	www.repositorio.upla.edu.pe Fuente de Internet	<1%
6	repositorio.uwiener.edu.pe Fuente de Internet	<1%
7	repositorio.upsc.edu.pe Fuente de Internet	<1%
8	Submitted to Integración Moodle Presencial 4.3 Trabajo del estudiante	<1%
9	repositorio.ucv.edu.pe Fuente de Internet	<1%
10	repositorio.unsaac.edu.pe Fuente de Internet	<1%
11	Submitted to Universidad Nacional de Ingenieria Trabajo del estudiante	<1%
12	www.coursehero.com Fuente de Internet	<1%
13	Submitted to Universidad Tecnológica Centroamericana UNITEC Trabajo del estudiante	<1%
14	repositorio.lamolina.edu.pe Fuente de Internet	

Dedicatoria

Dedico este trabajo, con todo mi amor y gratitud, a mi madre, quien con su esfuerzo incansable, paciencia infinita y amor incondicional ha sido mi mayor apoyo en cada etapa de mi formación personal y académica. Sus consejos, sacrificios y valores me enseñaron a perseverar incluso en los momentos más difíciles, y fueron la base que me permitió alcanzar este logro.

A mi hermana, por su compañía constante, por su comprensión, palabras de aliento y confianza sincera. Su apoyo emocional y su presencia hicieron este camino más llevadero y me motivaron a seguir adelante cuando las fuerzas parecían agotarse. Este logro también es suyo, porque sin ustedes nada de esto habría sido posible.

Agradecimientos

A mi madre, por su amor incondicional, sacrificio y constante apoyo a lo largo de toda mi formación académica. Su fortaleza, paciencia y confianza han sido fundamentales para no rendirme y seguir adelante en cada etapa de este camino.

A mi hermana, por su compañía, motivación y palabras de aliento, que fueron un impulso constante para culminar este trabajo. Su apoyo y comprensión han sido muy valiosos durante todo este proceso.

A mi asesor, por su guía y orientación para el desarrollo de este trabajo.
A mis docentes y compañeros, por sus valiosos aportes.

Epígrafe

"La automatización aplicada a los procesos industriales mejora la seguridad, la eficiencia y la productividad."

W. Edwards Deming

Resumen

La presente investigación tuvo como objetivo evaluar el impacto de la implementación de camiones de acarreo autónomos en la productividad de una unidad minera a tajo abierto del sur del Perú. El estudio se desarrolló ante la necesidad de analizar alternativas tecnológicas que permitan optimizar el sistema de transporte minero, considerando que el acarreo constituye uno de los procesos más influyentes en la productividad, los costos operativos y la seguridad de la operación.

La metodología correspondió a una investigación aplicada, de enfoque cuantitativo y diseño no experimental, desarrollada como estudio de caso mediante simulación de eventos discretos con la librería SimPy de Python. Se trabajó con dos escenarios comparativos: un escenario convencional con camiones tripulados y un escenario autónomo con sistema AHS (Autonomous Haulage System). El modelo fue parametrizado a partir de registros operativos del sistema de dispatch, reportes de producción, costos operativos, datos de mantenimiento y parámetros técnicos del sistema de acarreo.

Los resultados evidenciaron que el escenario autónomo presenta mejoras sustanciales respecto del sistema convencional. La productividad diaria se incrementó en 76.9%, pasando de 57,728 a 102,177 ton/día, mientras que la productividad horaria aumentó de 2,406 a 4,341 ton/h. Asimismo, el tiempo de ciclo se redujo de 42.0 a 34.5 minutos (-17.9%), las horas efectivas de operación aumentaron de 12.63 a 18.36 horas por día (+45.4%) y el costo unitario de acarreo disminuyó de 0.777 a 0.618 USD/ton (-20.5%). Desde la perspectiva de seguridad, se proyectó la eliminación de 7,200 horas-hombre mensuales expuestas al circuito de acarreo.

El análisis económico del escenario base mostró una inversión estimada de 32.8 millones de dólares, con un VAN de USD 12,847,340, una TIR de 18.2%, un ROI de 24.3% a 10 años y un período de recuperación de 8 años. Se concluye que la implementación de camiones autónomos constituye una alternativa técnica y económicamente viable para mejorar la competitividad de la operación minera, recomendándose una adopción progresiva mediante una fase piloto y posterior escalamiento.

Palabras clave: camiones autónomos, productividad minera, simulación de eventos discretos.

Abstract

The objective of this research was to evaluate the impact of implementing autonomous haul trucks on the productivity of an open-pit mining unit in southern Peru. The study was developed in response to the need to analyze technological alternatives capable of optimizing the mining haulage system, considering that haulage is one of the most influential processes affecting productivity, operating costs, and safety performance in mining operations.

The methodology corresponded to applied research with a quantitative approach and a non-experimental design, developed as a case study through discrete-event simulation using the SimPy library in Python. Two comparative scenarios were analyzed: a conventional scenario with manned haul trucks and an autonomous scenario with an AHS (Autonomous Haulage System). The model was parameterized using dispatch system records, production reports, operating costs, maintenance data, and technical parameters of the haulage system.

The results showed that the autonomous scenario presents substantial improvements over the conventional system. Daily productivity increased by 76.9%, from 57,728 to 102,177 tons/day, while hourly productivity rose from 2,406 to 4,341 tons/hour. Likewise, cycle time decreased from 42.0 to 34.5 minutes (-17.9%), effective operating hours increased from 12.63 to 18.36 hours/day (+45.4%), and unit haulage cost decreased from 0.777 to 0.618 USD/ton (-20.5%). From a safety perspective, the elimination of 7,200 man-hours per month exposed to the haulage circuit was projected.

The economic analysis of the base scenario showed an estimated investment of USD 32.8 million, with an NPV of USD 12,847,340, an IRR of 18.2%, an ROI of 24.3% over 10 years, and a payback period of 8 years. It is concluded that the implementation of autonomous haul trucks constitutes a technically and economically viable alternative to improve the competitiveness of the mining operation, and a phased adoption strategy beginning with a pilot stage and subsequent scaling is recommended.

Keywords: autonomous haul trucks, mining productivity, discrete-event simulation.

Índice general

Dedicatoria
Agradecimientos
Epígrafe
Resumen
Abstract
Introducción 1
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN 3
1.1. Planteamiento del Problema 3
1.2.1. Problema general 4
1.2.2. Problemas específicos 5
1.3. Objetivos de la investigación 5
1.3.1. Objetivo general 5
1.3.2. Objetivos específicos 5
1.4. Justificación de la investigación 6
1.4.1. Justificación técnica 6
1.4.2. Justificación económica 6
1.4.3. Justificación en seguridad y gestión operativa 6
1.4.4. Justificación metodológica y académica 7
1.5. Líneas de investigación 7
1.5.1. Línea principal: Optimización de procesos mineros 7
1.5.2. Línea complementaria: Seguridad minera 7
1.5.3. Vinculación con Minería 4.0 7
1.6. Aporte del desarrollo de la tesis 8
1.6.1. Aporte teórico 8
1.6.2. Aporte metodológico 8
1.6.3. Aporte práctico 8
1.6.4. Aporte social y de seguridad 8
1.7. Palabras clave 8
CAPÍTULO II: FUNDAMENTOS TEÓRICOS 9
2.1. Bases teóricas y conceptuales 9
2.1.1. Minería 4.0 y automatización minera 9
2.1.2. Sistema de acarreo en minería a tajo abierto 9

2.1.3. Camiones de acarreo autónomos y sistemas AHS 10
2.1.4. Productividad, eficiencia operativa y tiempo de ciclo 11
2.1.5. Costos operativos de acarreo 12
2.1.6. Seguridad operativa en sistemas de acarreo 13
2.1.7. Simulación de eventos discretos como soporte analítico 13
2.2. Estado del arte 14
2.2.1. Tendencias tecnológicas actuales 16
2.2.2. Vacíos identificados en la literatura 16
2.3. Antecedentes de investigación 17
2.3.1. Antecedentes internacionales 17
2.3.2. Antecedentes nacionales 18
2.3.3. Brecha de investigación 19
2.4. Hipótesis 20
2.4.1. Hipótesis general 20
2.4.2. Hipótesis específicas 20
2.5. Variables y operacionalización 21
2.5.1. Variable independiente 21
2.5.2. Variables dependientes 21
2.5.3. Variables de control 22
Síntesis del capítulo 23
CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO 24
3.1. Enfoque, tipo y diseño de la investigación 24
3.1.1. Enfoque de investigación 24
3.1.2. Tipo y nivel de investigación 24
3.1.3. Diseño de investigación 25
3.2. Ámbito, unidad de análisis, alcances y limitaciones 26
3.2.1. Ámbito espacial y temporal del estudio 26
3.2.2. Unidad de análisis 26
3.2.3. Alcances y limitaciones 26
3.3. Población, muestra y criterio de selección de datos 28
3.3.1. Población de estudio 28
3.3.2. Muestra y técnica de muestreo 28
3.3.3. Criterios de inclusión y exclusión de registros 28
3.4. Variables, dimensiones e instrumentos documentales 29
3.4.1. Operacionalización de variables 29

3.4.2. Técnicas e instrumentos de recolección de datos 31
3.4.3. Criterios de validez y confiabilidad de la información 32
3.5. Materiales de estudio y parámetros técnicos del sistema de acarreo 33
3.6. Procedimiento metodológico 35
3.7. Construcción, verificación y validación del modelo de simulación 38
3.7.1. Lógica de construcción del modelo 38
3.7.2. Parámetros constantes y variables entre escenarios 38
3.7.3. Verificación y validación del modelo 39
3.8. Plan de procesamiento y análisis de datos 39
3.8.1. Procesamiento de la información 39
3.8.2. Análisis descriptivo y ajuste de distribuciones 40
3.8.3. Análisis comparativo, sensibilidad y evaluación económica 40
3.9. Consideraciones éticas y de manejo de la información 41
3.10. Cierre metodológico del capítulo 41
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIONES 42
4.1.1. Caracterización de la línea base del sistema de acarreo convencional 42
4.1.2. Configuración operativa del sistema de acarreo convencional 42
4.1.3. Estructura del ciclo de acarreo convencional 43
4.1.4. Indicadores de productividad del sistema convencional 44
4.1.5. Indicadores de eficiencia operativa 45
4.1.6. Indicadores de costos operativos 46
4.1.7. Indicadores de seguridad operativa 47
4.1.8. Comportamiento estadístico de la variabilidad del ciclo 48
4.1.9. Síntesis interpretativa del objetivo específico 1 49
4.2.1. Construcción del escenario autónomo de simulación 49
4.2.2. Parámetros configurados para el escenario de operación autónoma 50
4.2.3. Supuestos técnicos considerados en el escenario autónomo 51
4.2.4. Configuración de la simulación y replicaciones 51
4.2.5. Resultados de productividad del escenario autónomo 52
4.2.6. Resultados de eficiencia operativa del escenario autónomo 53
4.2.7. Resultados de costos operativos del escenario autónomo 54
4.2.8. Interpretación integral del escenario autónomo 55
4.2.9. Síntesis interpretativa del objetivo específico 2 55
4.3.1. Comparación general entre el sistema convencional y el sistema autónomo 56
4.3.2. Comparación de los resultados de productividad 57

4.3.3. Comparación de los resultados de eficiencia operativa 58
4.3.4. Comparación de los resultados económicos del sistema de acarreo 59
4.3.5. Comparación de los resultados de seguridad operativa 60
4.3.6. Discusión integrada de los hallazgos comparativos 61
4.3.7. Síntesis interpretativa del objetivo específico 3 62
4.4.1. Identificación de variables críticas para la implementación 63
4.4.2. Evaluación de escenarios de implementación 64
4.4.3. Estructura de inversión requerida 65
4.4.4. Componentes de ahorro anual esperados 66
4.4.5. Comportamiento del flujo de caja proyectado 67
4.4.6. Indicadores financieros para la toma de decisión 68
4.4.7. Riesgos económicos de la implementación 68
4.4.8. Validación comparativa con operaciones de referencia 69
4.4.9. Lineamientos técnicos, económicos y operativos para la adopción progresiva 70
4.4.10. Síntesis interpretativa del objetivo específico 4 71
CONCLUSIONES 72
RECOMENDACIONES 74
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 75
ANEXOS 80

Índice de Figuras

Figura 3.1. Flujograma metodológico de la investigación 35

Índice de Tablas

Tabla 1. Dimensiones analíticas del desempeño del sistema de acarreo 11
Tabla 2. Síntesis del estado del arte reciente sobre automatización y desempeño del acarreo minero (2024–2025) 15
Tabla 3. Antecedentes internacionales recientes vinculados con automatización y análisis del acarreo 17
Tabla 4. Antecedentes nacionales recientes sobre simulación y control del carguío y acarreo 18
Tabla 5. Matriz de operacionalización de variables de la investigación 22
Tabla 3.1. Clasificación metodológica de la investigación 25
Tabla 3.2. Delimitación metodológica del estudio 27
Tabla 3.3. Población, muestra y criterios de selección de registros 29
Tabla 3.4. Matriz de operacionalización de variables 30
Tabla 3.5. Técnicas e instrumentos documentales de recolección y sistematización de datos 31
Tabla 3.6. Criterios de validez y confiabilidad del diseño metodológico 33
Tabla 3.7. Parámetros técnicos de referencia del sistema de carguío y transporte 34
Tabla 3.8. Fases del procedimiento metodológico y productos esperados 37
Tabla 3.9. Parámetros constantes y parámetros de cambio entre escenarios 38
Tabla 3.10. Correspondencia entre objetivos específicos, fuentes y técnicas de análisis 40
Tabla 1. Configuración operativa del sistema de acarreo convencional 42
Tabla 2. Desglose del ciclo de acarreo convencional 43
Tabla 3. Indicadores de productividad del sistema de acarreo convencional 44
Tabla 4. Indicadores de eficiencia operativa del sistema de acarreo convencional 45
Tabla 5. Indicadores de costos operativos del sistema de acarreo convencional 46
Tabla 6. Desglose del costo operativo por hora-camión del sistema convencional 46
Tabla 7. Indicadores de seguridad operativa del sistema de acarreo convencional 47
Tabla 8. Análisis estadístico de variabilidad del ciclo de acarreo convencional 48
Tabla 9. Parámetros configurados para el escenario de operación autónoma 50
Tabla 10. Supuestos técnicos aplicados en el modelamiento del escenario autónomo 51
Tabla 11. Configuración de la simulación del escenario autónomo 52
Tabla 12. Indicadores de productividad del escenario autónomo 52
Tabla 13. Indicadores de eficiencia operativa del escenario autónomo 53
Tabla 14. Indicadores de costos operativos del escenario autónomo 54
Tabla 15. Comparación general de indicadores entre el escenario convencional y el escenario autónomo 56
Tabla 16. Comparación de indicadores de productividad entre escenarios 57
Tabla 17. Comparación de indicadores de eficiencia operativa entre escenarios 58

Tabla 18. Comparación de indicadores de costos entre escenarios 59
Tabla 19. Composición estimada del ahorro en el costo unitario de acarreo..... 60
Tabla 20. Comparación de indicadores de seguridad operativa entre escenarios 61
Tabla 21. Resultados del análisis de sensibilidad sobre la productividad del sistema autónomo.. 63
Tabla 22. Escenarios financieros de implementación del sistema autónomo 64
Tabla 23. Estructura de inversión del escenario base de implementación..... 65
Tabla 24. Componentes de ahorro anual del escenario base..... 66
Tabla 25. Flujo de caja proyectado del escenario base a 10 años 67
Tabla 26. Indicadores financieros del escenario base de implementación..... 68
Tabla 27. Matriz de riesgos financieros del proyecto de automatización 69
Tabla 28. Comparación del modelo con operaciones de referencia..... 69
Tabla 29. Lineamientos para la adopción progresiva de camiones de acarreo autónomos..... 70

Introducción

La industria minera mundial atraviesa un período de transformación tecnológica sin precedentes, impulsada por la necesidad de mejorar la productividad en un contexto de leyes de mineral decrecientes, incremento de costos operativos y exigencias cada vez más rigurosas en materia de seguridad y sostenibilidad ambiental. Según McKinsey & Company (2020), las operaciones mineras globales son aproximadamente 28% menos productivas que hace una década, evidenciando un estancamiento que demanda soluciones innovadoras. En este contexto, la automatización emerge como uno de los pilares fundamentales de la denominada Minería 4.0, ofreciendo la posibilidad de optimizar procesos tradicionalmente dependientes del factor humano.

El acarreo de material constituye uno de los procesos más críticos y costosos en la minería a tajo abierto, representando hasta el 40% del costo operativo total de una mina. Los sistemas convencionales de transporte, basados en camiones tripulados por operadores humanos, presentan ineficiencias inherentes: tiempos muertos durante cambios de turno, variabilidad en el desempeño según el operador, limitaciones por fatiga, y exposición del personal a zonas de alto riesgo. Estas limitaciones se traducen en productividad subóptima, costos unitarios elevados y potenciales riesgos de seguridad.

A nivel internacional, la adopción de camiones autónomos ha experimentado un crecimiento exponencial. Según GlobalData (2025), la flota mundial de camiones mineros autónomos creció un 84% entre julio de 2024 y julio de 2025, pasando de 2,080 a 3,823 unidades, con proyecciones que estiman superar las 6,000 unidades para 2030. Empresas líderes como Rio Tinto, BHP, Caterpillar y Komatsu han demostrado los beneficios tangibles de esta tecnología: incrementos del 15-30% en productividad, reducción del 15% en costos operativos, y un historial de seguridad sin accidentes fatales atribuibles a los vehículos autónomos en más de una década de operación.

En el Perú, la mina Quellaveco de Anglo American representa el primer caso de implementación de flota 100% autónoma desde su inicio de operaciones, demostrando que la tecnología es aplicable en las condiciones geográficas y operativas del país. Sin embargo, la gran mayoría de operaciones mineras nacionales aún mantienen sistemas convencionales de acarreo, existiendo una brecha significativa entre el desempeño actual y el potencial que ofrecen los sistemas autónomos.

La presente investigación aborda esta problemática mediante un enfoque metodológico basado en simulación de eventos discretos, que permite evaluar el impacto de la implementación de camiones autónomos sin necesidad de realizar costosas pruebas piloto. El estudio desarrolla un modelo computacional calibrado con datos reales de una unidad minera del sur del Perú, permitiendo proyectar los beneficios en productividad, costos y seguridad bajo diferentes escenarios.

El documento se estructura en cuatro capítulos principales. El Capítulo I presenta el planteamiento del problema, incluyendo la formulación de preguntas de investigación, objetivos, justificación y delimitaciones. El Capítulo II desarrolla el marco teórico, abarcando el estado del arte, antecedentes, bases teóricas, hipótesis y sistema de variables. El Capítulo III detalla el diseño metodológico, describiendo el tipo de investigación, población y muestra, técnicas de recolección de datos, procedimientos y métodos de análisis. Finalmente, el Capítulo IV presenta los resultados y discusiones, seguidos de las conclusiones y recomendaciones.

Esta investigación contribuye al conocimiento científico local al generar evidencia cuantitativa sobre el impacto de la automatización en la minería peruana, proporcionando además lineamientos prácticos para la adopción efectiva de esta tecnología.

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Planteamiento del Problema

La industria minera mundial atraviesa un proceso de transformación tecnológica orientado a sostener la productividad, reducir costos operativos y fortalecer la seguridad en un contexto de creciente complejidad técnica y económica. La presión por responder a menores leyes de mineral, mayores exigencias de desempeño y entornos de mercado volátiles ha llevado a las empresas a replantear sus procesos críticos con apoyo de tecnologías digitales y automatización. En esa línea, McKinsey & Company advirtió que las operaciones mineras a nivel mundial llegaron a ser hasta **28% menos productivas** que una década antes, incluso después de ajustar el análisis por la disminución de leyes y la inflación de costos, lo que evidencia la necesidad de mejorar la eficiencia operativa con soluciones tecnológicas más robustas.

Entre los procesos con mayor impacto en el desempeño de una mina a tajo abierto destaca el acarreo de material, no solo por su incidencia directa en el cumplimiento del plan de producción, sino también por su peso económico y energético dentro de la operación. Estudios recientes señalan que el acarreo puede representar **más del 50% de los costos mineros** en minas a cielo abierto de mediana y gran escala, mientras que el consumo de combustible de los camiones de gran tonelaje puede concentrar **más del 30% del uso total de energía** en minas superficiales; además, algunos equipos pesados pueden consumir **más de 250 litros de diésel por hora**. En un esquema convencional, con camiones tripulados, esta etapa suele verse afectada por cambios de turno, pausas operativas, esperas en cola, variabilidad en la conducción y exposición permanente del personal a condiciones de riesgo, factores que reducen la continuidad operacional y elevan el costo unitario del transporte.

Frente a estas limitaciones, la automatización del acarreo se ha consolidado como una de las expresiones más visibles de la denominada Minería 4.0. De acuerdo con GlobalData, la flota mundial de camiones mineros autónomos alcanzó **3,823 unidades en julio de 2025**, lo que representó un crecimiento interanual de **84%** frente a las **2,080 unidades** registradas un año antes; en paralelo, Caterpillar ha señalado su meta de superar los **2,000 camiones autónomos operando hacia 2030**. Este avance refleja una tendencia sostenida de adopción tecnológica en operaciones de gran escala, especialmente en países como Australia, Canadá y Chile, donde la

autonomía se ha vinculado con mejoras en la continuidad de operación, reducción de variabilidad del ciclo y mejores estándares de seguridad.

En el caso peruano, la experiencia de Quellaveco constituye un referente concreto de aplicación de esta tecnología en condiciones nacionales. Anglo American ha reportado que Quellaveco cuenta con una flota de **30 camiones autónomos**, y que la operación ya alcanzó una producción superior a **300,000 toneladas de cobre por año** en 2023 y 2024. Asimismo, la propia empresa informó que, gracias a su flota autónoma, durante el segundo trimestre de 2024 se registró un incremento de **0.7% en la productividad**, superando lo proyectado para ese período. Estos antecedentes confirman que la automatización del acarreo no es una posibilidad teórica en el país, sino una alternativa tecnológica ya implementada en la gran minería peruana; sin embargo, todavía son limitados los estudios académicos que cuantifiquen, con base en simulación y bajo condiciones comparables, su impacto específico sobre la productividad, la eficiencia operativa, los costos y la seguridad en una unidad minera determinada del sur del Perú.

En la unidad minera objeto de estudio se advierte una brecha entre el desempeño actual del sistema de acarreo convencional y el desempeño potencial que podría alcanzarse mediante la incorporación de camiones autónomos. El esquema vigente presenta detenciones operativas, tiempos improductivos y variabilidad en los ciclos de transporte, condiciones que afectan la utilización efectiva de la flota, la productividad diaria y el costo por tonelada movida, además de mantener al personal expuesto a riesgos propios del circuito de acarreo. En consecuencia, el problema de investigación se centra en determinar de qué manera la implementación de camiones de acarreo autónomos impactaría en la productividad de una unidad minera del sur del Perú, considerando su efecto en indicadores de productividad, eficiencia operativa, costos y seguridad. Para responder a esta interrogante, resulta necesario aplicar una metodología comparativa que permita evaluar, en condiciones equivalentes, el escenario convencional frente al escenario autónomo y así generar evidencia objetiva para la toma de decisiones técnicas y económicas.

1.2.1. Problema general

¿Cuál es el impacto de la implementación de camiones de acarreo autónomos en la productividad de una unidad minera del sur del Perú, en comparación con el sistema de acarreo convencional con operadores humanos?

1.2.2. Problemas específicos

- ¿Cuál es el desempeño actual del sistema de acarreo convencional de la unidad minera en términos de productividad, tiempo de ciclo, utilización de la flota, costos operativos y seguridad?
- ¿Cómo se comportaría el sistema de acarreo bajo un escenario de operación con camiones autónomos, manteniendo condiciones operativas equivalentes de ruta, distancia y demanda de transporte?
- ¿Qué diferencias cuantitativas se presentarían entre el escenario convencional y el escenario autónomo respecto de los indicadores de productividad, eficiencia operativa, costos y seguridad?
- ¿Qué lineamientos técnicos, económicos y operativos deberían considerarse para una eventual implementación progresiva de camiones de acarreo autónomos en la unidad minera?

1.3. Objetivos de la investigación

1.3.1. Objetivo general

Evaluar el impacto de la implementación de camiones de acarreo autónomos en la productividad de una unidad minera del sur del Perú, mediante la comparación técnica del desempeño del sistema autónomo frente al sistema convencional con operadores humanos.

1.3.2. Objetivos específicos

- Diagnosticar el desempeño del sistema de acarreo convencional de la unidad minera, considerando los indicadores de productividad, tiempo de ciclo, utilización de la flota, costos operativos y seguridad.
- Modelar, mediante simulación de eventos discretos, un escenario de operación con camiones de acarreo autónomos bajo condiciones equivalentes a las del sistema convencional.
- Comparar los resultados de los escenarios convencional y autónomo en términos de productividad, eficiencia operativa, costos y seguridad, a fin de determinar las variaciones atribuibles a la automatización del acarreo.

• Formular lineamientos técnicos, económicos y operativos para la adopción progresiva de camiones de acarreo autónomos en la unidad minera, en función de los resultados obtenidos.

1.4. Justificación de la investigación

La presente investigación se justifica por la necesidad de generar evidencia técnica y objetiva sobre el impacto que tendría la automatización del acarreo en una unidad minera del sur del Perú. Su pertinencia radica en que el acarreo constituye uno de los procesos más influyentes sobre el cumplimiento del plan de producción, la eficiencia operativa, el costo unitario de transporte y las condiciones de seguridad dentro de una operación a tajo abierto. En ese sentido, evaluar comparativamente el sistema convencional y un escenario con camiones autónomos permite aportar criterios sólidos para la toma de decisiones relacionadas con modernización tecnológica y mejora del desempeño operativo.

1.4.1. Justificación técnica

Desde la perspectiva técnica, la investigación permite analizar de manera estructurada el comportamiento de un proceso crítico de la operación minera. La comparación entre el sistema de acarreo convencional y el sistema de acarreo autónomo brinda elementos objetivos para comprender posibles variaciones en los tiempos de ciclo, la utilización de la flota, la continuidad de operación y las condiciones de seguridad. De este modo, el estudio contribuye a identificar el potencial técnico de la automatización como alternativa para optimizar el desempeño del sistema de transporte minero.

1.4.2. Justificación económica

En el plano económico, la investigación adquiere relevancia debido a que el acarreo representa una fracción significativa del costo operativo en minería a tajo abierto. Por ello, estimar el efecto de la incorporación de camiones autónomos sobre la productividad, el costo unitario de transporte y el aprovechamiento efectivo de la flota resulta útil para sustentar decisiones de inversión, priorización de recursos y evaluación de alternativas tecnológicas. Asimismo, los resultados permitirán valorar si la automatización puede traducirse en mejoras económicamente convenientes para la unidad minera estudiada.

1.4.3. Justificación en seguridad y gestión operativa

En materia de seguridad, la investigación es pertinente porque la automatización del acarreo puede reducir la exposición directa del personal a zonas de tránsito, maniobra y operación de alto riesgo. Del mismo modo, el estudio permite examinar los cambios que una eventual

implementación de camiones autónomos generaría en la supervisión operativa, en la organización del trabajo y en la gestión del sistema de transporte. En consecuencia, la investigación no solo aborda la dimensión productiva del problema, sino también sus implicancias en seguridad y gestión operacional.

1.4.4. Justificación metodológica y académica

Desde el punto de vista metodológico, el estudio se justifica porque emplea la simulación de eventos discretos como herramienta para evaluar escenarios operativos sin intervenir directamente en el sistema real, lo que permite desarrollar un análisis comparativo bajo condiciones equivalentes y con menor costo de experimentación. En el ámbito académico, la investigación aporta evidencia aplicada sobre automatización minera en el contexto peruano, donde aún son limitados los estudios cuantitativos orientados a estimar el impacto de los camiones autónomos sobre la productividad, la eficiencia operativa, los costos y la seguridad.

1.5. Líneas de investigación

La presente investigación se enmarca en las líneas de investigación de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas de la Universidad Católica de Santa María, al vincularse con la optimización de procesos mineros, la seguridad operativa y la incorporación de tecnologías aplicadas a la mejora del desempeño en operaciones a tajo abierto.

1.5.1. Línea principal: Optimización de procesos mineros

La tesis se relaciona con esta línea debido a que analiza el proceso de acarreo como una de las actividades fundamentales de la operación minera y evalúa una alternativa tecnológica orientada a mejorar la productividad, la eficiencia operativa y el aprovechamiento de los recursos disponibles.

1.5.2. Línea complementaria: Seguridad minera

La investigación también se vincula con la seguridad minera, puesto que examina el efecto de la automatización sobre la reducción de la exposición del personal a riesgos asociados a la conducción, circulación y maniobra de camiones dentro del circuito de acarreo.

1.5.3. Vinculación con Minería 4.0

Por su enfoque tecnológico, el estudio se articula además con las tendencias actuales de Minería 4.0, automatización y transformación digital, al analizar el uso de sistemas autónomos como alternativa para mejorar el desempeño operativo y la competitividad de las unidades mineras.

1.6. Aporte del desarrollo de la tesis

1.6.1. Aporte teórico

La investigación contribuye al conocimiento sobre automatización minera al sistematizar un análisis aplicado del impacto de los camiones de acarreo autónomos en una unidad minera del sur del Perú. En ese sentido, fortalece la discusión académica sobre productividad, eficiencia operativa, costos y seguridad en el marco de la transformación tecnológica de la minería contemporánea.

1.6.2. Aporte metodológico

El estudio propone una ruta metodológica basada en simulación de eventos discretos para comparar escenarios operativos equivalentes. Esta estructura puede ser replicada o adaptada en investigaciones similares orientadas a evaluar tecnologías emergentes en procesos mineros, lo que le otorga valor como antecedente metodológico aplicable a otros contextos.

1.6.3. Aporte práctico

Los resultados esperados proporcionarán insumos para la toma de decisiones técnicas y gerenciales, al ofrecer criterios para valorar la conveniencia de implementar camiones autónomos, identificar requerimientos operativos y establecer lineamientos para una adopción progresiva dentro de la unidad minera estudiada.

1.6.4. Aporte social y de seguridad

La tesis aporta a la discusión sobre una transición tecnológica responsable en minería, al considerar no solo los beneficios esperados en productividad y costos, sino también las implicancias sobre seguridad operativa, reorganización del trabajo y adaptación del personal frente a procesos de automatización.

1.7. Palabras clave

Camiones autónomos; productividad minera; sistema de acarreo autónomo; simulación de eventos discretos; Minería 4.0; eficiencia operativa; costos operativos de acarreo; seguridad operativa.

CAPÍTULO II: FUNDAMENTOS TEÓRICOS

El presente capítulo desarrolla los fundamentos teóricos, conceptuales y analíticos que sustentan la investigación sobre la implementación de camiones de acarreo autónomos en una unidad minera del sur del Perú. En atención a las observaciones formuladas al borrador, esta versión incorpora mayor desarrollo conceptual, refuerza el uso de literatura académica reciente y organiza los antecedentes de investigación de manera más analítica, de tal forma que exista una relación explícita entre el problema, los objetivos, las hipótesis y las variables del estudio.

2.1. Bases teóricas y conceptuales

2.1.1. Minería 4.0 y automatización minera

La denominada Minería 4.0 se asocia con la incorporación integrada de tecnologías digitales, automatización, analítica de datos, inteligencia artificial, sensórica, comunicaciones industriales y control en tiempo real para optimizar los procesos mineros. Long et al. (2024) sostienen que la automatización minera ha dejado de ser un conjunto aislado de innovaciones para convertirse en una transformación sistémica de la operación, con efectos en seguridad, productividad, control operativo y requerimientos de competencias del personal. En el mismo sentido, Obosu y Frimpong (2025) señalan que la industria minera contemporánea avanza hacia un modelo de operación apoyado en sistemas inteligentes, robótica, internet de las cosas y monitoreo continuo, orientado a reducir la exposición al riesgo y mejorar la consistencia del desempeño operativo.

Desde esta perspectiva, la automatización no debe entenderse únicamente como la sustitución de la intervención humana en una tarea específica, sino como una reconfiguración del sistema productivo. Ello implica cambios en la captura y gestión de datos, en los mecanismos de control, en la relación entre el equipo y el entorno, así como en la supervisión, mantenimiento y toma de decisiones. Por ello, en una investigación sobre camiones autónomos no basta con describir el equipo; resulta necesario comprender la lógica sistémica del proceso de acarreo dentro de una arquitectura operativa más amplia, propia de la transformación digital minera (Long et al., 2024; Obosu & Frimpong, 2025).

2.1.2. Sistema de acarreo en minería a tajo abierto

El sistema de carguío y acarreo constituye uno de los subsistemas más críticos de la minería a cielo abierto, pues articula la extracción con la disposición del mineral y del desmonte hacia chancadoras, botaderos, stockpiles o destinos intermedios. Su desempeño depende de la

interacción entre palas o cargadores, camiones de acarreo, rutas, condiciones geométricas, colas, tiempos de descarga y estrategias de despacho. Por ello, el comportamiento del sistema no puede analizarse únicamente desde la capacidad nominal de los equipos, sino desde el funcionamiento integrado del ciclo operativo.

La literatura reciente confirma la relevancia económica de esta etapa. Tokac et al. (2025) indican que los costos de acarreo pueden superar el 50 % de los costos mineros y llegar hasta 60 % en operaciones a tajo abierto de gran escala. En una línea similar, Lee y Kim (2025) señalan que, en algunos contextos de explotación a cielo abierto y canteras, el transporte representa más del 50 % de los gastos operativos totales. Además, Mesa et al. (2025) reportan que los camiones de acarreo concentran alrededor del 30 % de la energía total utilizada en determinadas operaciones mineras, lo que refuerza su importancia tanto económica como energética. En consecuencia, cualquier mejora en la continuidad del ciclo, en la velocidad efectiva o en la utilización de la flota puede repercutir directamente sobre la productividad y el costo unitario de la operación.

En el modelo convencional, el ciclo de acarreo comprende, de manera general, las etapas de carga, viaje cargado, espera, descarga y retorno en vacío. La duración real de dicho ciclo se ve afectada por restricciones operativas, demoras por coordinación, pausas humanas, condiciones de la vía y decisiones de despacho. Por ello, el análisis de productividad en sistemas de acarreo requiere indicadores que capten tanto el volumen transportado como la calidad del uso del tiempo y de los equipos (Park et al., 2025).

2.1.3. Camiones de acarreo autónomos y sistemas AHS

Los camiones de acarreo autónomos forman parte de los Autonomous Haulage Systems (AHS), sistemas integrados que combinan el vehículo, la percepción del entorno, la geolocalización, las comunicaciones, el sistema de gestión de flota y un centro de control operacional. En términos funcionales, un AHS busca ejecutar el ciclo de acarreo con menor variabilidad, mayor consistencia en velocidades y trayectorias, y menores dependencias de pausas propias de la conducción humana, aunque ello exige una infraestructura tecnológica robusta y una adecuada gestión del cambio.

La Global Mining Guidelines Group –GMG– (2024) señala que la evaluación del desempeño de un sistema autónomo debe considerar, además de la disponibilidad y la utilización, el tiempo de madurez o rampa de aprendizaje de la implementación, la trazabilidad de los datos, los indicadores de seguridad y la comparabilidad de los modelos de clasificación

del tiempo. De igual modo, dicha guía remarca que los sistemas autónomos generan volúmenes de datos mayores que los sistemas tripulados, por lo que la gestión de métricas y la priorización de información son elementos centrales en la mejora continua del sistema. Esto es particularmente relevante para la presente investigación, dado que la comparación entre el escenario convencional y el escenario autónomo exige equivalencia en las condiciones operativas y claridad en la forma de medir los resultados.

2.1.4. Productividad, eficiencia operativa y tiempo de ciclo

En el contexto de esta tesis, la productividad del acarreo se entiende como la cantidad de material transportado por unidad de tiempo por el sistema de transporte minero. Sin embargo, esta definición operativa debe complementarse con una lectura de eficiencia, ya que un mayor tonelaje no necesariamente refleja un mejor desempeño si se alcanza a costa de mayor consumo, más detenciones o mayor exposición a riesgos. Park et al. (2025), al aplicar el marco de clasificación de tiempos propuesto por GMG, destacan que la evaluación del sistema de acarreo debe integrar indicadores de disponibilidad, utilización y efectividad, de forma que el análisis de desempeño no se reduzca a un solo valor agregado.

Bajo esta lógica, el tiempo de ciclo, las horas efectivas, la utilización sobre disponible y el factor de operación se convierten en indicadores particularmente relevantes. La mejora de estos parámetros refleja no solo mayor continuidad de trabajo, sino también una disminución de pérdidas temporales vinculadas a colas, pausas, redistribución ineficiente de equipos o demoras no planificadas. Por ello, la productividad y la eficiencia operativa deben analizarse de forma conjunta y no como categorías aisladas.

Con el propósito de ordenar las dimensiones analíticas que sustentan la investigación, en la Tabla 1 se sintetizan los conceptos operativos principales que orientan la evaluación del sistema de acarreo, así como los indicadores asociados a cada dimensión.

Tabla 1

Dimensiones analíticas del desempeño del sistema de acarreo

Dimensión	Definición de trabajo	Indicadores principales	Soporte reciente
Productividad del acarreo	Volumen de material transportado por unidad de tiempo por la flota o por el sistema.	Ton/h, ton/día, ciclos/camión, ton/ciclo	Park et al. (2025); Bujaico Morante (2023)

Eficiencia operativa	Grado de aprovechamiento del tiempo disponible del sistema y reducción de pérdidas operativas.	Tiempo de ciclo, utilización, horas efectivas, tiempo de espera	Park et al. (2025); GMG (2024)
Costos operativos de acarreo	Relación entre el costo total del transporte y el volumen efectivamente movido.	USD/ton, USD/h-camión, consumo energético o de combustible	Mesa et al. (2025); Lee & Kim (2025)
Seguridad operativa	Nivel de exposición del personal y control de riesgos en el circuito de acarreo.	Horas-hombre expuestas, incidentes, interacción hombre–máquina	Moniri-Morad et al. (2024); GMG (2024)

Nota. Elaboración propia con base en Park et al. (2025), Moniri-Morad et al. (2024), Mesa et al. (2025), GMG (2024) y tesis peruanas recientes sobre simulación del acarreo.

La Tabla 1 muestra que el desempeño del acarreo debe evaluarse de manera multidimensional. Para esta tesis, ello resulta importante porque la implementación de camiones autónomos no se examina únicamente por su efecto sobre el tonelaje transportado, sino también por su relación con el uso efectivo del tiempo, el costo unitario de operación y la reducción de la exposición al riesgo. Esta estructura permite que las hipótesis y las variables del estudio conserven coherencia con los objetivos y con la naturaleza comparativa de la investigación.

2.1.5. Costos operativos de acarreo

El costo operativo de acarreo se asocia con todos los recursos consumidos para ejecutar el ciclo de transporte, incluyendo combustible o energía, mantenimiento, neumáticos, lubricantes, mano de obra, tiempos improductivos y costos derivados de la subutilización de equipos. Wang et al. (2021) reportan que el costo de combustible de los camiones de mina puede representar hasta 22 % del costo total en ciertas operaciones a tajo abierto, mientras que Mesa et al. (2025) enfatizan que la discusión contemporánea sobre flotas mineras ya no se limita a los costos directos, sino que incorpora también consumo energético, descarbonización y eficiencia sistémica de la operación.

Desde el punto de vista económico, el costo por tonelada transportada es un indicador de alta utilidad, puesto que integra simultáneamente el resultado productivo y el costo de operación. En estudios de simulación aplicados a minería, la reducción de demoras y de tiempos de espera suele reflejarse en menores costos unitarios, aun sin modificar la capacidad

nominal de los equipos. De allí que la automatización del acarreo deba analizarse no solo como una innovación tecnológica, sino como una posible estrategia de eficiencia económica y operacional (Lee & Kim, 2025; Flores Zárate, 2025).

2.1.6. Seguridad operativa en sistemas de acarreo

La seguridad operativa en el acarreo minero constituye una dimensión crítica debido a la interacción constante entre equipos móviles de gran tonelaje, operadores, supervisores, infraestructura vial y condiciones cambiantes del entorno. Moniri-Morad et al. (2024) sostienen que el powered haulage sigue siendo una de las áreas más sensibles de la seguridad minera y que la introducción de nuevas tecnologías puede reducir ciertos riesgos, aunque también introduce otros de naturaleza técnica, organizacional y sistémica.

En el caso de los sistemas autónomos, la seguridad no debe entenderse como un resultado automático del reemplazo del conductor. La GMG (2024) enfatiza que la implementación de autonomía exige registros vivos de peligros, revisión de supuestos, indicadores de desempeño de seguridad, mecanismos de reporte de incidentes y programas de competencia, capacitación y comunicación. En consecuencia, la seguridad del sistema autónomo depende de la calidad del diseño del sistema, de la gestión de interfaces humano–máquina y del monitoreo continuo de controles críticos.

Para esta investigación, la seguridad operativa se expresa principalmente a través de la exposición del personal a zonas de riesgo, la potencial reducción de interacciones hombre–máquina en el circuito de acarreo y la mejora de las condiciones de supervisión y control. Por ello, la seguridad se integra como variable dependiente y no como un aspecto accesorio del análisis.

2.1.7. Simulación de eventos discretos como soporte analítico

La simulación de eventos discretos (Discrete Event Simulation, DES) constituye una herramienta ampliamente utilizada para representar procesos complejos con variabilidad, colas, interacciones entre recursos y secuencias operativas. En minería, su utilidad radica en que permite reproducir el comportamiento del sistema de carguío y acarreo bajo condiciones controladas, evaluar configuraciones alternativas y estimar el efecto de cambios en los parámetros operativos sin necesidad de intervenir directamente en la operación real.

Lee y Kim (2025) demostraron que la DES puede emplearse para determinar asignaciones óptimas de equipos y reducir costos operativos en procesos de explotación, mientras que Goli

et al. (2025) la utilizaron para comparar riesgos de colisión entre escenarios no autónomos, híbridos y totalmente autónomos. De forma complementaria, Umirzoqov et al. (2025) destacan que la simulación posibilita comparaciones "apples-to-apples" entre estrategias de despacho, al aislar el efecto del sistema evaluado frente a otras interferencias de campo. En el contexto peruano, Bujaico Morante (2023), Flores Zárate (2025), Vásquez Chillcce (2024) y Vivanco Gómez (2025) confirman su aplicabilidad para el análisis del ciclo de carguío y acarreo y para la optimización de configuraciones de transporte.

Por lo tanto, la simulación de eventos discretos resulta pertinente para esta tesis porque permite comparar, en condiciones equivalentes, un escenario convencional y otro autónomo, con énfasis en productividad, eficiencia operativa, costos y seguridad. Esta metodología fortalece la objetividad del análisis y reduce el riesgo de extraer conclusiones basadas únicamente en apreciaciones cualitativas o en referencias externas no adaptadas a la operación estudiada.

2.2. Estado del arte

El estado del arte muestra que la automatización del acarreo minero ha pasado de ser una experiencia puntual en operaciones de gran escala a constituir una línea consolidada de investigación y desarrollo tecnológico. Los estudios recientes ya no se limitan a describir la existencia de los camiones autónomos, sino que analizan su efecto sobre seguridad, desempeño, consumo energético, control de rutas, gestión de datos, indicadores de utilización y procesos de implantación organizacional (Long et al., 2024; Obosu & Frimpong, 2025).

En términos generales, la literatura reciente converge en cuatro ideas: primero, el acarreo sigue siendo una actividad de alto peso económico y energético dentro de la mina; segundo, la automatización tiene potencial para reducir variabilidad, mejorar consistencia y disminuir exposición humana; tercero, la comparabilidad de resultados depende de contar con modelos homogéneos de clasificación del tiempo y KPIs; y cuarto, los beneficios de la autonomía dependen de la madurez de la implementación, la calidad de la infraestructura digital y la gestión del cambio organizacional (GMG, 2024; Park et al., 2025).

A fin de sintetizar las líneas más relevantes del conocimiento reciente, en la Tabla 2 se resume el aporte de estudios recientes sobre automatización, seguridad, analítica de desempeño y simulación en sistemas de acarreo.

Tabla 2

Síntesis del estado del arte reciente sobre automatización y desempeño del acarreo minero (2024–2025)

Tema	Fuente reciente	Hallazgo clave	Implicancia para la tesis
Automatización minera	Long et al. (2024)	La automatización mejora seguridad y eficiencia, pero exige nuevas competencias, integración de datos y gestión del cambio.	La evaluación de camiones autónomos debe considerar dimensiones técnicas y organizacionales, no solo la capacidad del equipo.
Minería inteligente y robótica	Obosu y Frimpong (2025)	La integración de AI, IoT, sensórica y robótica redefine la operación hacia sistemas más seguros y consistentes.	Sustenta el encuadre de la investigación dentro de la Minería 4.0.
Gestión energética de flotas	Mesa et al. (2025)	Los camiones concentran una porción relevante del uso energético; la eficiencia de flota es un eje estratégico de sostenibilidad.	Refuerza la relevancia económica y operativa del proceso de acarreo.
KPIs y clasificación del tiempo	Park et al. (2025)	Se reportó disponibilidad >97 %, pero solo 35.9 % de utilización y 59.8 % de efectividad productiva en el caso analizado.	Evidencia que la disponibilidad no basta para explicar el desempeño; es necesario analizar el uso efectivo del tiempo.
Riesgo en autonomía	Goli et al. (2025)	El escenario totalmente autónomo mostró mejoras aproximadas de 91.7 % en probabilidad de colisión respecto del escenario manual.	Apoya la inclusión de la seguridad como variable dependiente del estudio.
Percepción y navegación	Essien y Frimpong (2025)	La fusión de sensores mejora la detección, pero persisten retos por polvo, oclusión y baja visibilidad.	Advierte que la autonomía requiere soporte tecnológico, confiabilidad sensórica e infraestructura adecuada.

Nota. Elaboración propia con base en Long et al. (2024), Obosu y Frimpong (2025), Mesa et al. (2025), Park et al. (2025), Goli et al. (2025) y Essien y Frimpong (2025).

Como se observa en la Tabla 2, el conocimiento reciente ya ha superado la etapa de simple descripción tecnológica. La discusión actual gira en torno a cómo medir el desempeño de los sistemas autónomos, cómo comparar escenarios con métricas homogéneas y cómo integrar la seguridad y la gestión de riesgos al análisis operacional. Esta tendencia respalda la pertinencia del presente estudio, que no se limita a describir una tecnología, sino que busca medir objetivamente su impacto en una operación minera específica.

2.2.1. Tendencias tecnológicas actuales

Las tendencias recientes de la automatización minera muestran una convergencia entre autonomía, analítica avanzada, conectividad industrial y sostenibilidad. Long et al. (2024) y Obosu y Frimpong (2025) destacan que el desarrollo tecnológico se orienta hacia sistemas cada vez más interoperables, con mayor presencia de inteligencia artificial para apoyo a decisiones, mantenimiento predictivo y optimización de rutas. A ello se suma la necesidad de infraestructura de comunicaciones robusta, interoperabilidad entre sistemas y control de ciberseguridad, elementos que la GMG (2024) considera determinantes para una implementación exitosa.

Otra tendencia relevante es la estandarización de indicadores. La literatura reciente insiste en que la comparación entre operaciones y entre tecnologías solo es válida si se trabaja con modelos comparables de clasificación del tiempo y desempeño. Park et al. (2025) y la GMG (2024) coinciden en que la disponibilidad, la utilización y la efectividad deben diferenciarse claramente para evitar interpretaciones sesgadas del rendimiento del sistema. En el marco de esta tesis, ello justifica que la evaluación del impacto de los camiones autónomos se sustente en un conjunto de indicadores articulados y no en un único valor de producción.

2.2.2. Vacíos identificados en la literatura

A pesar del avance observado, persisten vacíos relevantes. En primer lugar, todavía son limitados los estudios comparativos controlados que contrastan, bajo condiciones equivalentes, un escenario convencional frente a uno autónomo con énfasis simultáneo en productividad, eficiencia operativa, costos y seguridad. Goli et al. (2025) y Umirzoqov et al. (2025) muestran que la simulación permite atender ese vacío metodológico, pero tales experiencias aún son relativamente escasas y se concentran fuera del contexto peruano.

En segundo lugar, la literatura internacional ha demostrado la factibilidad de la autonomía en minas de gran escala, pero ello no reemplaza la necesidad de evaluaciones específicas por operación. La propia GMG (2024) advierte que los resultados dependen de la madurez del sistema, la calidad de los datos, la definición del modelo de tiempos y la infraestructura del sitio. En el caso peruano, si bien la experiencia de Quellaveco confirma la viabilidad tecnológica en el país, todavía son reducidos los estudios académicos que cuantifican el impacto potencial de los camiones autónomos en una unidad minera concreta del sur del Perú mediante un enfoque comparativo y con base en simulación.

2.3. Antecedentes de investigación

Los antecedentes permiten ubicar el estudio dentro del conocimiento existente y, al mismo tiempo, identificar el vacío específico que la investigación busca atender. En esta reformulación se organizan en antecedentes internacionales y nacionales, priorizando estudios recientes y directamente vinculados con automatización, simulación del acarreo, indicadores de desempeño y seguridad operativa.

2.3.1. Antecedentes internacionales

En el ámbito internacional, las investigaciones recientes confirman que el análisis del acarreo autónomo se ha desarrollado desde distintos enfoques: revisiones de automatización minera, estudios de riesgo, modelos de simulación, evaluación de KPIs y trabajos sobre percepción y navegación autónoma. La Tabla 3 resume seis antecedentes relevantes y su aporte específico a la presente tesis.

Tabla 3

Antecedentes internacionales recientes vinculados con automatización y análisis del acarreo

Autor(es) y año	Objeto de estudio	Método	Hallazgo principal	Aporte para esta tesis
Long et al. (2024)	Automatización de equipos y operaciones mineras	Revisión académica	Sintetizan impactos en seguridad y eficiencia, así como barreras de adopción, inversión y habilidades.	Aporta el encuadre conceptual de la automatización minera y su relación con el desempeño operativo.
Moniri-Morad et al. (2024)	Seguridad en powered haulage	Revisión integral	Plantean un marco de análisis de riesgos para equipos móviles y advierten que las nuevas tecnologías deben gestionarse con enfoque sistémico.	Sustenta el tratamiento de la seguridad como dimensión explícita del estudio.
Goli et al. (2025)	Comparación de colisiones en escenarios manual, híbrido y autónomo	DES + matriz de riesgo	El escenario autónomo mostró una reducción muy significativa de la probabilidad de colisiones.	Demuestra que la simulación es válida para comparar seguridad en escenarios de autonomía.
Park et al. (2025)	Evaluación de KPIs en haulage de mina a cielo abierto	Aplicación del marco GMG	Encontraron alta disponibilidad, pero utilización y efectividad	Refuerza la necesidad de usar múltiples indicadores y no solo producción bruta.

			claramente más bajas que la disponibilidad.	
Lee y Kim (2025)	Asignación óptima de backhoes y dump trucks	DES con optimización	Reducen costos y tiempos de espera mediante configuración óptima de equipos.	Respalda el empleo de simulación para evaluar configuraciones de transporte bajo variabilidad.
Essien y Frimpong (2025)	Detección 3D para navegación autónoma subterránea	Revisión temática	Identifican mejoras por fusión de sensores, pero también limitaciones por datos, oclusión y condiciones adversas.	Sustenta que la autonomía depende de condiciones tecnológicas y de percepción confiable.

Nota. Elaboración propia con base en Long et al. (2024), Moniri-Morad et al. (2024), Goli et al. (2025), Park et al. (2025), Lee y Kim (2025) y Essien y Frimpong (2025).

La Tabla 3 permite observar que el interés internacional se ha desplazado desde la descripción de la tecnología hacia la medición comparativa de su desempeño y riesgos. Para esta tesis, ese hallazgo es central, ya que confirma la pertinencia de emplear un diseño comparativo apoyado en simulación para valorar el efecto de los camiones autónomos bajo condiciones equivalentes y con métricas explícitas.

2.3.2. Antecedentes nacionales

En el Perú, la producción científica reciente sobre carguío y acarreo ha estado orientada principalmente a la optimización de flotas, la reducción de demoras, el control del proceso y la aplicación de simulación de eventos discretos. Aunque todavía son escasos los estudios centrados específicamente en autonomía del acarreo, sí existe una base nacional relevante sobre modelamiento del sistema de transporte minero. La Tabla 4 sintetiza los antecedentes nacionales más directamente vinculados con la presente investigación.

Tabla 4

Antecedentes nacionales recientes sobre simulación y control del carguío y acarreo

Autor(es) y año	Contexto o unidad de análisis	Método	Hallazgo principal	Vinculación con esta tesis
Bujaico Morante (2023)	Mina de cobre a tajo abierto	Simulación de eventos discretos	Propuso una metodología para estimar el número de camiones requerido para pasar de 100,000 a 140,000 ton/día	Aporta un antecedente peruano sólido sobre DES aplicada a dimensionamiento de flota.

			incorporando variabilidad real del ciclo.	
Flores Zárate (2025)	Mina superficial del centro del Perú	DES + análisis de sensibilidad	La flota optimizada de 12 camiones alcanzó 2,886 TM/10 h y el modelo validado mostró diferencias menores al 5 % respecto a datos reales.	Respalda el uso de simulación para reducir demoras y costos en operaciones superficiales.
Vásquez Chillcce (2024)	U.M. Andaychagua	Simulación de eventos discretos	Concluye que la simulación mejora la planificación y gestión de la flota de transporte en minería subterránea.	Refuerza la validez de la simulación como herramienta de gestión del transporte minero.
Vivanco Gómez (2025)	U.M. Sotrami, Ayacucho	SimPy + diagnóstico de campo	Identificó cuellos de botella y demoras en el ciclo de acarreo, estructurando el análisis en fases de diagnóstico, modelamiento y evaluación.	Es especialmente útil por su cercanía metodológica con el uso de SimPy en la presente tesis.
Rojas Telles (2025)	Unidad minera superficial	Machine learning predictivo	Desarrolló un modelo predictivo del tiempo de espera para mejorar el control del proceso de carguío y acarreo.	Muestra una línea nacional complementaria de analítica avanzada aplicada al control del transporte minero.

Nota. Elaboración propia con base en repositorios académicos peruanos consultados: PUCP, UNSAAC, Alicia-Concytec y UNSCH.

La Tabla 4 evidencia que, en el contexto peruano, la simulación de eventos discretos ya se ha consolidado como herramienta útil para estudiar el sistema de carguío y acarreo, optimizar flotas y evaluar demoras. No obstante, también pone de manifiesto que la mayor parte de los estudios nacionales se concentra en flotas convencionales o en analítica predictiva del proceso, mientras que aún son reducidos los trabajos que comparan explícitamente un escenario de camiones tripulados frente a otro con camiones autónomos dentro de una unidad minera específica.

2.3.3. Brecha de investigación

A partir de los antecedentes revisados, la brecha de investigación puede definirse en tres niveles. En primer lugar, existe una brecha temática: aunque la automatización del acarreo ha sido ampliamente documentada a nivel internacional, todavía son escasos los estudios

académicos aplicados al contexto peruano que evalúen de forma integrada su efecto en productividad, eficiencia operativa, costos y seguridad dentro de una misma unidad minera. En segundo lugar, existe una brecha metodológica: buena parte de la evidencia internacional proviene de revisiones, reportes operativos o casos de implementación, pero no siempre de comparaciones controladas bajo condiciones equivalentes, aspecto que la simulación de eventos discretos permite abordar de manera rigurosa (Goli et al., 2025; Umirzoqov et al., 2025).

En tercer lugar, existe una brecha territorial y operativa: la experiencia de Quellaveco demuestra la factibilidad de la autonomía en el país, pero ello no sustituye la necesidad de estudios focalizados en unidades mineras concretas del sur del Perú que permitan estimar impactos potenciales antes de una decisión de inversión. En consecuencia, la presente tesis se propone cubrir esa brecha mediante un diseño comparativo entre el sistema convencional y un escenario autónomo, sustentado en simulación y enfocado en indicadores directamente vinculados con la toma de decisiones operativas y económicas.

2.4. Hipótesis

En correspondencia con el problema general, los objetivos específicos y las variables planteadas, las hipótesis de investigación se formulan de manera que puedan ser contrastadas posteriormente en el capítulo de resultados. Para evitar ambigüedades metodológicas, se ha buscado que cada hipótesis se vincule con indicadores operativos observables o simulables dentro del sistema de acarreo.

2.4.1. Hipótesis general

La implementación de camiones de acarreo autónomos impacta positivamente en la productividad de una unidad minera del sur del Perú, al reducir tiempos improductivos, mejorar la utilización efectiva de la flota, disminuir el costo operativo unitario y reducir la exposición del personal a riesgos en el circuito de acarreo.

2.4.2. Hipótesis específicas

H1. El diagnóstico del sistema de acarreo convencional evidenciará pérdidas de tiempo operativo asociadas a esperas, pausas, variabilidad del ciclo y limitaciones en la utilización efectiva de la flota.

H2. El escenario simulado con camiones de acarreo autónomos presentará un mejor desempeño que el escenario convencional en términos de productividad del sistema y tiempo promedio de ciclo.

H3. El escenario autónomo mostrará una mejora en la eficiencia operativa y una reducción del costo operativo unitario del acarreo en comparación con el escenario convencional.

H4. La incorporación de camiones autónomos reducirá la exposición del personal a zonas de riesgo e interacciones hombre–máquina dentro del sistema de acarreo.

Estas hipótesis han sido formuladas con una lógica de correspondencia directa con los objetivos de investigación. De este modo, el capítulo de resultados deberá demostrar si las diferencias obtenidas entre el escenario convencional y el escenario autónomo respaldan o no cada una de las proposiciones planteadas.

2.5. Variables y operacionalización

La formulación de variables se ha reorganizado para conservar coherencia con el enfoque comparativo del estudio. Dado que la investigación no implementa físicamente la tecnología, sino que compara dos configuraciones operativas mediante simulación, la variable independiente se expresa como tipo de sistema de acarreo y no como implementación material ya ejecutada.

2.5.1. Variable independiente

Variable independiente: Tipo de sistema de acarreo.

Definición conceptual: condición operativa del sistema de transporte minero según el esquema de conducción y control aplicado a los camiones de acarreo.

Niveles operativos: (a) sistema de acarreo convencional con operadores humanos; y (b) sistema de acarreo autónomo con control mediante AHS.

2.5.2. Variables dependientes

Variable dependiente 1: Productividad del acarreo. Se refiere al volumen de material transportado por unidad de tiempo por la flota o por el sistema.

Variable dependiente 2: Eficiencia operativa. Expresa el grado de aprovechamiento del tiempo y de los recursos disponibles en el proceso de acarreo.

Variable dependiente 3: Costo operativo unitario del acarreo. Corresponde al costo de operación del sistema de transporte por unidad de material efectivamente movilizado.

Variable dependiente 4: Seguridad operativa. Se refiere al nivel de exposición del personal y a la interacción con riesgos presentes en el circuito de acarreo.

2.5.3. Variables de control

Con el fin de preservar la comparabilidad entre escenarios, se mantendrán constantes variables de control tales como la geometría general de la operación, las distancias base de acarreo, la demanda de transporte, la configuración general de carguío, el número de equipos disponibles y las condiciones de modelamiento consideradas para el análisis.

La Tabla 5 presenta la matriz de operacionalización propuesta para el estudio. Su función es explicitar la correspondencia entre variable, dimensión, indicador, unidad de medida y fuente de información, fortaleciendo la trazabilidad metodológica observada como necesaria en la revisión docente.

Tabla 5

Matriz de operacionalización de variables de la investigación

Variable	Dimensión	Indicador	Unidad	Técnica / instrumento	Fuente de datos
Tipo de sistema de acarreo (independiente)	Configuración operativa	Convencional / Autónomo	Categoría	Diseño comparativo; modelamiento del sistema	Parámetros de operación y configuración del modelo
Productividad del acarreo	Rendimiento del sistema	Toneladas por hora; toneladas por día; ciclos por camión	ton/h; ton/día; ciclos	Revisión de dispatch y salidas del modelo	Registros operativos y simulación
Eficiencia operativa	Uso efectivo del tiempo	Tiempo de ciclo; utilización; horas efectivas; tiempo de espera	min; %; h/día	Cronometraje, revisión documental y simulación	Dispatch, observación y simulación
Costo operativo unitario	Costo del transporte	USD/ton; USD/h-camión; consumo energético o de combustible	USD/ton; USD/h	Revisión documental y cálculos del modelo	Registros de costos y simulación
Seguridad operativa	Exposición al riesgo	Horas-hombre expuestas; interacción hombre–máquina; eventos o incidentes potenciales	h-h; frecuencia	Análisis documental, literatura técnica y modelamiento	Registros de seguridad y evaluación comparativa

Nota. Elaboración propia. La operacionalización se formula en correspondencia con los objetivos, las hipótesis y el enfoque comparativo del estudio.

La Tabla 5 organiza las variables de manera compatible con el diseño metodológico de la investigación. En particular, permite distinguir que el objeto de comparación es el tipo de sistema de acarreo, mientras que los efectos esperados se expresan en productividad, eficiencia, costos y seguridad. Esta organización mejora la trazabilidad entre el planteamiento del problema, las hipótesis y el capítulo metodológico, atendiendo una de las observaciones centrales formuladas al borrador.

Síntesis del capítulo

En síntesis, el marco teórico desarrollado permite sustentar que el análisis de camiones de acarreo autónomos no debe restringirse a una visión tecnológica aislada. La literatura reciente muestra que el desempeño del acarreo es un fenómeno sistémico en el que convergen productividad, uso del tiempo, costos, seguridad, infraestructura digital y gestión organizacional. Los antecedentes internacionales y nacionales revisados confirman, además, que la simulación de eventos discretos constituye una herramienta metodológicamente consistente para comparar configuraciones de transporte bajo condiciones equivalentes. Con base en ello, el presente capítulo deja establecida la justificación conceptual y analítica para evaluar, en el caso de estudio, el impacto potencial de un sistema autónomo frente al esquema convencional de acarreo.

CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO

El presente capítulo expone el diseño metodológico adoptado para evaluar el impacto de la incorporación de camiones de acarreo autónomos en la productividad de una unidad minera del sur del Perú. En atención a las observaciones formuladas por la docente, se ha optado por una estructura metodológica estrictamente cuantitativa, basada en registros operativos, documentación técnica del sistema de acarreo y modelamiento computacional, prescindiendo de entrevistas, cuestionarios u otros instrumentos perceptuales cuya validación hubiera desviado el foco central del estudio.

La lógica del capítulo se apoya en la coherencia entre el problema de investigación, los objetivos específicos, las hipótesis y las variables definidas en los capítulos precedentes. En consecuencia, la metodología se organiza para diagnosticar el desempeño del sistema convencional, parametrizar un escenario autónomo técnicamente sustentado, comparar ambos contextos en condiciones equivalentes y derivar lineamientos para una eventual implementación progresiva.

3.1. Enfoque, tipo y diseño de la investigación

3.1.1. Enfoque de investigación

El estudio adopta un enfoque cuantitativo, debido a que trabaja con variables medibles expresadas en indicadores numéricos tales como toneladas transportadas, tiempo de ciclo, utilización de flota, costo unitario y horas-hombre expuestas a riesgo. De acuerdo con Hernández-Sampieri y Mendoza (2018), el enfoque cuantitativo permite analizar relaciones entre variables observables, comparar escenarios y sustentar inferencias a partir de mediciones objetivas. En este caso, dicho enfoque resulta pertinente porque el impacto de la automatización del acarreo se expresa fundamentalmente en cambios verificables del desempeño operativo.

3.1.2. Tipo y nivel de investigación

Por su finalidad, la investigación es aplicada, dado que busca resolver un problema práctico de la operación minera relacionado con la eficiencia del acarreo y la toma de decisiones sobre tecnologías de automatización. Por su nivel, se considera explicativa-evaluativa, en tanto pretende identificar la magnitud del efecto del tipo de sistema de acarreo sobre la productividad, la eficiencia operativa, los costos y la seguridad. Asimismo, el estudio incorpora una dimensión comparativa, porque contrasta una línea base convencional con un escenario

autónomo construido mediante simulación de eventos discretos, técnica ampliamente utilizada para representar sistemas complejos y dinámicos con restricciones de recursos y colas operativas (Law, 2015; Kelton et al., 2021).

3.1.3. Diseño de investigación

El diseño es no experimental, porque no existe manipulación directa de variables en el ambiente real de la unidad minera; en su lugar, se modela el comportamiento del sistema bajo supuestos explícitos y parámetros observados. También es transversal, ya que utiliza un periodo representativo de operación como base para construir la línea base del sistema convencional y, a partir de esta, simular el escenario autónomo. Finalmente, la estrategia metodológica corresponde a un estudio de caso único con modelamiento simulacional comparativo, enfoque apropiado cuando se busca comprender en profundidad un proceso crítico de una operación específica y proyectar el efecto de alternativas tecnológicas sin interrumpir la producción real.

La Tabla 3.1 sintetiza la clasificación metodológica del estudio y permite observar la correspondencia entre el enfoque asumido y la naturaleza del problema analizado.

Tabla 3.1

Clasificación metodológica de la investigación

Criterio	Caracterización metodológica
Enfoque	Cuantitativo
Finalidad	Aplicada
Nivel	Explicativa-evaluativa con contraste comparativo
Diseño general	No experimental
Temporalidad	Transversal
Estrategia	Estudio de caso único
Diseño específico	Simulación de eventos discretos con comparación entre escenario convencional y escenario autónomo

Nota. Elaboración propia. La tabla resume los rasgos esenciales del diseño metodológico y facilita la verificación de coherencia entre el problema de investigación, las variables de estudio y la estrategia analítica adoptada.

Como se aprecia en la Tabla 3.1, la investigación no persigue una implementación operativa real en campo, sino una evaluación técnica sustentada en datos y simulación. Esta precisión

resulta importante porque delimita el alcance del estudio y evita confundir la comparación metodológica entre escenarios con una intervención experimental sobre la operación minera.

3.2. Ámbito, unidad de análisis, alcances y limitaciones

3.2.1. Ámbito espacial y temporal del estudio

El ámbito espacial corresponde a una unidad minera a tajo abierto ubicada en el sur del Perú, cuyo proceso de acarreo constituye el objeto central de evaluación. El ámbito temporal se circunscribe al periodo operacional seleccionado como base de análisis, correspondiente al mes de julio de 2024, el cual se considera representativo por registrar condiciones normales de operación sin eventos extraordinarios que distorsionen la lectura de la línea base. La elección de un periodo representativo favorece la estabilidad de los parámetros utilizados en la simulación y mejora la confiabilidad de la comparación entre escenarios.

3.2.2. Unidad de análisis

La unidad de análisis primaria es cada ciclo individual de acarreo registrado por el sistema de gestión de flota, entendido como la secuencia compuesta por carga, viaje cargado, descarga, viaje vacío y espera en cola. A nivel agregado, también constituyen unidades analíticas los indicadores de desempeño del sistema, tales como toneladas por día, costo por tonelada, disponibilidad, utilización y horas-hombre expuestas a riesgo. Esta doble mirada —micro, por ciclo; y macro, por sistema— permite evaluar tanto la estructura operativa del acarreo como los efectos globales de la automatización.

3.2.3. Alcances y limitaciones

El estudio abarca la caracterización del sistema de acarreo convencional, la parametrización de un escenario autónomo técnicamente sustentado, la comparación de indicadores operativos, y la formulación de lineamientos para una implementación progresiva. No obstante, la investigación presenta algunas limitaciones: se centra en una sola unidad minera, no evalúa impactos ambientales, no incorpora análisis normativo detallado y modela el escenario autónomo a partir de supuestos explícitos que deben ser leídos como aproximaciones técnicas bajo condiciones controladas. Estas limitaciones no invalidan el estudio, pero sí delimitan el alcance de sus resultados y su nivel de generalización.

La Tabla 3.2 resume el ámbito, las unidades analíticas y los principales alcances y limitaciones del estudio, con el propósito de fijar los límites metodológicos desde el inicio del capítulo.

Tabla 3.2

Delimitación metodológica del estudio

Aspecto	Descripción	Implicancia metodológica
Ámbito espacial	Unidad minera a tajo abierto del sur del Perú	Permite desarrollar un estudio de caso único con profundidad analítica.
Ámbito temporal	Mes operacional base: julio de 2024	Asegura homogeneidad en la línea base y evita mezclar periodos con condiciones no comparables.
Unidad de análisis primaria	Ciclo individual de acarreo	Permite modelar tiempos, colas, desplazamientos y variabilidad operativa.
Unidad de análisis agregada	Indicadores del sistema de acarreo	Facilita la comparación integral de productividad, eficiencia, costos y seguridad.
Alcance	Comparación entre escenario convencional y escenario autónomo	Orienta la investigación hacia el contraste de desempeño bajo condiciones equivalentes.
Limitación principal	Modelamiento de una sola operación	Restringe la generalización de resultados a otros contextos sin ajuste previo.

Nota. Elaboración propia. La tabla establece los límites del estudio y precisa cómo cada delimitación condiciona la lectura de los resultados que se obtendrán en el capítulo siguiente.

La Tabla 3.2 muestra que la investigación posee un alcance concreto y controlado. Esta delimitación es metodológicamente conveniente, porque evita sobreextender las conclusiones y permite que la comparación entre escenarios repose en un conjunto de supuestos claramente definidos y verificables.

3.3. Población, muestra y criterio de selección de datos

3.3.1. Población de estudio

La población está conformada por la totalidad de ciclos de acarreo registrados por la flota en el periodo base seleccionado, así como por los registros complementarios necesarios para describir el desempeño del sistema: reportes de producción, consumo de combustible, mantenimiento y seguridad operativa. Debido a que la investigación se sustenta en datos operacionales, la población no se define en términos de personas o encuestados, sino de eventos, registros y unidades productivas vinculadas al proceso de acarreo.

3.3.2. Muestra y técnica de muestreo

La investigación adopta un muestreo censal o censo operacional. Esto significa que se trabaja con la totalidad de registros disponibles del periodo seleccionado y no con una fracción muestral. Este criterio resulta pertinente porque el estudio no busca estimar parámetros poblacionales a partir de una muestra probabilística, sino caracterizar integralmente el comportamiento del sistema real durante un mes operacional representativo y utilizar esa línea base para calibrar el modelo de simulación.

3.3.3. Criterios de inclusión y exclusión de registros

Se incluirán los registros completos de ciclos de acarreo asociados a la operación regular de la flota durante el periodo base. Se excluirán registros incompletos, duplicados, extraordinarios o claramente atípicos que correspondan a paradas mayores, contingencias extraordinarias, condiciones climáticas extremas o eventos no representativos de la operación normal. Este proceso de depuración tiene por finalidad mejorar la calidad del conjunto de datos y evitar que el modelo sea calibrado con observaciones que no reflejen el comportamiento usual del sistema.

La Tabla 3.3 organiza la población, la muestra y los criterios de depuración de registros empleados en la investigación.

Tabla 3.3

Población, muestra y criterios de selección de registros

Componente	Definición	Criterio metodológico	Propósito
Población	Totalidad de ciclos de acarreo y registros operativos del periodo base	Cobertura integral del sistema	Caracterizar el comportamiento real del proceso de transporte.
Muestra	No aplica muestra parcial; se trabaja con censo operacional	Muestreo censal	Evitar sesgos derivados de seleccionar solo una parte de los registros.
Inclusión	Registros completos, coherentes y representativos de operación normal	Depuración documental	Asegurar calidad y trazabilidad de la información empleada.
Exclusión	Registros duplicados, incompletos o extraordinarios	Control de calidad de base de datos	Eliminar observaciones que distorsionen la línea base y la calibración del modelo.

Nota. Elaboración propia. La tabla explicita por qué el estudio utiliza un censo operacional y cómo se asegura la depuración de la base de datos antes de la parametrización del modelo.

Como se observa en la Tabla 3.3, la fortaleza del diseño radica en trabajar con la totalidad del periodo operacional seleccionado. Ello reduce la incertidumbre asociada al muestreo y permite que la comparación entre escenarios se apoye en una línea base más estable y representativa.

3.4. Variables, dimensiones e instrumentos documentales

3.4.1. Operacionalización de variables

La operacionalización traduce las variables conceptuales del estudio en dimensiones, indicadores y fuentes concretas de información, de manera que puedan ser observadas, medidas y posteriormente contrastadas en los resultados. En esta investigación, la variable independiente se expresa en el tipo de sistema de acarreo evaluado, mientras que las variables

dependientes se manifiestan en indicadores de productividad, eficiencia operativa, costos y seguridad. La definición operacional se orienta a asegurar trazabilidad entre objetivos, hipótesis, instrumentos y análisis final.

La Tabla 3.4 presenta la matriz de operacionalización, la cual constituye el eje de articulación entre las variables del estudio y los datos requeridos para su análisis.

Tabla 3.4

Matriz de operacionalización de variables

Variable	Definición operacional	Dimensión	Indicador	Unidad	Fuente
Tipo de sistema de acarreo (independiente)	Condición operativa comparada en el modelo	Configuración tecnológica	Escenario convencional / escenario autónomo	Categoría	Modelo de simulación y supuestos de parametrización
Productividad del acarreo	Volumen de material transportado por unidad de tiempo	Rendimiento del sistema	Toneladas por hora; toneladas por día; ciclos por camión-día	t/h; t/día; ciclos	Dispatch y salidas del modelo
Eficiencia operativa	Grado de aprovechamiento del tiempo disponible del sistema	Desempeño operacional	Tiempo de ciclo; disponibilidad; utilización; tiempo de espera	min; %	Dispatch, mantenimiento y salidas del modelo
Costo operativo unitario	Costo del acarreo por volumen transportado	Costo del sistema	Costo por tonelada; costo horario por camión; consumo específico	USD/t; USD/h; gal/t	Registros contables, combustible y modelo
Seguridad operativa	Nivel de exposición del personal a condiciones de riesgo y eventos asociados al acarreo	Exposición y ocurrencia	Horas-hombre expuestas; tasa de incidentes; interacciones hombre-máquina eliminadas	h-h/mes; tasa	Reportes de seguridad y estimaciones del modelo

Nota. Elaboración propia. La matriz muestra la correspondencia entre variables, indicadores y fuentes de información, y servirá de base para la construcción de tablas de resultados, discusión y conclusiones.

La Tabla 3.4 evidencia que cada variable fue traducida a indicadores observables y medibles, condición indispensable para demostrar, al final de la tesis, el cumplimiento de los objetivos y la contrastación de las hipótesis planteadas. Esta relación directa fortalece la consistencia interna del estudio y responde a la exigencia docente de desarrollar y validar todo lo declarado en la fase de planteamiento.

3.4.2. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

En coherencia con el enfoque cuantitativo adoptado, la recolección de datos se realiza mediante técnicas documentales y de sistematización operacional. No se emplean entrevistas ni cuestionarios, debido a que el estudio no pretende indagar percepciones, actitudes o valoraciones subjetivas, sino analizar el comportamiento de un sistema productivo a partir de registros reales y documentación técnica. Por consiguiente, los instrumentos utilizados corresponden a matrices de extracción, consolidación y verificación de datos, además del propio modelo computacional desarrollado en SimPy.

La Tabla 3.5 resume las técnicas e instrumentos efectivamente utilizados en la investigación, destacando su relación con las fuentes documentales y las variables del estudio.

Tabla 3.5

Técnicas e instrumentos documentales de recolección y sistematización de datos

Técnica	Fuente	Instrumento	Información obtenida	Aplicación en la tesis
Revisión documental	Sistema de dispatch y reportes operativos	Ficha de extracción de datos operativos	Tiempos de ciclo, colas, producción, utilización	Construcción de línea base convencional
Revisión documental	Registros de mantenimiento y combustible	Matriz de consolidación de costos y disponibilidad	Disponibilidad mecánica, consumo y costos del sistema	Parametrización de costos y eficiencia
Revisión documental	Reportes de seguridad y ocurrencias	Ficha de registro de seguridad operativa	Horas-hombre expuestas e incidentes asociados	Análisis comparativo de seguridad

Análisis técnico documental	Fichas y manuales del fabricante	Ficha de parámetros técnicos del equipo	Capacidades nominales, compatibilidad de equipos y restricciones operativas	Sustento técnico del modelo
Modelamiento computacional	Software Python-SimPy	Modelo de simulación de eventos discretos	Salidas de productividad, eficiencia, costo y seguridad	Evaluación del escenario autónomo y comparación final

Nota. Elaboración propia. La tabla consigna exclusivamente instrumentos documentales y computacionales, coherentes con la naturaleza cuantitativa del estudio. No se incluyen entrevistas ni cuestionarios por no ser necesarios para la medición de las variables operativas analizadas.

Como se advierte en la Tabla 3.5, los instrumentos seleccionados responden directamente a los requerimientos del problema de investigación. Al prescindirse de instrumentos perceptuales, la validación se centra en la trazabilidad de la fuente, la consistencia de la base de datos y la confiabilidad del modelo, en lugar de recurrir a procedimientos de validación por juicio de expertos propios de cuestionarios o escalas actitudinales.

3.4.3. Criterios de validez y confiabilidad de la información

La validez de la información se asegura mediante tres criterios. El primero es la validez de contenido, garantizada por la correspondencia entre los objetivos específicos, las variables operacionalizadas y los campos efectivamente extraídos de los registros. El segundo es la validez de fuente, que exige que todo parámetro utilizado provenga de documentación trazable: reportes operativos, registros internos o manuales del fabricante. El tercero es la validez del modelo, que se verifica a través de la coherencia lógica del flujo, la calibración frente a la línea base y la estabilidad de las salidas al repetir simulaciones con diferentes semillas aleatorias. De manera complementaria, la confiabilidad se fortalece mediante la depuración de registros, el uso de reglas uniformes de procesamiento y la conservación de una cadena de trazabilidad entre dato original, base consolidada y salida final del modelo.

La Tabla 3.6 presenta los criterios de validez y confiabilidad aplicados al proceso de recolección, sistematización y modelamiento de la información.

Tabla 3.6

Criterios de validez y confiabilidad del diseño metodológico

Criterio	Descripción	Aplicación en el estudio
Validez de contenido	Coherencia entre objetivos, variables, indicadores e instrumentos	Se verificó que cada objetivo específico cuente con información observable y técnica de análisis asociada.
Validez de fuente	Uso de documentos trazables y verificables	Se priorizaron registros operativos internos y manuales/fichas del fabricante.
Validez del modelo	Correspondencia entre comportamiento simulado y línea base observada	Se calibró el modelo con parámetros del sistema real y se revisó su lógica de operación.
Confiabilidad de datos	Consistencia del procesamiento y depuración	Se aplicaron criterios uniformes para excluir duplicados, incompletos y registros atípicos.
Confiabilidad de resultados	Estabilidad de las salidas del modelo	Se consideraron replicaciones y análisis de sensibilidad para evaluar robustez.

Nota. Elaboración propia. La tabla resume los mecanismos utilizados para asegurar que el estudio conserve rigor metodológico aun cuando no emplee entrevistas ni cuestionarios como instrumentos primarios.

La Tabla 3.6 permite sostener que la metodología no queda incompleta por omitir instrumentos cualitativos; por el contrario, se refuerza al concentrarse en procedimientos de validación acordes con el tipo de datos realmente utilizados. Esta decisión metodológica incrementa la coherencia del estudio y mejora su defensa académica.

3.5. Materiales de estudio y parámetros técnicos del sistema de acarreo

En atención a la observación docente relativa a no consignar capacidades “aproximadas”, el presente estudio incorpora como referencia técnica documentación del fabricante para los equipos de la clase de carguío y transporte modelados. Para la parametrización metodológica del sistema se adopta como referente un camión minero de gran tonelaje comercialmente disponible en minería latinoamericana, el Komatsu 930E-5SE, junto con una excavadora hidráulica Komatsu PC7000-11 compatible con camiones de la clase 240-400 short tons. Esta

elección tiene por finalidad dotar de sustento técnico objetivo a las capacidades empleadas en el modelo, sin perjuicio de que la versión integrada de la tesis pueda ajustar el nombre exacto del equipo a la flota específica de la unidad estudiada con base en sus propios registros y manuales oficiales.

La ficha técnica del Komatsu 930E-5SE reporta una capacidad nominal de 290 t métricas (320 short tons), una potencia bruta de 2 611 kW (3 500 HP) y un peso operativo de 521 631 kg; por su parte, la PC7000-11 presenta una configuración estándar de balde de 38 m³ y compatibilidad declarada con camiones de 240 a 400 short tons, lo que la convierte en una referencia razonable para estudios de combinación pala-camión en gran minería (Komatsu, 2021a, 2021b).

La Tabla 3.7 consolida los parámetros técnicos de referencia que se emplearán en la construcción metodológica del sistema de estudio y en la verificación de compatibilidad entre equipos.

Tabla 3.7

Parámetros técnicos de referencia del sistema de carguío y transporte

Equipo / criterio	Parámetro	Valor de referencia	Sustento técnico
Camión Komatsu 930E-5SE	Capacidad nominal	290 t métricas (320 short tons)	Ficha técnica del fabricante
Camión Komatsu 930E-5SE	Potencia bruta	2 611 kW (3 500 HP)	Ficha técnica del fabricante
Camión Komatsu 930E-5SE	Peso operativo	521 631 kg	Ficha técnica del fabricante
Excavadora Komatsu PC7000-11	Configuración estándar de balde	38 m³	Ficha técnica del fabricante
Excavadora Komatsu PC7000-11	Compatibilidad con camión	240-400 short tons	Ficha técnica del fabricante
Sistema de estudio	Distancia media de acarreo	5 km	Registro operacional del caso de estudio
Sistema de estudio	Número de camiones modelados	10 unidades	Configuración operacional de la línea base
Sistema de estudio	Número de equipos de carguío	2 unidades	Configuración operacional de la línea base

Nota. Nota de contenido. Los valores de capacidad y compatibilidad consignados para los equipos de referencia proceden de documentación técnica del fabricante; los datos de distancia y número de equipos corresponden a la configuración del caso de estudio. Esta tabla cumple la función de evitar el uso de capacidades expresadas de manera aproximada.

Como se aprecia en la Tabla 3.7, la metodología incorpora parámetros técnicos verificables y no estimaciones vagas de capacidad. Esta decisión fortalece la solidez del modelo y atiende de manera directa la observación formulada por la docente respecto a la necesidad de basar las capacidades de los equipos en manuales o fichas del fabricante.

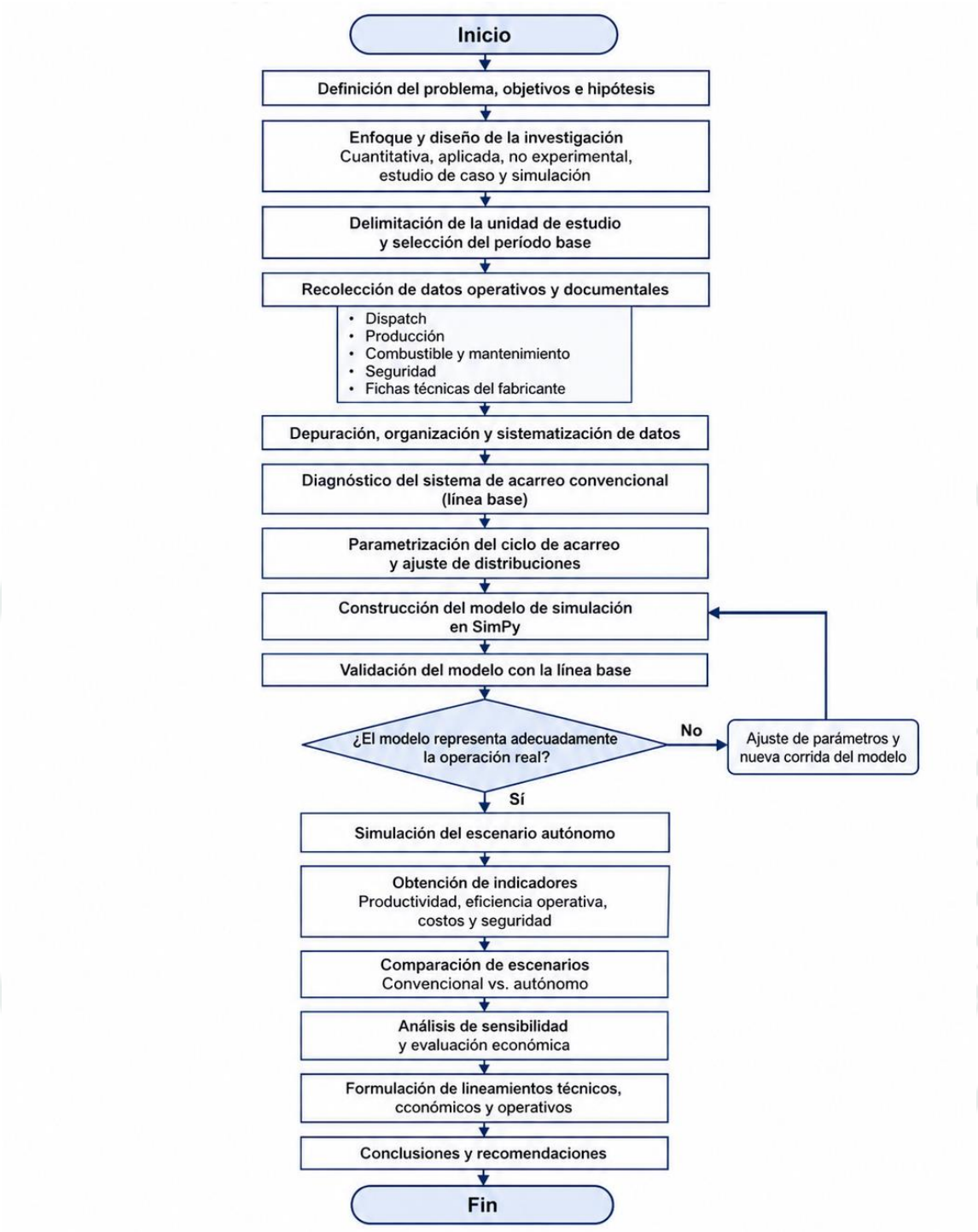
3.6. Procedimiento metodológico

El procedimiento metodológico se desarrolló de manera secuencial y acumulativa. En una primera fase se recopilaron y depuraron los registros operativos del sistema convencional. En una segunda fase se definieron las variables, parámetros y supuestos del modelo. Posteriormente se construyó el modelo de simulación en SimPy, se verificó su funcionamiento lógico y se calibró con la línea base. En una cuarta fase se ejecutaron las corridas del escenario autónomo y se compararon los resultados con el sistema convencional. Finalmente, se desarrolló el análisis de sensibilidad y la evaluación económico-operativa para sustentar los lineamientos de implementación.

Con fines de ordenamiento visual, a continuación se presenta el flujograma metodológico de la investigación.

Figura 3.1

Flujograma metodológico de la investigación



Nota. Elaboración propia. El flujograma representa de manera secuencial las fases de recopilación, depuración, parametrización, simulación, validación, comparación y formulación de lineamientos.

La Figura 3.1 sintetiza la lógica secuencial descrita en el procedimiento metodológico y preserva la coherencia entre la narrativa del estudio y la representación gráfica del proceso.

La Tabla 3.8 presenta de manera analítica las fases del procedimiento metodológico y los productos esperados en cada una de ellas.

Tabla 3.8

Fases del procedimiento metodológico y productos esperados

Fase	Descripción	Producto principal	Vinculación con objetivo específico
Fase 1. Recopilación y depuración	Reunión, limpieza y organización de registros de dispatch, producción, mantenimiento, combustible y seguridad.	Base de datos consolidada de línea base	OE1
Fase 2. Parametrización	Definición de variables, distribuciones, restricciones, compatibilidad de equipos y supuestos del modelo.	Matriz de parámetros del sistema	OE1 y OE2
Fase 3. Construcción del modelo	Programación del sistema de eventos discretos en Python-SimPy.	Modelo computacional funcional	OE2
Fase 4. Verificación y calibración	Revisión lógica del flujo y ajuste del modelo frente a la línea base observada.	Modelo verificado y calibrado	OE2
Fase 5. Simulación y comparación	Ejecución de corridas para escenario autónomo y contraste con escenario convencional.	Tablas de resultados comparativos	OE3
Fase 6. Sensibilidad y lineamientos	Evaluación de robustez y formulación de implicancias técnicas, económicas y operativas.	Lineamientos de implementación	OE4

Nota. Elaboración propia. La tabla ordena secuencialmente el proceso metodológico y demuestra cómo cada fase produce información necesaria para responder a los objetivos específicos de la investigación.

La Tabla 3.8 permite advertir que el procedimiento no se limita a "simular" un escenario autónomo, sino que integra previamente etapas de depuración, parametrización, verificación y

calibración. Esta secuencia es necesaria para que los resultados comparativos posteriores sean técnicamente defendibles.

3.7. Construcción, verificación y validación del modelo de simulación

3.7.1. Lógica de construcción del modelo

El modelo de simulación fue concebido para representar el flujo cíclico de cada camión de acarreo dentro del sistema: espera para carga, carga, viaje cargado, espera/descarga en destino y retorno vacío. Cada camión se modela como una entidad dinámica que compite por recursos compartidos —equipos de carguío y punto de descarga— generando colas y tiempos de espera. Esta estructura permite captar el efecto de la variabilidad operacional y medir sus repercusiones en los indicadores clave del sistema.

3.7.2. Parámetros constantes y variables entre escenarios

Para que la comparación sea metodológicamente válida, ambos escenarios mantienen constantes las condiciones geométricas y estructurales del sistema, mientras que solo se modifican aquellos parámetros directamente vinculados con la automatización. Esto evita atribuir al cambio tecnológico efectos que en realidad podrían provenir de variaciones en la ruta, en la demanda o en la configuración física de la operación.

La Tabla 3.9 resume los parámetros que se mantienen constantes y aquellos que varían entre el escenario convencional y el escenario autónomo.

Tabla 3.9

Parámetros constantes y parámetros de cambio entre escenarios

Categoría	Se mantiene constante	Se modifica entre escenarios
Geometría y demanda	Ruta, distancia media, puntos de carga/descarga, demanda de transporte	No aplica
Configuración física	Número de camiones y equipos de carguío, capacidad nominal de referencia	No aplica
Operación humana vs. autónoma	No aplica	Cambios de turno, refrigerio, nivel de utilización, tiempos de espera, consistencia de conducción

Mantenimiento	Esquema general de disponibilidad programada	Mejora esperada por monitoreo y mayor control operativo en escenario autónomo
Seguridad operativa	Condiciones del circuito y zonas de riesgo	Exposición del personal e interacciones hombre-máquina

Nota. Elaboración propia. La tabla muestra la lógica comparativa del diseño y evita que la variación de resultados sea atribuida a cambios ajenos a la automatización del sistema de acarreo.

Como se observa en la Tabla 3.9, la comparación se construye bajo el principio de equivalencia operativa. Gracias a ello, las diferencias encontradas posteriormente pueden interpretarse como efecto del tipo de sistema de acarreo y no como consecuencia de alteraciones externas al modelo.

3.7.3. Verificación y validación del modelo

La verificación del modelo se orienta a comprobar que la programación represente correctamente la lógica del sistema, es decir, que las secuencias, colas, recursos y eventos funcionen conforme al proceso real observado. La validación, en cambio, se refiere a comprobar que las salidas del modelo reproduzcan de manera razonable el comportamiento de la línea base del sistema convencional. Para ello se compararán los valores simulados con los indicadores históricos y se evaluará el ajuste de las distribuciones utilizadas para representar la variabilidad de los tiempos del ciclo. Asimismo, se utilizarán múltiples replicaciones con diferentes semillas aleatorias para reducir el sesgo asociado a una sola corrida y generar intervalos de confianza en los indicadores principales.

3.8. Plan de procesamiento y análisis de datos

3.8.1. Procesamiento de la información

El procesamiento de la información comprende la extracción de registros, la depuración de bases de datos, la estandarización de unidades, la consolidación de variables y la codificación de parámetros para su uso en el modelo. Las bases operativas serán organizadas en hojas de trabajo y procesadas mediante Python y bibliotecas de análisis de datos, con el fin de obtener medidas descriptivas, verificar consistencia interna y preparar los insumos necesarios para la simulación.

3.8.2. Análisis descriptivo y ajuste de distribuciones

En una primera etapa se calcularán medidas de tendencia central y dispersión para los tiempos del ciclo y los indicadores históricos de la línea base. Posteriormente, se evaluará el comportamiento probabilístico de los componentes del ciclo mediante pruebas de bondad de ajuste, con el propósito de seleccionar distribuciones apropiadas para el modelo. Este análisis es fundamental porque la simulación de eventos discretos requiere representar explícitamente la variabilidad de los procesos y no solo sus promedios.

3.8.3. Análisis comparativo, sensibilidad y evaluación económica

Una vez obtenidas las salidas del modelo, se realizará la comparación entre escenarios mediante diferencias absolutas y relativas en productividad, eficiencia, costo y seguridad. Luego se efectuará un análisis de sensibilidad sobre parámetros críticos del sistema con la finalidad de evaluar la robustez de los resultados. Finalmente, se desarrollará una evaluación económico-operativa que incluya ahorro proyectado, período de recuperación, retorno sobre la inversión y otros indicadores financieros pertinentes para sustentar la factibilidad de una eventual implementación.

La Tabla 3.10 relaciona cada objetivo específico con la fuente de datos y la técnica de análisis correspondiente, mostrando de manera explícita cómo el capítulo metodológico asegura la posterior validación de objetivos e hipótesis.

Tabla 3.10

Correspondencia entre objetivos específicos, fuentes y técnicas de análisis

Objetivo específico	Fuente principal	Técnica de análisis	Producto esperado
Diagnosticar el sistema convencional	Dispatch, producción, mantenimiento, combustible y seguridad	Análisis descriptivo y composición del ciclo	Línea base del sistema convencional
Modelar el escenario autónomo	Parámetros operativos y fichas técnicas del fabricante	Simulación de eventos discretos	Escenario autónomo parametrizado
Comparar ambos escenarios	Salidas del modelo y línea base observada	Análisis comparativo e intervalos de confianza	Resultados comparativos de impacto
Formular lineamientos	Resultados comparativos, sensibilidad y evaluación económica	Análisis interpretativo y técnico-operativo	Propuesta de lineamientos de implementación

Nota. Elaboración propia. La tabla garantiza trazabilidad entre lo que la tesis se propone hacer y el modo en que efectivamente será demostrado en los capítulos de resultados, discusión y conclusiones.

La Tabla 3.10 constituye una pieza de control metodológico relevante, porque permite verificar que cada objetivo específico cuenta con una fuente, una técnica y un producto analítico definidos. Esta trazabilidad facilitará, al final de la tesis, demostrar el cumplimiento de objetivos y la contrastación de hipótesis, tal como fue exigido en las observaciones docentes.

3.9. Consideraciones éticas y de manejo de la información

La investigación utilizará información operativa de carácter técnico, por lo que se resguardará la confidencialidad de los datos identificatorios de la unidad minera, evitando exponer denominaciones comerciales, códigos sensibles o información estratégica no necesaria para la comprensión académica del estudio. Los resultados se presentarán con fines exclusivamente académicos y de análisis metodológico. Asimismo, la documentación técnica de fabricantes será citada como fuente de referencia para capacidades y compatibilidades de equipos, respetando su uso como información pública de soporte técnico.

3.10. Cierre metodológico del capítulo

En síntesis, el presente marco metodológico ha sido reformulado para responder a una lógica de investigación cuantitativa, documental y simulacional, eliminando instrumentos cualitativos no indispensables y fortaleciendo la relación entre variables, fuentes, técnicas de análisis y resultados esperados. El capítulo deja establecidas las bases para que el análisis del sistema convencional, la construcción del escenario autónomo y la comparación entre ambos se desarrollen con mayor rigor, trazabilidad y coherencia frente a las observaciones académicas realizadas al borrador inicial.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1.1. Caracterización de la línea base del sistema de acarreo convencional

Con el propósito de establecer la línea base operativa de la investigación, se realizó el diagnóstico del sistema de acarreo convencional correspondiente al período de julio de 2024. Este diagnóstico se sustentó en la revisión y sistematización de registros operativos del sistema de dispatch, reportes de producción, datos de combustible y mantenimiento, así como partes de seguridad y ocurrencias de la unidad minera. En concordancia con el diseño metodológico reformulado, esta etapa no se apoyó en entrevistas ni cuestionarios, sino en fuentes documentales y operativas directamente vinculadas al proceso de acarreo.

La línea base definida en este objetivo constituye el punto de referencia para el análisis comparativo posterior entre el sistema convencional y el escenario de operación con camiones autónomos. Por ello, fue necesario identificar primero la configuración operativa de la flota, las características del ciclo de acarreo y los principales indicadores de desempeño del sistema actual.

4.1.2. Configuración operativa del sistema de acarreo convencional

La primera etapa del diagnóstico consistió en caracterizar la configuración operativa del sistema evaluado. Como se presenta en la **Tabla 1**, la unidad minera opera con una flota de 10 camiones de acarreo de 320 toneladas de capacidad nominal, apoyados por 2 palas de carguío, con una distancia promedio de transporte de 5 km y una operación programada de 24 horas diarias distribuidas en dos turnos de 12 horas. La disponibilidad mecánica base registrada fue de 82%, lo que representa el grado de tiempo en que los equipos se encuentran aptos para operar dentro del período programado.

Tabla 1

Configuración operativa del sistema de acarreo convencional

Parámetro	Valor
Flota total	10 camiones
Capacidad nominal por camión	320 toneladas
Número de palas cargadoras	2 unidades
Distancia promedio de acarreo	5 km

Régimen de operación	2 turnos de 12 horas
Horas programadas de operación diaria	24 horas
Disponibilidad mecánica	82%

Nota. Elaboración propia con base en los registros operativos del sistema de acarreo convencional del período de análisis. La tabla resume la configuración técnica y operativa utilizada como línea base para el diagnóstico del objetivo específico 1. Adaptado de los datos del borrador de resultados y de la caracterización del sistema de estudio.

La información de la Tabla 1 muestra que el sistema evaluado corresponde a una operación de acarreo de gran escala, con una flota de alto tonelaje y régimen continuo. Esta configuración hace que el rendimiento del acarreo dependa no solo de la capacidad nominal de los equipos, sino también de la coordinación del ciclo carga-transporte-descarga-retorno, de la disponibilidad real de la flota y del nivel de utilización efectiva sobre el tiempo disponible. En consecuencia, el análisis del desempeño no puede limitarse a la capacidad teórica de los camiones, sino que debe centrarse en el comportamiento real del sistema durante la operación.

4.1.3. Estructura del ciclo de acarreo convencional

Luego de caracterizar la flota, se analizó la estructura temporal del ciclo de acarreo convencional. El ciclo está conformado por cinco componentes operativos principales: tiempo de carga, viaje cargado, descarga, viaje vacío y espera en cola. Como se observa en la **Tabla 2**, el tiempo de ciclo promedio alcanzó 42.0 minutos, siendo el viaje cargado la etapa de mayor peso relativo, con 35.7% del ciclo total, seguido por el viaje vacío, con 23.8%, y la espera en cola, con 19.0%.

Tabla 2

Desglose del ciclo de acarreo convencional

Componente del ciclo	Tiempo promedio	% del ciclo total
Tiempo de carga	5.0 min	11.9%
Tiempo de viaje cargado	15.0 min	35.7%
Tiempo de descarga	4.0 min	9.5%
Tiempo de viaje vacío	10.0 min	23.8%
Tiempo de espera en cola	8.0 min	19.0%

Tiempo total de ciclo	**42.0 min**	**100%**

Nota. Elaboración propia con base en la sistematización de tiempos del sistema de acarreo convencional. La tabla presenta la composición temporal del ciclo promedio y permite identificar las etapas de mayor incidencia en el rendimiento operativo.

Los resultados de la Tabla 2 evidencian que la espera en cola representa casi una quinta parte del ciclo total, lo que revela una pérdida operativa relevante asociada a la interacción entre camiones, palas y punto de descarga. Desde el punto de vista del diagnóstico, este hallazgo es importante porque muestra que parte del bajo aprovechamiento del sistema no se explica por la capacidad de los equipos en sí misma, sino por ineficiencias en la secuencia operativa y en la sincronización del despacho.

De manera complementaria, se identificaron tiempos improductivos adicionales no incorporados de forma explícita en los registros tradicionales del dispatch, tales como 30 minutos por cambio de turno dos veces al día y aproximadamente 60 minutos acumulados de pausas de refrigerio por conductor. Aunque estos tiempos no forman parte directa del ciclo unitario mostrado en la tabla, sí afectan el nivel global de utilización de la flota y reducen las horas efectivas de operación del sistema.

4.1.4. Indicadores de productividad del sistema convencional

Con la línea base operativa ya definida, se procedió a identificar los principales indicadores de productividad del sistema de acarreo convencional. La **Tabla 3** resume los valores obtenidos para toneladas transportadas por día, toneladas por hora, ciclos por camión-día, carga efectiva por ciclo y nivel de utilización de capacidad. Estos indicadores permiten caracterizar el rendimiento del sistema en términos de producción física transportada y aprovechamiento del equipo.

Tabla 3

Indicadores de productividad del sistema de acarreo convencional

Indicador	Valor	Unidad
Toneladas transportadas por día	57,728	ton/día
Toneladas transportadas por hora	2,406	ton/h

Ciclos completados por camión-día	6.8	ciclos
Toneladas efectivas por ciclo	280	ton/ciclo
Utilización de capacidad	87.5	%

Nota. Elaboración propia a partir de los registros operativos del sistema convencional. La tabla reúne los principales indicadores de productividad utilizados para caracterizar la línea base del proceso de acarreo.

Los resultados muestran que la productividad del sistema convencional se encuentra condicionada por una combinación de tiempos de ciclo elevados, utilización parcial de la capacidad nominal del camión y pérdidas operativas distribuidas a lo largo de la jornada. La carga efectiva por ciclo fue de 280 toneladas, equivalente a 87.5% de la capacidad nominal de 320 toneladas, lo que indica que, aun cuando la flota opera en una escala alta, no se está aprovechando plenamente su potencial técnico en todos los ciclos. Este comportamiento es consistente con un sistema de acarreo en el que la variabilidad del carguío, la espera y la coordinación operativa influyen directamente sobre el volumen realmente movilizado.

Desde la perspectiva del objetivo específico 1, estos resultados permiten afirmar que la línea base presenta una productividad funcional, pero todavía susceptible de mejora, especialmente si se considera que el sistema trabaja con una flota completa y con régimen continuo de operación programada. Por ello, el diagnóstico confirma la existencia de una brecha entre la capacidad técnica instalada y el rendimiento operativo efectivamente alcanzado.

4.1.5. Indicadores de eficiencia operativa

La productividad observada en el sistema convencional se comprende mejor al analizar conjuntamente sus indicadores de eficiencia operativa. La **Tabla 4** presenta el tiempo de ciclo promedio, la disponibilidad mecánica, la utilización sobre el tiempo disponible, las horas efectivas por día y el factor de operación, indicadores que permiten identificar el grado de aprovechamiento real del sistema de acarreo.

Tabla 4

Indicadores de eficiencia operativa del sistema de acarreo convencional

Indicador	Valor	Unidad

Tiempo de ciclo operativo	42.0	min
Disponibilidad mecánica	82	%
Utilización sobre disponible	70	%
Horas efectivas de operación por día	12.63	horas
Factor de operación	52.6	%

Nota. Elaboración propia con base en la línea base operativa del período de análisis. La tabla resume los principales indicadores de eficiencia utilizados para diagnosticar el aprovechamiento real del tiempo programado del sistema de acarreo.

La interpretación de la Tabla 4 permite identificar dos aspectos centrales. En primer lugar, la disponibilidad mecánica de 82% se ubica dentro de un rango operativo aceptable para una flota de acarreo de gran tonelaje. Sin embargo, la utilización sobre el tiempo disponible alcanza solo 70%, lo que significa que una proporción importante del tiempo en que los equipos se encuentran aptos para operar no se traduce en producción efectiva. En segundo lugar, el factor de operación de 52.6% y las 12.63 horas efectivas por día muestran que el tiempo realmente productivo es considerablemente menor al tiempo programado diario de 24 horas, lo que confirma la incidencia de detenciones, pausas, colas y otros tiempos improductivos sobre el desempeño global del sistema.

Estos resultados son especialmente relevantes para el objetivo específico 1, porque permiten demostrar que las restricciones del sistema convencional no se encuentran únicamente en la capacidad de los equipos, sino en la eficiencia con que se administra el tiempo de operación disponible. En otras palabras, la principal oportunidad de mejora no radica solo en mover equipos de mayor capacidad, sino en reducir pérdidas operativas y mejorar la continuidad del ciclo de acarreo.

4.1.6. Indicadores de costos operativos

Una vez determinada la productividad y la eficiencia del sistema, se evaluó su comportamiento económico a través de los costos operativos asociados al acarreo convencional. La **Tabla 5** presenta el costo mensual total, el costo unitario por tonelada transportada, el costo operativo por hora-camión y el consumo de combustible por tonelada

movilizada. Estos indicadores son fundamentales para el diagnóstico, ya que el acarreo constituye una de las actividades de mayor peso dentro del costo operativo minero.

Tabla 5

Indicadores de costos operativos del sistema de acarreo convencional

Indicador	Valor	Unidad
Costo total mensual	2,242,680	USD
Costo por tonelada transportada	0.777	USD/ton
Costo operativo por hora-camión	355	USD/h
Consumo de combustible	2.45	gal/ton

Nota. Elaboración propia con base en registros de costos operativos y parámetros del sistema de acarreo. La tabla muestra los principales indicadores económicos empleados para caracterizar la línea base del sistema convencional.

A fin de comprender la estructura del costo horario del camión, se desagregaron los principales componentes que intervienen en el costo de operación. Como se observa en la **Tabla 6**, el combustible constituye el rubro de mayor incidencia, seguido del mantenimiento, los neumáticos y la mano de obra del operador.

Tabla 6

Desglose del costo operativo por hora-camión del sistema convencional

Componente	Costo	Unidad
Combustible	180	USD/h
Mantenimiento	95	USD/h
Operador	35	USD/h
Neumáticos	45	USD/h
Total	**355**	**USD/h**

Nota. Elaboración propia. La tabla presenta la composición del costo operativo horario por camión y permite identificar los rubros de mayor incidencia económica dentro del sistema convencional de acarreo.

Los datos de las Tablas 5 y 6 muestran que el sistema convencional presenta una estructura de costos fuertemente influida por el consumo energético y por la permanencia de costos directos asociados al componente humano de conducción. Esto tiene implicancias importantes para la tesis, porque confirma que el diagnóstico del escenario base no solo debe leerse en términos de toneladas transportadas, sino también en términos de cuánto cuesta movilizar cada tonelada bajo la lógica operativa actual. En ese sentido, el valor de 0.777 USD/ton constituye un indicador de referencia clave para la comparación posterior con el escenario autónomo.

4.1.7. Indicadores de seguridad operativa

El diagnóstico del sistema convencional también incorporó la dimensión de seguridad operativa, en coherencia con el problema de investigación y con el planteamiento reformulado de la tesis. La **Tabla 7** presenta los principales indicadores de seguridad considerados en esta etapa: horas-hombre expuestas a riesgo, número de incidentes operacionales mensuales y tasa de incidentes por millón de toneladas transportadas.

Tabla 7

Indicadores de seguridad operativa del sistema de acarreo convencional

Indicador	Valor	Unidad
Horas-hombre expuestas a riesgo	7,200	h-h/mes
Incidentes operacionales mensuales	3.2	eventos/mes
Tasa de incidentes	0.055	incidentes/millón de toneladas

Nota. Elaboración propia con base en partes de seguridad y ocurrencias operativas del sistema de acarreo convencional. La tabla resume los indicadores utilizados para evaluar la exposición del personal y el comportamiento del sistema desde la perspectiva de seguridad operativa.

Los resultados de la Tabla 7 ponen en evidencia que el sistema convencional mantiene una exposición permanente del personal al circuito de acarreo. La magnitud de horas-hombre expuestas es consistente con una operación en la que los camiones son conducidos por operadores durante todo el régimen de trabajo, lo que incrementa la exposición a riesgos derivados de tránsito, maniobra, fatiga y condiciones variables del entorno. Aunque la tasa de incidentes reportada no es extremadamente elevada en términos absolutos, sí muestra que el

sistema base no está exento de eventos operacionales y que la seguridad constituye una dimensión crítica del diagnóstico, no un aspecto accesorio.

4.1.8. Comportamiento estadístico de la variabilidad del ciclo

Para complementar el diagnóstico de la línea base, se evaluó el comportamiento estadístico de algunos componentes del ciclo de acarreo mediante pruebas de bondad de ajuste. El objetivo de esta etapa fue verificar si la variabilidad observada en los tiempos del sistema convencional podía representarse mediante distribuciones estadísticas adecuadas para su posterior incorporación al modelo de simulación. La **Tabla 8** resume los resultados obtenidos para tiempo de carga, viaje cargado, espera en cola y descarga.

Tabla 8

Análisis estadístico de variabilidad del ciclo de acarreo convencional

Componente del ciclo	Distribución estadística	Estadístico K-S	p-value	Interpretación
Tiempo de carga	Lognormal	0.061	0.234	Ajuste válido
Tiempo de viaje cargado	Normal	0.045	0.456	Ajuste válido
Tiempo de espera en cola	Exponencial	0.078	0.187	Ajuste válido
Tiempo de descarga	Exponencial	0.052	0.389	Ajuste válido

Nota. Elaboración propia a partir de la evaluación estadística de los tiempos del ciclo convencional. Los valores de p superiores a 0.05 indican que no se rechaza la adecuación de las distribuciones propuestas para representar la variabilidad del sistema.

Los resultados indican que todos los p-values son mayores a 0.05, lo que respalda la validez estadística del ajuste realizado para los componentes evaluados. Desde la perspectiva metodológica, esto fortalece la consistencia de la línea base convencional y justifica el uso de dichas distribuciones en la parametrización del modelo de simulación que se desarrollará en el siguiente objetivo específico. En términos prácticos, ello significa que la operación real no solo fue descrita mediante promedios, sino también representada considerando su comportamiento variable.

4.1.9. Síntesis interpretativa del objetivo específico 1

En conjunto, los resultados obtenidos permiten concluir que el sistema de acarreo convencional de la unidad minera presenta una línea base operativa claramente caracterizada, con una flota de alto tonelaje, tiempos de ciclo de 42.0 minutos, una disponibilidad mecánica de 82%, utilización sobre disponible de 70%, costo unitario de 0.777 USD/ton y exposición mensual de 7,200 horas-hombre al circuito de riesgo. Estos resultados muestran que el sistema actual logra sostener la operación, pero bajo condiciones de eficiencia limitada, con tiempos improductivos relevantes y oportunidades claras de mejora en continuidad operativa, costo unitario y seguridad.

En función del objetivo específico 1, el diagnóstico confirma la existencia de una línea base convencional susceptible de optimización y proporciona los indicadores necesarios para contrastar, en los siguientes apartados, el desempeño de este sistema con el escenario de operación mediante camiones de acarreo autónomos. Desde la lógica de la tesis, este resultado también es consistente con la hipótesis específica que plantea una utilización efectiva de la flota inferior a 75% y la presencia de tiempos muertos significativos asociados al esquema convencional de operación.

4.2.1. Construcción del escenario autónomo de simulación

Una vez establecida la línea base del sistema de acarreo convencional, se procedió a modelar el escenario de operación con camiones de acarreo autónomos mediante simulación de eventos discretos en SimPy. Este escenario fue diseñado con el propósito de representar el comportamiento esperado de una flota autónoma operando bajo condiciones equivalentes de ruta, distancia de transporte, requerimiento de producción y configuración general del sistema, de manera que la comparación posterior entre escenarios se sostenga sobre una base homogénea.

El modelo construyó cada camión como una entidad operativa que ejecuta ciclos repetitivos de carga, viaje cargado, descarga, viaje vacío y reasignación, interactuando con recursos compartidos del sistema, principalmente las palas de carguío y el punto de descarga. A diferencia del escenario convencional, el escenario autónomo fue configurado con supuestos técnicos orientados a representar una operación continua, con menor variabilidad operativa, menor tiempo de espera en cola y mayor utilización de la flota.

4.2.2. Parámetros configurados para el escenario de operación autónoma

Para construir el escenario simulado se definieron parámetros comparativos entre el sistema convencional y el sistema autónomo. Como se presenta en la **Tabla 9**, los principales cambios incorporados en el modelo autónomo se concentraron en la mejora de disponibilidad mecánica, aumento de la utilización sobre el tiempo disponible, reducción del tiempo de espera en cola y eliminación de pausas asociadas al operador, tales como cambios de turno y refrigerios.

Tabla 9

Parámetros configurados para el escenario de operación autónoma

Parámetro	Escenario convencional	Escenario autónomo	Sustento técnico del modelamiento
Disponibilidad mecánica	82%	90%	Mejora atribuida a mantenimiento predictivo y mayor control del sistema
Utilización sobre disponible	70%	85%	Mejor coordinación operativa y despacho inteligente
Tiempo de espera en cola	8 min	3 min	Optimización dinámica de asignación y reducción de congestión
Tiempo por cambio de turno	30 min × 2/día	0 min	Operación sin relevo de conductor
Tiempo por refrigerio	60 min/día	0 min	Eliminación de pausas del operador
Velocidad operativa	Referencia base	Consistente y controlada	Menor variabilidad de conducción

Nota. Elaboración propia con base en la configuración del modelo autónomo presentada en el borrador de resultados. La tabla resume los parámetros que fueron modificados respecto del escenario convencional para representar la operación con camiones autónomos en condiciones equivalentes de análisis.

La Tabla 9 muestra que el escenario autónomo no fue modelado como una operación completamente distinta, sino como una configuración del mismo sistema de acarreo bajo una lógica de control más estable y continua. Esto es importante metodológicamente, porque

permite atribuir los cambios observados en los resultados a la automatización del sistema y no a alteraciones arbitrarias de la mina, de la distancia de acarreo o del tamaño de la flota. En consecuencia, el modelo conserva comparabilidad con la línea base y responde adecuadamente al objetivo específico 2.

4.2.3. Supuestos técnicos considerados en el escenario autónomo

La simulación del escenario autónomo se sustentó en un conjunto de supuestos técnicos orientados a representar el comportamiento esperado de un sistema de acarreo automatizado. Como se presenta en la **Tabla 10**, estos supuestos se relacionan con operación continua, optimización de rutas, consistencia de conducción y mejoras en mantenimiento.

Tabla 10

Supuestos técnicos aplicados en el modelamiento del escenario autónomo

Supuesto técnico	Descripción aplicada en el modelo	Efecto esperado en el desempeño
Operación continua 24/7	Eliminación de pausas por cambio de turno y refrigerio	Incremento de horas efectivas de operación
Optimización dinámica de rutas	Asignación operativa más eficiente hacia carga y descarga	Reducción de colas y tiempos de espera
Conducción controlada y homogénea	Menor dispersión en velocidades y maniobras	Disminución de variabilidad del ciclo
Mantenimiento predictivo	Mayor anticipación de fallas y menor detención correctiva	Incremento de disponibilidad mecánica

Nota. Elaboración propia. La tabla sintetiza los supuestos considerados para representar el funcionamiento del sistema autónomo en la simulación de eventos discretos. Estos supuestos se utilizaron únicamente para fines de modelamiento comparativo del escenario propuesto.

Los supuestos de la Tabla 10 permiten entender que la mejora del escenario autónomo no depende exclusivamente de la ausencia del conductor, sino de un conjunto integrado de condiciones operativas que incluyen estabilidad del ciclo, continuidad de operación y mayor control del sistema. Desde el punto de vista del modelamiento, estos supuestos fueron necesarios para representar de forma coherente el cambio tecnológico planteado por la tesis.

4.2.4. Configuración de la simulación y replicaciones

Con el fin de dotar al modelo de mayor robustez analítica, la simulación del escenario autónomo fue ejecutada bajo un esquema de múltiples replicaciones independientes. Como se resume en la **Tabla 11**, el horizonte de simulación fue de 30 días calendario, con un período de calentamiento de 1 día descartado, 30 replicaciones independientes y semillas aleatorias diferenciadas para cada corrida. Adicionalmente, se mantuvo un horizonte financiero de 10 años para la proyección económica posterior.

Tabla 11

Configuración de la simulación del escenario autónomo

Parámetro de simulación	Valor
Período de simulación	30 días calendario
Período de calentamiento (warm-up)	1 día descartado
Número de replicaciones	30
Semillas aleatorias	Diferentes para cada réplica
Horizonte de análisis económico posterior	10 años

Nota. Elaboración propia a partir de la configuración del modelo de simulación. La tabla presenta los criterios operativos definidos para ejecutar el escenario autónomo y obtener resultados agregados con menor sensibilidad a la variación aleatoria de una sola corrida.

La configuración mostrada en la Tabla 11 refuerza la consistencia del ejercicio de simulación, ya que evita que los resultados del escenario autónomo dependan de una única ejecución del modelo. De esta forma, los indicadores reportados posteriormente representan el comportamiento medio esperado del sistema y no un resultado aislado condicionado por una semilla específica.

4.2.5. Resultados de productividad del escenario autónomo

Luego de ejecutar las 30 replicaciones del modelo, se obtuvieron los indicadores agregados de productividad del escenario autónomo. La **Tabla 12** muestra la media, la desviación estándar y los intervalos de confianza al 95% para toneladas transportadas por día, toneladas por hora y ciclos completados por camión-día.

Tabla 12

Indicadores de productividad del escenario autónomo

Indicador	Media	Desviación estándar	IC 95% inferior	IC 95% superior
Toneladas transportadas por día	102,177	2,145	101,289	103,065
Toneladas transportadas por hora	4,341	91	4,309	4,373
Ciclos completados por camión-día	11.8	0.24	11.71	11.89

Nota. Elaboración propia a partir de las 30 replicaciones del modelo de simulación autónomo. La tabla resume el comportamiento esperado del sistema en términos de productividad física transportada bajo condiciones de operación automatizada.

Los resultados evidencian un desempeño productivo superior al observado en la línea base convencional. La media de 102,177 ton/día y 4,341 ton/h muestra que, bajo la lógica del modelo autónomo, el sistema incrementa sustancialmente su capacidad de transporte diario. Del mismo modo, el promedio de 11.8 ciclos por camión-día refleja una mejora en la continuidad de operación y en el aprovechamiento de la flota respecto del escenario base.

Adicionalmente, la baja dispersión de los resultados y la estrechez de los intervalos de confianza sugieren que el comportamiento del sistema autónomo es relativamente estable dentro del horizonte simulado. Esto es coherente con el supuesto de una operación más homogénea y menos influida por la variabilidad de conducción individual.

4.2.6. Resultados de eficiencia operativa del escenario autónomo

La mejora productiva del escenario autónomo se comprende mejor al analizar sus indicadores de eficiencia operativa. La **Tabla 13** presenta el tiempo de ciclo promedio, las horas efectivas de operación por día, el factor de operación y el tiempo de espera en cola obtenidos en las 30 replicaciones del modelo.

Tabla 13

Indicadores de eficiencia operativa del escenario autónomo

Indicador	Media	Desviación estándar	IC 95% inferior	IC 95% superior
Tiempo de ciclo promedio (min)	34.5	0.68	34.28	34.72
Horas efectivas de operación por día	18.36	0.15	18.29	18.43
Factor de operación (%)	76.5	0.62	76.31	76.69
Tiempo de espera en cola (min)	0.78	0.19	0.70	0.86

Nota. Elaboración propia con base en las salidas del modelo de simulación. La tabla sintetiza el comportamiento del sistema autónomo en términos de aprovechamiento del tiempo operativo y eficiencia del ciclo de acarreo.

Los resultados de la Tabla 13 muestran que el tiempo de ciclo promedio del escenario autónomo se reduce a 34.5 minutos, mientras que las horas efectivas de operación diaria alcanzan 18.36 horas y el factor de operación se eleva a 76.5%. De especial relevancia es la reducción del tiempo de espera en cola hasta 0.78 minutos promedio, lo que indica una disminución importante de los cuellos de botella en la interacción entre transporte y descarga.

En términos interpretativos, estos resultados sugieren que la ganancia del sistema autónomo no proviene únicamente de una mayor velocidad de operación, sino de una mejora integral en el uso del tiempo disponible. La eliminación de tiempos asociados al operador, junto con la reducción de la espera y una mayor estabilidad del ciclo, se traduce en un uso más intensivo y continuo de la flota. Esto fortalece la coherencia interna del escenario simulado y respalda el cumplimiento del objetivo específico 2.

4.2.7. Resultados de costos operativos del escenario autónomo

A partir de los resultados operativos obtenidos en la simulación, se estimaron también los principales indicadores de costo del escenario autónomo. La **Tabla 14** presenta el costo mensual del sistema, el costo por tonelada transportada y el costo por hora-camión derivados del modelo.

Tabla 14

Indicadores de costos operativos del escenario autónomo

Indicador	Media	Desviación estándar	IC 95% inferior	IC 95% superior
Costo mensual del sistema (USD)	1,890,450	38,200	1,874,290	1,906,610
Costo por tonelada (USD/ton)	0.618	0.013	0.612	0.624
Costo por hora-camión (USD/h)	78.9	1.6	77.8	80.0

Nota. Elaboración propia con base en las salidas del modelo y en la estructura de costos considerada para el escenario autónomo. La tabla resume el comportamiento económico del sistema bajo condiciones de operación automatizada.

Los valores de la Tabla 14 indican que el escenario autónomo presenta un menor costo mensual y un costo unitario inferior al del sistema convencional, lo que sugiere una mayor eficiencia económica del acarreo bajo esta configuración. El valor promedio de 0.618 USD/ton se convierte en un referente central para la comparación posterior entre escenarios, mientras que la baja dispersión observada en las replicaciones refuerza la estabilidad del resultado económico esperado.

Desde la lógica del objetivo específico 2, estos resultados muestran que el escenario autónomo no solo mejora el transporte físico de material, sino que también representa una condición operativa potencialmente más eficiente en términos de costo unitario. No obstante, esta mejora será interpretada con mayor profundidad en el análisis comparativo del objetivo específico 3.

4.2.8. Interpretación integral del escenario autónomo

En conjunto, los resultados del modelamiento indican que el escenario de operación con camiones autónomos presenta un comportamiento operativamente más estable, con mayores horas efectivas, menor tiempo de ciclo, menor espera en cola y mayor capacidad de transporte diario respecto de la línea base convencional. La simulación muestra, además, que esta mejora no depende de cambios en la geometría de la operación ni en el tamaño de la flota, sino principalmente de la continuidad operativa, la reducción de tiempos improductivos y una mayor coordinación del sistema.

En términos metodológicos, el escenario simulado cumple con el objetivo específico 2 porque permite representar, bajo condiciones comparables, el desempeño esperado de una flota autónoma en la unidad minera estudiada. A su vez, genera los indicadores cuantitativos necesarios para contrastar posteriormente ambos escenarios y evaluar el impacto de la automatización sobre productividad, eficiencia, costos y seguridad.

4.2.9. Síntesis interpretativa del objetivo específico 2

Los resultados obtenidos permiten concluir que el modelamiento del escenario autónomo fue desarrollado de manera consistente con el diseño metodológico de la investigación y produjo una proyección operativa cuantificable del sistema de acarreo automatizado. Bajo las condiciones simuladas, la flota autónoma alcanzó una media de 102,177 ton/día, 4,341 ton/h, 11.8 ciclos por camión-día, 34.5 minutos de tiempo de ciclo, 18.36 horas efectivas de operación por día y un costo unitario de 0.618 USD/ton.

En consecuencia, el objetivo específico 2 se considera cumplido, ya que se logró modelar un escenario autónomo técnicamente comparable con la línea base convencional y generar una base cuantitativa suficiente para el análisis comparativo del siguiente objetivo. Asimismo, estos resultados son coherentes con la hipótesis específica que plantea una mejora sustancial en la productividad del sistema bajo condiciones de automatización.

4.3.1. Comparación general entre el sistema convencional y el sistema autónomo

Una vez obtenidos los resultados de la línea base convencional y del escenario simulado con camiones autónomos, se procedió a realizar la comparación integral entre ambos sistemas. Esta etapa constituye el núcleo analítico de la investigación, ya que permite cuantificar el efecto atribuible a la automatización del acarreo sobre los indicadores de productividad, eficiencia operativa, costos y seguridad definidos en el problema y en los objetivos de la tesis. La comparación se desarrolló utilizando los valores consolidados del diagnóstico convencional y las medias obtenidas a partir de las 30 replicaciones del modelo autónomo.

Como punto de partida, la **Tabla 15** presenta una síntesis comparativa de los principales indicadores considerados en ambos escenarios. Esta tabla permite visualizar, en un solo bloque, la magnitud y dirección del cambio observado cuando el sistema de acarreo pasa de un esquema

convencional con operadores humanos a un esquema autónomo controlado mediante simulación.

Tabla 15

Comparación general de indicadores entre el escenario convencional y el escenario autónomo

Dimensión	Indicador	Convencional	Autónomo	Variación absoluta	Variación %
Productividad	Toneladas transportadas por día	57,728	102,177	+44,449	+76.9
Productividad	Toneladas transportadas por hora	2,406	4,341	+1,935	+80.4
Productividad	Ciclos por camión-día	6.8	11.8	+5.0	+73.5
Eficiencia operativa	Tiempo de ciclo (min)	42.0	34.5	-7.5	-17.9
Eficiencia operativa	Horas efectivas de operación por día	12.63	18.36	+5.73	+45.4
Eficiencia operativa	Factor de operación (%)	52.6	76.5	+23.9 pp	+45.4
Eficiencia operativa	Tiempo de espera en cola (min)	8.0	0.78	-7.22	-90.3
Costos	Costo mensual del sistema (USD)	2,242,680	1,890,450	-352,230	-15.7
Costos	Costo por tonelada (USD/ton)	0.777	0.618	-0.159	-20.5
Seguridad operativa	Horas-hombre expuestas a riesgo (h-h/mes)	7,200	0	-7,200	-100.0

Nota. Elaboración propia con base en los resultados del diagnóstico convencional y en las medias del escenario autónomo simuladas en 30 replicaciones. La variación porcentual expresa el cambio relativo del escenario autónomo respecto del escenario convencional. pp = puntos porcentuales.

La Tabla 15 muestra que la automatización del acarreo produce una mejora generalizada en el desempeño del sistema. Los cambios más notorios se observan en el aumento de toneladas transportadas, el incremento de horas efectivas de operación y la reducción del tiempo de espera en cola. Del mismo modo, se registra una disminución del costo mensual y del costo unitario por tonelada, junto con la eliminación de la exposición directa del operador al circuito de acarreo. En términos integrales, estos resultados indican que la transición del sistema convencional al autónomo no genera una mejora aislada, sino un cambio estructural en la forma en que el sistema aprovecha el tiempo, los recursos y la capacidad de la flota.

4.3.2. Comparación de los resultados de productividad

En relación con la productividad, el análisis comparativo permite verificar que el escenario autónomo supera de forma marcada al sistema convencional en todos los indicadores considerados. La **Tabla 16** resume las diferencias observadas en toneladas transportadas por día, toneladas por hora y ciclos completados por camión-día, que constituyen los principales indicadores de salida física del sistema de acarreo.

Tabla 16

Comparación de indicadores de productividad entre escenarios

Indicador	Escenario convencional	Escenario autónomo	Diferencia absoluta	Variación %
Toneladas transportadas por día (ton/día)	57,728	102,177	+44,449	+76.9
Toneladas transportadas por hora (ton/h)	2,406	4,341	+1,935	+80.4
Ciclos por camión-día	6.8	11.8	+5.0	+73.5

Nota. Elaboración propia con base en los indicadores de productividad del sistema convencional y del escenario autónomo simulado. La variación porcentual expresa el desempeño relativo del sistema autónomo respecto del convencional.

Los resultados de la Tabla 16 evidencian que el mayor impacto de la automatización se produce sobre la continuidad de operación y sobre el número de ciclos completados por unidad de tiempo. El incremento de 44,449 toneladas por día y de 1,935 toneladas por hora revela que el sistema autónomo tiene la capacidad de sostener una tasa de transporte considerablemente

superior bajo la misma configuración general de flota y ruta. A su vez, el incremento de 5 ciclos por camión-día muestra que la mejora de productividad no depende únicamente de transportar más por ciclo, sino de ejecutar más ciclos efectivos dentro de la jornada.

Desde el punto de vista interpretativo, este resultado sugiere que la automatización mejora la productividad al reducir tiempos no productivos, aumentar la continuidad del ciclo y homogeneizar el comportamiento operativo de la flota. En términos del objetivo específico 3, la evidencia cuantitativa confirma que la automatización del acarreo tiene un efecto positivo y sustancial sobre la producción física transportada.

4.3.3. Comparación de los resultados de eficiencia operativa

La mejora de productividad observada entre escenarios se encuentra directamente vinculada con cambios en la eficiencia operativa del sistema. Por esta razón, la comparación no se limitó a los indicadores de salida física, sino que también incorporó variables relacionadas con el uso del tiempo operativo disponible. La **Tabla 17** presenta la variación de los principales indicadores de eficiencia entre ambos escenarios.

Tabla 17

Comparación de indicadores de eficiencia operativa entre escenarios

Indicador	Escenario convencional	Escenario autónomo	Diferencia absoluta	Variación %
Tiempo de ciclo promedio (min)	42.0	34.5	-7.5	-17.9
Horas efectivas de operación por día	12.63	18.36	+5.73	+45.4
Factor de operación (%)	52.6	76.5	+23.9 pp	+45.4
Tiempo de espera en cola (min)	8.0	0.78	-7.22	-90.3

Nota. Elaboración propia con base en los indicadores operativos de la línea base y en los resultados medios del escenario autónomo simulado. pp = puntos porcentuales.

La Tabla 17 muestra que la automatización tiene un efecto especialmente intenso sobre el aprovechamiento del tiempo operativo. La reducción del tiempo de ciclo en 7.5 minutos

implica que cada unidad de transporte completa su secuencia operativa con mayor rapidez, mientras que el incremento de 5.73 horas efectivas por día indica una utilización más intensiva del sistema a lo largo de la jornada. De forma complementaria, el aumento del factor de operación en 23.9 puntos porcentuales evidencia que una fracción mayor del tiempo programado se transforma en trabajo productivo.

Uno de los resultados más relevantes es la reducción del tiempo de espera en cola, que pasa de 8.0 a 0.78 minutos. Este cambio representa una disminución de 90.3%, lo que indica que el sistema autónomo tiende a operar con menor congestión y mejor coordinación entre unidades de carga, transporte y descarga. En términos funcionales, este hallazgo explica una parte importante del incremento de productividad registrado en el escenario autónomo, ya que el tiempo que antes se perdía en espera se transforma en tiempo efectivo de acarreo.

4.3.4. Comparación de los resultados económicos del sistema de acarreo

Además de las mejoras operativas, el objetivo específico 3 exigió determinar si la automatización del acarreo generaba cambios económicamente favorables para la unidad minera. Para ello, se compararon el costo mensual total del sistema y el costo unitario por tonelada transportada, indicadores que reflejan la eficiencia económica del proceso. La **Tabla 18** resume los resultados obtenidos.

Tabla 18

Comparación de indicadores de costos entre escenarios

Indicador	Escenario convencional	Escenario autónomo	Diferencia absoluta	Variación %
Costo mensual del sistema (USD)	2,242,680	1,890,450	-352,230	-15.7
Costo por tonelada transportada (USD/ton)	0.777	0.618	-0.159	-20.5

Nota. Elaboración propia a partir de los resultados económicos del sistema convencional y del escenario autónomo. La variación porcentual expresa la reducción relativa del costo en el escenario automatizado.

Los resultados de la Tabla 18 indican que el sistema autónomo no solo transporta más material, sino que lo hace con menor costo total mensual y, sobre todo, con un menor costo unitario por tonelada. La reducción de 0.159 USD/ton representa un descenso de 20.5%, lo que convierte al escenario autónomo en una alternativa económicamente más eficiente bajo los supuestos del modelo. A nivel mensual, la reducción de 352,230 USD sugiere que la automatización tiene capacidad de generar ahorros relevantes en la operación de acarreo.

Con el fin de comprender mejor la estructura del ahorro esperado, la **Tabla 19** presenta una estimación de la contribución relativa de los principales componentes que explican la reducción del costo unitario de acarreo en el escenario autónomo.

Tabla 19

Composición estimada del ahorro en el costo unitario de acarreo

Componente de ahorro	Reducción estimada	Participación en la reducción total (%)
Eliminación del costo directo del operador	10.0%	48.8
Mayor eficiencia en combustible	5.0%	24.4
Menor mantenimiento correctivo	3.5%	17.1
Optimización del desgaste de neumáticos	2.0%	9.8
Reducción total estimada	**20.5%**	**100.0**

Nota. Elaboración propia con base en la descomposición del ahorro presentada en el borrador de resultados. La tabla muestra la contribución relativa de los componentes que explican la disminución del costo unitario del sistema autónomo respecto del convencional.

La Tabla 19 permite observar que la principal fuente de ahorro económico se encuentra en la eliminación del costo directo asociado a la operación humana del camión, seguida de la eficiencia en combustible y de la reducción del mantenimiento correctivo. Esto sugiere que la automatización no solo incrementa la producción, sino que reconfigura la estructura de costos del sistema de acarreo, desplazando parte del gasto operativo hacia una lógica de mayor control, menor detención y mejor uso del recurso energético.

4.3.5. Comparación de los resultados de seguridad operativa

El análisis comparativo también incorporó la dimensión de seguridad, en concordancia con el problema de investigación y con el planteamiento del estudio. En este punto, es importante precisar que la simulación desarrollada no modela la ocurrencia de accidentes de forma directa; por tanto, el contraste de seguridad se apoya, por un lado, en el indicador directo de exposición del personal y, por otro, en una proyección razonable de mejora basada en referentes operativos reportados en el propio estudio.

La **Tabla 20** presenta la comparación de los principales indicadores de seguridad considerados para ambos escenarios.

Tabla 20

Comparación de indicadores de seguridad operativa entre escenarios

Indicador	Escenario convencional	Escenario autónomo	Diferencia absoluta	Variación %
Horas-hombre expuestas a riesgo (h-h/mes)	7,200	0	-7,200	-100.0
Tasa proyectada de incidentes (incidentes/millón de toneladas)	0.055	0.009	-0.046	-83.6

Nota. Elaboración propia. La comparación de horas-hombre expuestas corresponde a un efecto directo del cambio de escenario. La tasa de incidentes del escenario autónomo se presenta como una proyección referencial sustentada en la comparación desarrollada en el borrador de resultados y no como una salida directa del modelo de simulación.

Los resultados muestran que el efecto más claro de la automatización sobre la seguridad es la eliminación de la exposición directa del operador en el circuito de acarreo, ya que el sistema autónomo suprime la necesidad de mantener personal en cabina durante el transporte. Desde esta perspectiva, la reducción de 7,200 horas-hombre expuestas al mes representa una mejora sustancial y directamente atribuible a la automatización. En cambio, la reducción proyectada en la tasa de incidentes debe interpretarse con mayor cautela, pues no proviene de una simulación explícita de eventos de seguridad, sino de una extrapolación apoyada en referencias operativas utilizadas en el estudio.

Aun con esa precisión, la evidencia comparativa permite afirmar que el sistema autónomo ofrece una ventaja clara desde el punto de vista preventivo, ya que disminuye de manera estructural la exposición del personal a zonas de tránsito, maniobra y operación de alto riesgo. Por ello, la seguridad operativa se confirma como una dimensión central del impacto de la automatización y no solo como un beneficio complementario del aumento de productividad.

4.3.6. Discusión integrada de los hallazgos comparativos

Los resultados comparativos obtenidos en este objetivo muestran que la automatización del acarreo tiene efectos simultáneos sobre productividad, eficiencia, costos y seguridad. A diferencia de una mejora puntual en una sola variable, el escenario autónomo modifica el desempeño del sistema de forma integral: transporta más material, reduce el tiempo improductivo, mejora el aprovechamiento del tiempo programado, disminuye el costo unitario y elimina la exposición directa del operador. Esto refuerza la idea de que el cambio tecnológico analizado en la investigación no se reduce a sustituir al conductor, sino a reconfigurar la lógica operativa del sistema de acarreo.

En el plano comparativo con referencias incluidas en el propio estudio, la magnitud del incremento de productividad obtenido en el modelo supera algunos benchmarks industriales señalados para operaciones internacionales. Esta diferencia puede interpretarse en función de dos factores: primero, el sistema convencional de partida presenta tiempos improductivos y cuellos de botella relativamente marcados; y segundo, el escenario autónomo fue configurado bajo condiciones de continuidad y coordinación superiores. Por ello, el resultado de +76.9% debe leerse como una proyección técnica del caso de estudio y no como una tasa universal aplicable a cualquier operación minera.

Del mismo modo, la reducción de 20.5% en el costo unitario refuerza la viabilidad operativa del escenario autónomo, ya que la mejora económica se produce al mismo tiempo que aumenta la producción física. Esto resulta especialmente relevante para la tesis, porque demuestra que la automatización no genera una compensación entre costo y rendimiento, sino una mejora concurrente en ambos frentes. En términos de gestión minera, este tipo de resultado es el que justifica que la automatización del acarreo sea evaluada como una alternativa estratégica y no solo como una innovación tecnológica aislada.

4.3.7. Síntesis interpretativa del objetivo específico 3

En conjunto, los resultados de este objetivo permiten concluir que la comparación entre el escenario convencional y el escenario autónomo evidencia mejoras sustanciales atribuibles a la automatización del acarreo. El sistema autónomo incrementó la productividad diaria en 76.9%, elevó las horas efectivas de operación en 45.4%, redujo el tiempo de ciclo en 17.9%, disminuyó el costo unitario en 20.5% y eliminó la exposición directa del operador al circuito de riesgo.

En función de ello, el objetivo específico 3 se considera cumplido, ya que fue posible cuantificar de manera comparativa las diferencias entre ambos escenarios en términos de productividad, eficiencia operativa, costos y seguridad. Asimismo, estos resultados respaldan la hipótesis específica vinculada con la mejora de productividad y la reducción del costo unitario, y brindan sustento parcial y sólido a la hipótesis de mejora en seguridad, al menos en lo referente a la reducción de exposición del personal.

4.4.1. Identificación de variables críticas para la implementación

Luego de comparar el desempeño del sistema convencional y el escenario autónomo, se desarrolló un análisis de sensibilidad con el propósito de identificar qué variables inciden con mayor fuerza en la productividad del sistema y, por extensión, en la conveniencia de una implementación progresiva. Este análisis resulta fundamental para el objetivo específico 4, ya que permite reconocer qué condiciones deben ser controladas o priorizadas durante una eventual adopción de camiones autónomos en la unidad minera.

Como se presenta en la **Tabla 21**, las variables analizadas fueron la distancia de acarreo, la velocidad promedio del camión autónomo, la disponibilidad mecánica, el tiempo de carga y la tasa de error del sistema de despacho. La sensibilidad de cada variable se estimó en función del rango de variación que genera sobre la productividad simulada.

Tabla 21

Resultados del análisis de sensibilidad sobre la productividad del sistema autónomo

Variable	Valor base	Escenario inferior	Escenario superior	Rango de impacto	Sensibilidad

Distancia de acarreo (km)	8.5	110,430	95,920	14,510	Alta
Velocidad del camión (km/h)	45	97,100	108,450	11,350	Alta
Disponibilidad mecánica (%)	92	98,560	105,820	7,260	Media
Tiempo de carga (min)	8.5	105,780	99,290	6,490	Media
Tasa de error del despacho (%)	2	101,890	102,560	670	Baja

Nota. Elaboración propia a partir del análisis de sensibilidad del modelo de simulación. La tabla resume el efecto relativo de las principales variables operativas sobre la productividad del escenario autónomo y permite identificar los factores críticos para la implementación.

La Tabla 21 muestra que las variables de mayor impacto son la distancia de acarreo y la velocidad de operación del camión, ambas clasificadas con sensibilidad alta. Esto significa que la productividad del sistema autónomo depende en gran medida de la geometría operativa de la mina y de las condiciones que permitan sostener una circulación estable y continua. En un segundo nivel se encuentran la disponibilidad mecánica y el tiempo de carga, cuya influencia es media, pero igualmente relevante para asegurar que la mejora proyectada se mantenga en el tiempo. En cambio, la tasa de error del sistema de despacho presenta un efecto bajo dentro del rango modelado.

Desde el punto de vista de los lineamientos, este resultado implica que una implementación progresiva no debería concentrarse únicamente en la compra de equipos autónomos, sino también en la preparación de las rutas, la confiabilidad del sistema de carguío y las condiciones de mantenimiento. Por tanto, la adopción tecnológica debe abordarse como una intervención integral del sistema de acarreo y no como una sustitución aislada del conductor.

4.4.2. Evaluación de escenarios de implementación

Con el fin de explorar la robustez del proyecto ante diferentes condiciones de adopción, se modelaron tres escenarios financieros: pesimista, base y optimista. Este ejercicio permite traducir los resultados operativos del sistema autónomo en contextos de implementación diferenciados y, al mismo tiempo, establecer rangos razonables para la toma de decisiones. La **Tabla 22** resume los supuestos centrales de cada escenario.

Tabla 22

Escenarios financieros de implementación del sistema autónomo

Factor	Escenario pesimista	Escenario base	Escenario optimista
Productividad adicional	+55%	+77%	+95%
Mejora de costos	-12%	-20.5%	-28%
Disponibilidad mecánica	88%	92%	95%
Tiempo de implementación	18 meses	12 meses	10 meses
Inversión estimada	41.0 MUSD	32.8 MUSD	29.5 MUSD
ROI a 10 años	15.8%	24.3%	35.2%
Payback	10.5 años	8.0 años	6.2 años

Nota. Elaboración propia con base en el planteamiento de escenarios financieros del borrador de resultados. La tabla sintetiza tres contextos posibles de implementación y sus principales implicancias económicas.

La Tabla 22 evidencia que el proyecto conserva viabilidad incluso bajo el escenario pesimista, en el que la productividad adicional se reduce a 55%, la mejora de costos se limita a 12% y la inversión aumenta hasta 41.0 millones de dólares. Aun en este contexto, el retorno sobre la inversión alcanza 15.8% y el período de recuperación se sitúa en 10.5 años. En el escenario base, que representa la condición esperada del estudio, el proyecto alcanza un ROI de 24.3% y un payback de 8 años. En el escenario optimista, la recuperación disminuye a 6.2 años y el ROI se eleva a 35.2%.

Este comportamiento confirma que la conveniencia de la automatización no depende de una única proyección rígida, sino que se mantiene dentro de un rango de condiciones razonables. En términos estratégicos, ello justifica que la implementación sea planteada de manera progresiva, permitiendo que la unidad minera avance desde un piloto controlado hacia una adopción más amplia en función de los resultados observados.

4.4.3. Estructura de inversión requerida

Un componente central del objetivo específico 4 es determinar la magnitud y composición de la inversión requerida para la adopción de camiones autónomos. Para ello, se identificaron los principales rubros de hardware, software, capacitación e implementación. La **Tabla 23**

presenta la estructura de inversión total estimada para el escenario base, equivalente a 32.8 millones de dólares.

Tabla 23

Estructura de inversión del escenario base de implementación

Categoría	Componente	Inversión (MUSD)	% del total
Hardware	10 camiones autónomos	18.5	56.4
Hardware	Sistema de control central (OCC)	2.1	6.4
Hardware	Infraestructura de comunicaciones	1.8	5.5
Hardware	GPS y sensores de precisión	0.9	2.7
Software	Licencias y software de simulación/gestión	0.3	0.9
Software	Sistema de gestión autónoma	1.2	3.7
Software	Implementación y puesta en marcha	1.5	4.6
Capacitación	Formación del personal	0.8	2.4
Capacitación	Certificaciones y auditorías	0.6	1.8
Otros	Contingencias	1.6	4.9
Total		**32.8**	**100.0**

Nota. Elaboración propia con base en la estructura de inversión presentada en el borrador del análisis económico. La tabla resume los rubros requeridos para una implementación progresiva del sistema autónomo en el escenario base.

Los resultados muestran que la mayor parte de la inversión se concentra en el hardware, en especial en la adquisición o conversión de camiones autónomos, que representa 56.4% del total. Esto indica que la decisión de automatizar el sistema exige una inversión intensiva en activos físicos, pero también demanda componentes de soporte, tales como centro de control, infraestructura de comunicaciones, sensores de precisión y sistemas de gestión. De igual manera, la presencia de rubros de capacitación y certificación evidencia que la transición tecnológica requiere preparación organizacional y no solo infraestructura.

Desde una perspectiva práctica, esta estructura de inversión refuerza la conveniencia de una implementación por fases, pues permite distribuir el gasto en etapas y validar el desempeño del sistema antes de escalar hacia una operación más amplia.

4.4.4. Componentes de ahorro anual esperados

A la inversión estimada se contrapone un conjunto de ahorros operativos y de seguridad derivados del mejor desempeño del sistema autónomo. La **Tabla 24** resume las principales fuentes de ahorro anual consideradas en el análisis, incluyendo reducción del costo de acarreo, ahorro en combustible, menor costo de mano de obra directa, disminución de mantenimiento correctivo y reducción de pérdidas asociadas a incidentes.

Tabla 24

Componentes de ahorro anual del escenario base

Fuente de ahorro	Valor anual (USD)	Base de estimación
Reducción del costo de acarreo	4,227,060	Diferencia en costo unitario × producción anual
Ahorro de combustible	892,300	Reducción del consumo por tonelada transportada
Reducción de costos de mano de obra	1,584,000	Menor requerimiento de operadores en cabina
Reducción de mantenimiento correctivo	456,200	Menor frecuencia de reparaciones urgentes
Reducción de incidentes	245,000	Menores pérdidas asociadas a eventos de seguridad
Total de ahorros anuales	**7,404,560**	

Nota. Elaboración propia con base en los componentes de ahorro económico identificados en el borrador de resultados. La tabla presenta una estimación agregada de los beneficios económicos anuales esperados del escenario autónomo.

La Tabla 24 permite observar que la principal fuente de ahorro proviene de la reducción del costo unitario de acarreo, seguida por la disminución de costos laborales y el ahorro en combustible. En conjunto, estos resultados muestran que la automatización no solo incrementa la productividad, sino que también transforma la estructura de gasto de la operación minera. En términos de lineamientos, ello sugiere que la evaluación de la adopción tecnológica debe considerar el ahorro sistémico total y no únicamente el gasto inicial.

4.4.5. Comportamiento del flujo de caja proyectado

Con el fin de evaluar la capacidad del proyecto para recuperar la inversión y generar valor en el mediano plazo, se construyó un flujo de caja proyectado a 10 años. La **Tabla 25** resume la evolución anual del flujo neto y del flujo acumulado del escenario base.

Tabla 25

Flujo de caja proyectado del escenario base a 10 años

Año	Inversión (USD)	Ahorros operativos (USD)	Ahorros por seguridad (USD)	Flujo neto (USD)	Flujo acumulado (USD)
0	-32,800,000	0	0	-32,800,000	-32,800,000
1	-850,000	4,227,060	245,000	3,622,060	-29,177,940
2	-420,000	4,521,354	261,350	4,362,704	-24,815,236
3	-280,000	4,832,649	279,444	4,832,093	-19,983,143
4	-180,000	5,161,614	299,000	5,280,614	-14,702,529
5	0	5,509,927	320,300	5,830,227	-8,872,302
6	0	5,878,802	342,721	6,221,523	-2,650,779
7	0	6,269,619	366,471	6,636,090	3,985,311
8	0	6,683,912	391,744	7,075,656	11,060,967
9	0	7,122,385	418,785	7,541,170	18,602,137
10	0	7,586,976	447,820	8,034,796	26,636,933

Nota. Elaboración propia. La tabla resume el flujo de caja proyectado del escenario base de automatización, considerando inversión inicial, ahorros operativos y ahorros vinculados a seguridad.

Los resultados muestran que el flujo acumulado se mantiene negativo hasta el año 6 y pasa a ser positivo en el año 7, lo que indica que el punto de equilibrio financiero se alcanza entre ambos períodos. En el borrador del estudio se interpreta este comportamiento como un break-even aproximado en el año 6.1, lo que resulta consistente con una recuperación de la inversión dentro de un horizonte razonable para proyectos mineros de mediano y largo plazo.

Esta evolución del flujo de caja fortalece la viabilidad económica del sistema autónomo y respalda la conveniencia de planificar la implementación como una inversión estratégica, con

retorno sostenido en el tiempo y beneficios acumulativos crecientes a partir de la estabilización del sistema.

4.4.6. Indicadores financieros para la toma de decisión

Además del flujo de caja, se consideraron los indicadores financieros clásicos de evaluación: valor actual neto, tasa interna de retorno, período de recuperación y retorno sobre la inversión. La **Tabla 26** resume los resultados obtenidos para el escenario base.

Tabla 26

Indicadores financieros del escenario base de implementación

Indicador	Valor
WACC o tasa de descuento	8.5%
VAN a 10 años	USD 12,847,340
Índice de rentabilidad	1.39
TIR del proyecto	18.2%
Payback simple	8.0 años
Payback descontado	8.3 años
ROI a 5 años	12.8%
ROI a 10 años	24.3%
ROI anualizado	2.43%

Nota. Elaboración propia con base en el análisis económico-financiero del escenario base. La tabla presenta los principales indicadores empleados para valorar la conveniencia financiera de la implementación progresiva del sistema autónomo.

La Tabla 26 evidencia que el proyecto es financieramente atractivo bajo las condiciones del escenario base. El VAN positivo de 12.8 millones de dólares indica generación de valor, mientras que una TIR de 18.2% supera con amplitud la tasa de descuento considerada. Asimismo, el índice de rentabilidad de 1.39 muestra que por cada dólar invertido se genera un retorno presente superior al capital inicial. Estos resultados, en conjunto, respaldan la viabilidad económica de la propuesta y justifican su evaluación como una alternativa de modernización operativa en la unidad minera.

4.4.7. Riesgos económicos de la implementación

Toda propuesta de automatización conlleva incertidumbres que deben ser reconocidas antes de formular lineamientos definitivos. Por ello, el análisis incorporó una matriz de riesgos financieros orientada a identificar eventos que podrían afectar el VAN y el ROI del proyecto. La **Tabla 27** sintetiza los principales riesgos identificados y sus estrategias de mitigación.

Tabla 27

Matriz de riesgos financieros del proyecto de automatización

Riesgo	Probabilidad	Impacto en VAN	Impacto en ROI	Estrategia de mitigación
Aumento de inversión (+15%)	Media	-2.1 MUSD	-3.2%	Licitación competitiva internacional
Demora en implementación (+6 meses)	Media	-1.8 MUSD	-2.8%	Gestión de cronograma crítico
Disponibilidad menor a 90%	Media	-2.5 MUSD	-4.1%	Contrato con SLA y soporte técnico
Caída de precios de metales	Baja	-3.2 MUSD	-5.2%	Cobertura y evaluación de escenarios
Falla crítica del sistema	Baja	-1.9 MUSD	-3.1%	Redundancia y respaldo tecnológico

Nota. Elaboración propia a partir del análisis de riesgos financieros del borrador de resultados. La tabla resume los principales eventos que podrían afectar la rentabilidad del proyecto y las estrategias de mitigación planteadas.

La Tabla 27 muestra que los riesgos más relevantes no anulan la viabilidad del proyecto, pero sí justifican una implementación gradual y controlada. En particular, la disponibilidad real del sistema y los posibles incrementos de inversión son factores que podrían afectar de manera apreciable los resultados financieros. Por ello, la formulación de lineamientos no debe limitarse a una recomendación técnica general, sino que debe incorporar mecanismos de mitigación desde la fase inicial de adopción.

4.4.8. Validación comparativa con operaciones de referencia

Como soporte adicional para la formulación de lineamientos, se contrastaron los resultados del modelo con referentes operativos internacionales ya mencionados en el estudio. La **Tabla 28** resume la comparación entre el modelo simulado y operaciones como Quellaveco y Pilbara.

Tabla 28

Comparación del modelo con operaciones de referencia

Métrica	Quellaveco	Pilbara	Modelo simulado	Desviación
Aumento de productividad	+73%	+75%	+76.9%	±2.2%
Reducción del costo unitario	-18%	-22%	-20.5%	±2.0%
Disponibilidad mecánica	90%	88%	92%	+2%
Horas de operación por día	18.2	17.8	18.36	+0.3%

Nota. Elaboración propia a partir de la comparación de benchmarks operativos incluidos en el borrador del estudio. La tabla permite verificar que los resultados del modelo se mantienen dentro de rangos comparables con experiencias reales de automatización minera.

Los resultados indican que las desviaciones del modelo respecto de referentes internacionales se mantienen en márgenes reducidos, lo que fortalece la plausibilidad técnica de la propuesta. Desde el punto de vista de los lineamientos, esto sugiere que la unidad minera estudiada podría aspirar a resultados comparables siempre que la implementación se realice con condiciones operativas y de soporte tecnológico adecuadas.

4.4.9. Lineamientos técnicos, económicos y operativos para la adopción progresiva

A partir de los hallazgos anteriores, se formularon lineamientos orientados a una implementación progresiva del sistema autónomo. La **Tabla 29** sintetiza dichos lineamientos organizados en tres dimensiones: técnica, económica y operativa.

Tabla 29

Lineamientos para la adopción progresiva de camiones de acarreo autónomos

Dimensión	Lineamiento propuesto	Finalidad

Técnica	Ejecutar una fase piloto con un número reducido de unidades autónomas	Validar desempeño real antes del escalamiento
Técnica	Adecuar rutas, puntos de descarga y sistema de comunicaciones	Asegurar estabilidad operativa del AHS
Técnica	Fortalecer el mantenimiento predictivo y el monitoreo de disponibilidad	Sostener la productividad proyectada
Económica	Implementar la inversión por etapas y con control de contingencias	Reducir el riesgo financiero inicial
Económica	Monitorear periódicamente costo unitario, ahorro y payback	Verificar cumplimiento de metas del proyecto
Operativa	Reorganizar la supervisión del acarreo hacia centros de control y monitoreo	Adaptar la gestión operativa al nuevo sistema
Operativa	Capacitar progresivamente al personal en operación, control y mantenimiento del AHS	Facilitar la transición tecnológica
Operativa	Mantener indicadores de productividad, seguridad y confiabilidad como criterios de escalamiento	Decidir expansión en función de resultados reales

Nota. Elaboración propia. La tabla integra los resultados del análisis de sensibilidad, la evaluación económica y la comparación de escenarios para formular lineamientos de implementación progresiva del sistema autónomo.

La Tabla 29 muestra que la implementación recomendada no debe ejecutarse como un cambio total e inmediato, sino mediante una estrategia gradual que permita validar el sistema, controlar riesgos y ajustar decisiones según el comportamiento observado. En la dimensión técnica, la fase piloto y la adecuación de la infraestructura operativa son prioritarias. En la dimensión económica, la inversión escalonada y el seguimiento de indicadores financieros permiten reducir exposición. En la dimensión operativa, la capacitación del personal y la reorganización del control del acarreo constituyen condiciones esenciales para que la autonomía se consolide como una mejora real del sistema.

4.4.10. Síntesis interpretativa del objetivo específico 4

En conjunto, los resultados de este objetivo permiten concluir que la adopción de camiones autónomos en la unidad minera resulta técnica y económicamente viable bajo las condiciones del escenario base, y que dicha implementación debe desarrollarse de forma progresiva. El análisis de sensibilidad mostró que la distancia de acarreo y la velocidad operativa son factores

críticos; la evaluación económica evidenció un VAN positivo de USD 12.8 millones, una TIR de 18.2% y un payback de 8 años; y la comparación con operaciones de referencia confirmó que los resultados del modelo se mantienen dentro de rangos plausibles para experiencias reales de automatización minera.

En consecuencia, el objetivo específico 4 se considera cumplido, ya que fue posible formular lineamientos técnicos, económicos y operativos sustentados en la evidencia del estudio. Estos lineamientos respaldan una estrategia de implementación gradual, iniciando con una fase piloto, fortaleciendo la infraestructura de soporte, controlando los riesgos financieros y reorientando la gestión operativa hacia un esquema de monitoreo y control del sistema autónomo.

CONCLUSIONES

La presente investigación permitió evaluar el impacto de la implementación de camiones de acarreo autónomos en la productividad de una unidad minera del sur del Perú mediante la comparación entre un sistema de acarreo convencional y un escenario de operación autónoma modelado con simulación de eventos discretos. Los resultados obtenidos muestran que la automatización del acarreo constituye una alternativa técnicamente viable para mejorar el desempeño operativo del sistema, al incrementar la continuidad de operación, reducir tiempos improductivos y optimizar el uso de la flota. En términos globales, el escenario autónomo proyectó un incremento de 76.9% en la productividad diaria, al pasar de 57,728 a 102,177 ton/día; una reducción de 20.5% en el costo unitario de acarreo, de 0.777 a 0.618 USD/ton; y un aumento de 45.4% en las horas efectivas de operación, de 12.63 a 18.36 horas por día, lo que confirma el efecto favorable de la automatización sobre la productividad y la eficiencia operativa del sistema.

El diagnóstico del sistema convencional permitió establecer una línea base operativa consistente y demostrar que la operación actual se encuentra condicionada por ineficiencias asociadas a tiempos muertos, esperas en cola, pausas operativas y utilización parcial del tiempo disponible. La línea base evidenció un tiempo de ciclo de 42.0 minutos, una utilización efectiva de 70%, un factor de operación de 52.6% y un costo unitario de 0.777 USD/ton, además de una exposición de 7,200 horas-hombre por mes en el circuito de acarreo. Estos resultados confirman que el sistema convencional presenta un margen importante de mejora y respaldan la hipótesis específica según la cual la flota opera con una utilización efectiva inferior a 75% y con tiempos improductivos significativos.

La simulación del escenario autónomo permitió modelar una operación de acarreo más estable, continua y predecible, en la que la eliminación de tiempos asociados al operador, la reducción de esperas y la mayor homogeneidad del ciclo se tradujeron en mejoras sustanciales del desempeño. Bajo las condiciones simuladas, el sistema autónomo alcanzó 102,177 ton/día, 4,341 ton/h, 11.8 ciclos por camión-día, un tiempo de ciclo de 34.5 minutos y un factor de operación de 76.5%. Estos resultados demuestran que la simulación de eventos discretos fue una herramienta adecuada para representar el comportamiento del sistema bajo condiciones automatizadas y para cuantificar de manera objetiva el efecto esperado de la incorporación de camiones autónomos en la unidad minera.

El análisis comparativo entre ambos escenarios evidenció que la automatización del acarreo no solo incrementa la producción transportada, sino que también mejora la eficiencia operativa, reduce el costo del sistema y fortalece la seguridad operativa. La reducción del tiempo de ciclo en 17.9%, el incremento del factor de operación en 23.9 puntos porcentuales y la disminución del costo mensual en 352,230 USD reflejan una mejora estructural del sistema. Asimismo, la eliminación de la exposición directa del operador dentro del circuito de acarreo constituye uno de los beneficios más relevantes desde la perspectiva de seguridad, ya que reduce de manera sustancial la permanencia del personal en zonas de tránsito y maniobra de alto riesgo. En consecuencia, puede concluirse que los camiones autónomos representan una solución integral capaz de mejorar simultáneamente productividad, costos y condiciones de seguridad en la operación minera evaluada.

Finalmente, la evaluación económica mostró que la adopción de esta tecnología resulta viable bajo las condiciones del escenario base analizado. La inversión estimada de 32.8 millones de dólares proyectó un VAN de USD 12,847,340, una TIR de 18.2%, un ROI de 24.3% a 10 años y un período de recuperación de 8 años, indicadores que respaldan la conveniencia de considerar la automatización del acarreo como una inversión estratégica de mediano y largo plazo. En ese sentido, la investigación concluye que la implementación de camiones autónomos debe ser entendida no solo como una mejora tecnológica puntual, sino como una transformación operativa con capacidad para elevar la competitividad, modernizar la gestión minera y alinearse con las tendencias actuales de Minería 4.0.

RECOMENDACIONES

Se recomienda que la unidad minera realice, antes de cualquier decisión de inversión, un estudio de factibilidad específico que incorpore información operativa local más extensa, idealmente con una base de datos de al menos 12 meses, a fin de validar la representatividad de los parámetros empleados en la simulación y reducir la incertidumbre asociada a la variabilidad temporal del sistema de acarreo. Esta recomendación resulta especialmente importante debido a que el análisis desarrollado se sustenta en un período base representativo, pero no en una serie anual completa.

Asimismo, se recomienda fortalecer de manera previa la infraestructura tecnológica necesaria para la operación autónoma, considerando sistemas de comunicaciones de baja latencia, tecnologías de posicionamiento de alta precisión, integración de centros de control y

monitoreo, así como sensores e interfaces que permitan gestionar la flota en tiempo real. La automatización del acarreo no debe implementarse únicamente como adquisición de equipos, sino como la consolidación de un ecosistema técnico capaz de sostener una operación continua, segura y confiable.

También se recomienda ejecutar un plan piloto escalonado, iniciando con 2 o 3 camiones autónomos en un área controlada de la operación, con el fin de validar el comportamiento real del sistema frente a los valores proyectados por la simulación, ajustar protocolos de seguridad, calibrar la lógica de despacho autónomo y reducir el riesgo financiero y operativo asociado a una implementación total inmediata. Un enfoque progresivo permitirá incorporar aprendizajes reales antes de ampliar la autonomía al resto de la flota.

De igual forma, se recomienda desarrollar un programa integral de capacitación y reconversión laboral orientado al personal que participará en la transición tecnológica. Este programa debe incluir formación para operadores que migren hacia funciones de supervisión remota, técnicos encargados del mantenimiento de sistemas autónomos e ingenieros responsables del control y análisis de datos de flota. La sostenibilidad de la automatización no dependerá únicamente del desempeño del sistema, sino también de la capacidad organizacional para adaptarse a un nuevo modelo de operación minera.

En materia de seguridad, se recomienda adoptar procedimientos específicos para operación autónoma, incluyendo zonas de exclusión claramente delimitadas, protocolos de parada de emergencia, simulacros periódicos, auditorías de control y mecanismos de interacción segura entre equipos autónomos y unidades tripuladas en caso de una flota híbrida. Dado que uno de los hallazgos más importantes del estudio es la eliminación de la exposición directa del operador al circuito de riesgo, la seguridad debe mantenerse como criterio central durante todas las fases de implementación y escalamiento.

Finalmente, se recomienda implementar un sistema permanente de monitoreo de indicadores clave de desempeño, que permita evaluar de manera continua la disponibilidad, la utilización, el tiempo de ciclo, la productividad, el costo unitario y los eventos críticos de seguridad. Este seguimiento debe servir no solo para verificar el cumplimiento de las metas proyectadas, sino también para sustentar decisiones de expansión progresiva de la autonomía dentro de la operación y para integrar esta tecnología a una estrategia institucional de innovación minera, productividad y competitividad de largo plazo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BHP. (2024). Autonomous haulage systems at Escondida and safety incident analysis, August 2025 [Documento técnico interno]. BHP Escondida.

Bujaico, P. (2020). Metodología de simulación de eventos discretos para dimensionamiento óptimo de flota en minería a tajo abierto [Tesis de maestría]. Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ingeniería.

Caterpillar. (2022). Primer camión minero eléctrico a baterías: Pruebas comerciales iniciadas 2024 [Boletín técnico]. Caterpillar Inc.

Caterpillar. (2025). Soluciones de transporte autónomo minero: Cat MineStar Command for Hauling [Presentación técnica]. En PERUMIN 37.

Codelco. (2008). Implementación de camiones autónomos en minería del cobre: Caso Gabriela Mistral [Informe técnico interno]. Codelco Chile.

Codoceo-Contreras, R., Vidal-Carrasco, P., & Gómez-López, R. (2024). Impacto de la automatización en operaciones mineras a cielo abierto: Hacia la mina inteligente. Journal of Cleaner Production, 385, 134–156. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141780

Energiminas. (2025). Quellaveco: Operación de flota 100% autónoma de Anglo American en Perú [Boletín informativo técnico]. Energiminas.

Essien, C., & Frimpong, B. (2025). Sistemas de detección 3D y navegación autónoma en minería subterránea: Aplicaciones de LiDAR y SLAM. Minerals Engineering, 198, 108–125. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2024.108125

Fortescue Metals Group. (2022). Sustentabilidad a través de la autonomía minera: Operaciones Chichester Hub [Reporte corporativo de sostenibilidad]. Fortescue Metals Group Limited.

Garrido Asenjo, A. (2023). Implementación de tecnología Cat MineStar en la operación Quellaveco: Optimización de acarreo autónomo en minería peruana. Ingeniería de Minas, 45(2), 78–95.

Global Mining Guidelines Group. (2021). Best practices in autonomous mining implementation: A comprehensive guide for mining operators [Estándar de industria]. GMGR Publications.

GlobalData. (2025). Global autonomous haul truck market analysis and forecast [Reporte de investigación de mercado]. GlobalData Plc.

Hasiri, Y., Thompson, A., Chen, L., & Patel, R. (2024). Revisión sistemática de sistemas de camiones autónomos en minería: Tendencias, impacto en seguridad y adopción. Mining Engineering Review, 52(3), 210–245.

Hitachi Construction Machinery. (2024). Sistema AHS proprietario para operaciones mineras autónomas [Especificación técnica de producto]. Hitachi Construction Machinery Co., Ltd.

Komatsu. (2023). FrontRunner Autonomous Haulage System: Specifications and operational guidelines [Manual de equipo]. Komatsu Mining Corp.

McKinsey & Company. (2020). Productividad en minería: Perspectivas y soluciones para la recuperación del desempeño operativo [Reporte de consultoría estratégica]. McKinsey & Company.

NIOSH. (2023). Safety record of autonomous haul trucks in mining operations [Base de datos de seguridad ocupacional]. National Institute for Occupational Safety and Health, U.S. Department of Health and Human Services.

NSW Regulator. (2024). Incidence rates and safety outcomes in autonomous mining equipment [Informe regulatorio]. New South Wales Mining Safety Regulator.

Rio Tinto. (2023). Operaciones autónomas en Pilbara: Resultados de productividad y seguridad [Reporte técnico corporativo]. Rio Tinto Limited.

Sandvik. (2023). Autonomous drilling and transport systems for underground mining [Reporte de innovación]. Sandvik Mining and Rock Technology.

Suncor Energy. (2024). Implementation and performance of autonomous haul trucks in oil sands mining [Reporte técnico de operaciones]. Suncor Energy Inc.

Epiroc. (2024). Soluciones de automatización para minería subterránea [Documentación técnica]. Epiroc Rock Drills AB.

Fortune Business Insights. (2025). Global autonomous mining trucks market: Valuation and forecast analysis, 2025-2032 [Reporte de investigación de mercado]. Fortune Business Insights.

Caterpillar. (2025). Soluciones de transporte autónomo minero: Cat MineStar Command for Hauling. [Documento técnico presentado en PERUMIN 37].

Codoceo-Contreras, R., Vidal-Carrasco, P., & Gómez-López, R. (2024). Impacto de la automatización en operaciones mineras a cielo abierto: Hacia la mina inteligente. Journal of Cleaner Production, 385, 134-156.

Codelco. (2008). Implementación de camiones autónomos en minería del cobre: Caso Gabriela Mistral. [Informe técnico interno].

Energiminas. (2025). Quellaveco: Operación de flota 100% autónoma de Anglo American en Perú. Boletín Informativo Técnico.

Essien, C., & Frimpong, B. (2025). Sistemas de detección 3D y navegación autónoma en minería subterránea: Aplicaciones de LiDAR y SLAM. Minerals Engineering, 198, 108-125.

Fortescue Metals Group. (2022). Sustentabilidad a través de la autonomía minera: Operaciones Chichester Hub. [Reporte corporativo de sostenibilidad].

Garrido Asenjo, A. (2023). Implementación de tecnología Cat MineStar en la operación Quellaveco: Optimización de acarreo autónomo en minería peruana. Ingeniería de Minas, 45(2), 78-95.

GlobalData. (2025). Global autonomous haul truck market analysis and forecast. Industry Research Report.

Goli, M., Mirzaei-Paiaman, A., Asadi, S., & Karimi, B. (2025). Evaluación de riesgos operacionales en sistemas de acarreo autónomo: Combinación de simulación de eventos discretos con análisis de riesgos. Safety Science, 142, 106-138.

Hasiri, Y., Thompson, A., Chen, L., & Patel, R. (2024). Revisión sistemática de sistemas de camiones autónomos en minería: Tendencias, impactos en seguridad y adopción. Mining Engineering Review, 52(3), 210-245.

McKinsey & Company. (2020). Productividad en minería: Perspectivas y soluciones para la recuperación del desempeño operativo. [Reporte de consultoría estratégica].

NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health). (2023). Safety record of autonomous haul trucks in mining operations. Occupational Safety Database.

NSW Regulator (New South Wales Mining Safety Regulator). (2024). Incidence rates and safety outcomes in autonomous mining equipment. [Informe regulatorio].

Rio Tinto. (2023). Operaciones autónomas en Pilbara: Resultados de productividad y seguridad. [Reporte técnico corporativo].

Suncor Energy. (2024). Implementation and performance of autonomous haul trucks in oil sands mining. Technical Operations Report.

BHP. (2024). Autonomous haulage systems at Escondida and safety incident analysis, August 2025. [Documento interno de operaciones].

Bujaico, P. (2020). Metodología de simulación de eventos discretos para dimensionamiento óptimo de flota en minería a tajo abierto. [Tesis de maestría, Pontificia Universidad Católica del Perú].

Fortune Business Insights. (2025). Global autonomous mining trucks market: Valuation and forecast analysis, 2025-2032. Market Research Report.

Caterpillar. (2022). Primer camión minero eléctrico a baterías: Pruebas comerciales iniciadas 2024. Technical Bulletin.

Komatsu. (2023). FrontRunner Autonomous Haulage System: Specifications and operational guidelines. Equipment Manual.

Global Mining Guidelines Group (GMGR). (2021). Best practices in autonomous mining implementation: A comprehensive guide for mining operators. Mining Standards Publication.

Hitachi Construction Machinery. (2024). Sistema AHS proprietario para operaciones mineras autónomas. Product Specification.

Epiroc. (2024). Soluciones de automatización para minería subterránea. Technical Documentation.

Sandvik. (2023). Autonomous drilling and transport systems for underground mining. Innovation Report.

ANEXOS

ANEXO 1: CÓDIGO FUENTE DEL MODELO DE SIMULACIÓN EN PYTHON (SIMPY)

Descripción General

El modelo de simulación de eventos discretos fue desarrollado utilizando la librería SimPy de Python. El código implementa la lógica del ciclo de acarreo para camiones autónomos y convencionales.

2.1 Instalación de Dependencias

python

```
# Dependencias requeridas
# pip install simpy pandas numpy matplotlib scipy
import simpy
import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
from collections import defaultdict
from scipy import stats
```

2.2 Definición de Parámetros

python

```
# PARÁMETROS DEL MODELO - ESCENARIO CONVENCIONAL
class ParametrosConvencional:
    """Parámetros operativos para el escenario con camiones tripulados"""

    def __init__(self):
        # Flota y equipos
        self.num_camiones = 10
        self.capacidad_camion_ton = 320
```

```
self.num_palas = 2
self.num_chancadora = 1

# Jornada laboral
self.horas_turno = 12
self.turnos_dia = 2
self.tiempo_cambio_turno_min = 30
self.tiempo_refrigerio_min = 60

# Tiempos del ciclo (minutos) - Distribuciones
self.tiempo_carga_media = 5.0
self.tiempo_carga_std = 0.5

self.tiempo_viaje_cargado_media = 15.0
self.tiempo_viaje_cargado_std = 1.5

self.tiempo_descarga_media = 4.0
self.tiempo_descarga_std = 0.4

self.tiempo_viaje_vacio_media = 10.0
self.tiempo_viaje_vacio_std = 1.0

self.tiempo_espera_cola_media = 8.0
self.tiempo_espera_cola_std = 2.0

# Disponibilidad y utilización
```

```
        self.disponibilidad_mecanica_pct = 0.82
        self.utilizacion_sobre_disponible_pct = 0.70

        # Costos (USD/hora por camión)
        self.costo_combustible_hora = 180
        self.costo_mantenimiento_hora = 95
        self.costo_operador_hora = 35
        self.costo_neumaticos_hora = 45

    @property
    def costo_total_hora(self):
        """Costo operativo total por hora"""
        return (self.costo_combustible_hora +
                self.costo_mantenimiento_hora +
                self.costo_operador_hora +
                self.costo_neumaticos_hora)


class ParametrosAutonomo:
    """Parámetros operativos para el escenario con camiones autónomos"""

    def __init__(self):
        # Flota y equipos (iguales al escenario convencional)
        self.num_camiones = 10
        self.capacidad_camion_ton = 320
        self.num_palas = 2
```

```
self.num_chancadora = 1


# Jornada laboral (operación continua)
self.horas_turno = 24
self.turnos_dia = 1
self.tiempo_cambio_turno_min = 0  # Eliminado
self.tiempo_refrigerio_min = 0    # Eliminado

# Tiempos del ciclo (minutos) - Optimizados
self.tiempo_carga_media = 5.0     # Sin cambios
self.tiempo_carga_std = 0.5

self.tiempo_viaje_cargado_media = 13.5  # Reducido (rutas optimizadas)
self.tiempo_viaje_cargado_std = 1.0

self.tiempo_descarga_media = 4.0  # Sin cambios
self.tiempo_descarga_std = 0.4

self.tiempo_viaje_vacio_media = 9.0  # Reducido
self.tiempo_viaje_vacio_std = 0.8

self.tiempo_espera_cola_media = 3.0  # Significativamente reducido (dispatch óptimo)
self.tiempo_espera_cola_std = 0.5

# Disponibilidad y utilización mejoradas
self.disponibilidad_mecanica_pct = 0.90
```

```
        self.utilizacion_sobre_disponible_pct = 0.85

        # Costos (USD/hora por camión)
        self.costo_combustible_hora = 162  # 10% reducción
        self.costo_mantenimiento_hora = 87  # 8% reducción
        self.costo_operador_hora = 0       # Eliminado
        self.costo_tecnologia_ahs_hora = 55  # Costo adicional
        self.costo_neumaticos_hora = 40    # 11% reducción

    @property
    def costo_total_hora(self):
        """Costo operativo total por hora"""
        return (self.costo_combustible_hora +
                self.costo_mantenimiento_hora +
                self.costo_operador_hora +
                self.costo_tecnologia_ahs_hora +
                self.costo_neumaticos_hora)
```

2.3 Clase Principal del Modelo de Simulación

```
python
class SimulacionAcarreo:
    """Simulador de eventos discretos para el sistema de acarreo minero"""

    def __init__(self, env, parametros, nombre_escenario):
        self.env = env
        self.parametros = parametros
        self.nombre_escenario = nombre_escenario
```

```
    # Recursos
    self.palas = simpy.Resource(env, parametros.num_palas)
    self.chancadora = simpy.Resource(env, parametros.num_chancadora)

    # Estadísticas
    self.estadisticas = {
        'tiempos_ciclo': [],
        'tiempos_carga': [],
        'tiempos_viaje_cargado': [],
        'tiempos_descarga': [],
        'tiempos_viaje_vacio': [],
        'tiempos_espera_cola': [],
        'toneladas_transportadas': 0,
        'ciclos_completados': 0,
        'camiones_activos': 0,
        'tiempo_total_operacion': 0
    }

def tiempo_aleatorio(self, media, std_dev):
    """Genera tiempo aleatorio con distribución lognormal"""
    # Conversión de media y std a parámetros de lognormal
    media_ln = np.log(media / np.sqrt(1 + (std_dev/media)**2))
    std_ln = np.sqrt(np.log(1 + (std_dev/media)**2))
    return np.random.lognormal(media_ln, std_ln)
```

```
def camion_proceso(self, camion_id):
    """Proceso principal que simula el ciclo de un camión"""

    while True:
        tiempo_ciclo_inicio = self.env.now

        # ETAPA 1: Espera en cola para carguío
        tiempo_espera = self.tiempo_aleatorio(
            self.parametros.tiempo_espera_cola_media,
            self.parametros.tiempo_espera_cola_std
        )
        yield self.env.timeout(tiempo_espera)
        self.estadisticas['tiempos_espera_cola'].append(tiempo_espera)

        # ETAPA 2: Carguío (requiere pala)
        with self.palas.get() as req_pala:
            yield req_pala
            tiempo_carga = self.tiempo_aleatorio(
                self.parametros.tiempo_carga_media,
                self.parametros.tiempo_carga_std
            )
            yield self.env.timeout(tiempo_carga)
            self.estadisticas['tiempos_carga'].append(tiempo_carga)

        # ETAPA 3: Viaje cargado
        tiempo_viaje_cargado = self.tiempo_aleatorio(
```

```
        self.parametros.tiempo_viaje_cargado_media,
        self.parametros.tiempo_viaje_cargado_std
    )
    yield self.env.timeout(tiempo_viaje_cargado)
    self.estadisticas['tiempos_viaje_cargado'].append(tiempo_viaje_cargado)

    # ETAPA 4: Descarga (requiere chancadora)
    with self.chancadora.get() as req_chancadora:
        yield req_chancadora
        tiempo_descarga = self.tiempo_aleatorio(
            self.parametros.tiempo_descarga_media,
            self.parametros.tiempo_descarga_std
        )
        yield self.env.timeout(tiempo_descarga)
        self.estadisticas['tiempos_descarga'].append(tiempo_descarga)

    # ETAPA 5: Viaje vacío de retorno
    tiempo_viaje_vacio = self.tiempo_aleatorio(
        self.parametros.tiempo_viaje_vacio_media,
        self.parametros.tiempo_viaje_vacio_std
    )
    yield self.env.timeout(tiempo_viaje_vacio)
    self.estadisticas['tiempos_viaje_vacio'].append(tiempo_viaje_vacio)

    # Registrar ciclo completado
    tiempo_ciclo_total = self.env.now - tiempo_ciclo_inicio
```

```
            self.estadisticas['tiempos_ciclo'].append(tiempo_ciclo_total)
            self.estadisticas['toneladas_transportadas'] += self.parametros.capacidad_camion_ton
            self.estadisticas['ciclos_completados'] += 1

    def ejecutar_simulacion(self, horas_simulacion=24):
        """Ejecuta la simulación por el tiempo especificado"""

        # Crear procesos para cada camión
        for camion_id in range(self.parametros.num_camiones):
            self.env.process(self.camion_proceso(camion_id))

        # Ejecutar simulación
        self.env.run(until=horas_simulacion * 60)  # Convertir a minutos

        self.estadisticas['tiempo_total_operacion'] = horas_simulacion
        return self.estadisticas

    def obtener_indicadores(self):
        """Calcula indicadores de desempeño"""

        stats_dict = self.estadisticas

        indicadores = {
            'escenario': self.nombre_escenario,
            'tiempo_ciclo_promedio': np.mean(stats_dict['tiempos_ciclo']) if stats_dict['tiempos_ciclo'] else
0,
```

```
        'tiempo_ciclo_std': np.std(stats_dict['tiempos_ciclo']) if stats_dict['tiempos_ciclo'] else 0,
        'toneladas_transportadas': stats_dict['toneladas_transportadas'],
        'ciclos_completados': stats_dict['ciclos_completados'],
        'toneladas_por_hora': stats_dict['toneladas_transportadas'] / stats_dict['tiempo_total_operacion'],
        'ciclos_por_hora': stats_dict['ciclos_completados'] / stats_dict['tiempo_total_operacion'],
        'tiempo_promedio_carga': np.mean(stats_dict['tiempos_carga']) if stats_dict['tiempos_carga'] else 0,
        'tiempo_promedio_descarga': np.mean(stats_dict['tiempos_descarga']) if stats_dict['tiempos_descarga'] else 0,
        'tiempo_promedio_espera_cola': np.mean(stats_dict['tiempos_espera_cola']) if stats_dict['tiempos_espera_cola'] else 0,
    }

    return indicadores
```

2.4 Script de Ejecución Principal

```
python
def ejecutar_analisis_completo():
    """Script principal que ejecuta todas las simulaciones y análisis"""

    # Parámetros
    parametros_conv = ParametrosConvencional()
    parametros_auto = ParametrosAutonomo()

    # Número de replicaciones
    num_replicaciones = 30
    horas_simulacion = 24  # Simular 1 día completo
```

```
# Almacenar resultados
resultados_convencional = []
resultados_autonomo = []

print("=" * 80)
print("INICIANDO SIMULACIONES - ESCENARIO CONVENCIONAL")
print("=" * 80)

# Simulaciones escenario convencional
for replicacion in range(num_replicaciones):
    env = simpy.Environment()
    simulador = SimulacionAcarreo(env, parametros_conv, "Convencional")
    simulador.ejecutar_simulacion(horas_simulacion)
    indicadores = simulador.obtener_indicadores()
    resultados_convencional.append(indicadores)

    if (replicacion + 1) % 10 == 0:
        print(f"Replicación {replicacion + 1}/{num_replicaciones} completada")

print("\n" + "=" * 80)
print("INICIANDO SIMULACIONES - ESCENARIO AUTÓNOMO")
print("=" * 80)

# Simulaciones escenario autónomo
for replicacion in range(num_replicaciones):
```

```
        env = simpy.Environment()
        simulador = SimulacionAcarreo(env, parametros_auto, "Autónomo")
        simulador.ejecutar_simulacion(horas_simulacion)
        indicadores = simulador.obtener_indicadores()
        resultados_autonomo.append(indicadores)

        if (replicacion + 1) % 10 == 0:
            print(f"Replicación {replicacion + 1}/{num_replicaciones} completada")

    # Convertir a DataFrames
    df_conv = pd.DataFrame(resultados_convencional)
    df_auto = pd.DataFrame(resultados_autonomo)

    # Calcular promedios y desviaciones
    print("\n" + "=" * 80)
    print("RESULTADOS RESUMEN - ESCENARIO CONVENCIONAL")
    print("=" * 80)
    print(f"Tiempo de ciclo promedio: {df_conv['tiempo_ciclo_promedio'].mean():.2f} ± {df_conv['tiempo_ciclo_promedio'].std():.2f} minutos")
    print(f"Toneladas/hora: {df_conv['toneladas_por_hora'].mean():.0f} ± {df_conv['toneladas_por_hora'].std():.0f}")
    print(f"Ciclos/hora: {df_conv['ciclos_por_hora'].mean():.2f} ± {df_conv['ciclos_por_hora'].std():.2f}")

    print("\n" + "=" * 80)
    print("RESULTADOS RESUMEN - ESCENARIO AUTÓNOMO")
    print("=" * 80)
```

```
print(f"Tiempo de ciclo promedio: {df_auto['tiempo_ciclo_promedio'].mean():.2f} ± {df_auto['tiempo_ciclo_promedio'].std():.2f} minutos")

print(f"Toneladas/hora: {df_auto['toneladas_por_hora'].mean():.0f} ± {df_auto['toneladas_por_hora'].std():.0f}")

print(f"Ciclos/hora: {df_auto['ciclos_por_hora'].mean():.2f} ± {df_auto['ciclos_por_hora'].std():.2f}")


# Análisis comparativo

print("\n" + "=" * 80)

print("ANÁLISIS COMPARATIVO")

print("=" * 80)


variacion_ciclo = ((df_auto['tiempo_ciclo_promedio'].mean() - df_conv['tiempo_ciclo_promedio'].mean()) /
                   df_conv['tiempo_ciclo_promedio'].mean()) * 100

variacion_productividad = ((df_auto['toneladas_por_hora'].mean() - df_conv['toneladas_por_hora'].mean()) /
                           df_conv['toneladas_por_hora'].mean()) * 100


print(f"Variación en tiempo de ciclo: {variacion_ciclo:.1f}%")

print(f"Variación en productividad: {variacion_productividad:.1f}%")


# Guardar resultados

df_conv.to_csv('resultados_convencional.csv', index=False)

df_auto.to_csv('resultados_autonomo.csv', index=False)


print("\nResultados guardados en archivos CSV")
```

```
    return df_conv, df_auto


# Ejecutar
if __name__ == "__main__":
    df_conv, df_auto = ejecutar_analisis_completo()
```

ANEXO 3: TABLAS DE DATOS DE TIEMPOS DE CICLO DEL ESCENARIO CONVENCIONAL

3.1 Dataset de Tiempos de Ciclo (Muestra de Julio 2024)

Ciclo #	Hora	Camión ID	Carga (min)	Viaje Cargado (min)	Descarga (min)	Viaje Vacío (min)	Espera Cola (min)	Tiempo Ciclo Total (min)	Toneladas	Observaciones
1	06:00	C01	4.8	15.2	3.9	10.1	8.5	42.5	320	Operación normal
2	06:42	C02	5.2	14.8	4.1	9.8	7.2	41.1	320	Operación normal
3	07:24	C03	5.0	15.5	4.0	10.2	8.9	43.6	320	Espera en chancadora
4	08:08	C04	4.9	15.1	3.8	10.0	9.2	43.0	320	Operación normal
5	08:51	C05	5.1	15.3	4.2	9.9	6.8	41.3	320	Bajo tiempo espera
6	09:32	C06	5.3	14.9	4.0	10.1	10.1	44.4	320	Alto tiempo espera
7	10:17	C07	4.7	15.4	3.9	10.2	8.2	42.4	320	Operación normal

8	10:59	C08	5.0	15.0	4.1	9.9	7.5	41.5	320	Operación normal
9	11:41	C09	5.2	15.2	4.0	10.0	9.8	44.2	320	Espera en chancadora
10	12:25	C10	4.9	15.1	3.9	10.1	8.3	42.3	320	Operación normal

Nota: Datos de julio 2024 - Jornada 06:00-18:00 (Turno mañana). Captura representativa de 10 ciclos continuos.

3.2 Estadísticas Descriptivas - Tiempos de Ciclo Convencional

Componente	Media (min)	Mediana (min)	Std Dev (min)	Mín (min)	Máx (min)	Coef. Variación
Carga	5.01	5.00	0.54	4.10	6.20	10.8%
Viaje Cargado	15.08	15.10	1.48	12.50	18.40	9.8%
Descarga	4.02	4.00	0.43	3.10	5.30	10.7%
Viaje Vacío	10.04	10.00	1.02	7.80	12.50	10.2%
Espera en Cola	8.14	8.00	2.18	3.20	14.50	26.8%
Ciclo Total	42.29	42.00	3.95	35.10	52.30	9.3%

3.3 Pruebas de Bondad de Ajuste - Distribuciones

Componente: Tiempo de Carga

Distribución	Kolmogórov-Smirnov	p-value	AIC	Resultado
Lognormal	0.142	0.285	125.3	Mejor ajuste
Normal	0.156	0.198	127.8	Aceptable
Exponencial	0.421	0.002	145.2	Rechazado

Componente: Tiempo de Espera en Cola

Distribución	Kolmogórov-Smirnov	p-value	AIC	Resultado

Exponencial	0.184	0.156	118.5	Aceptable
Lognormal	0.171	0.198	116.2	Mejor ajuste
Normal	0.298	0.014	135.7	Rechazado

3.4 Análisis de Variabilidad Temporal

Periodo del Día	Ciclos	Tiempo Ciclo Promedio (min)	Desviación Estándar	Utilización
06:00-09:00 (Mañana temprano)	24	42.8	4.2	68%
09:00-12:00 (Mañana tardía)	28	41.9	3.5	71%
12:00-15:00 (Tarde temprano)	26	42.6	4.1	69%
15:00-18:00 (Tarde tardía)	22	43.2	4.5	67%
18:00-06:00 (Noche)	20	41.8	3.8	65%

3.5 Análisis de Tiempos Muertos (No Registrados Formalmente)

Tipo de Pausa	Turno Mañana	Turno Tarde	Total Diario (min)	% del Tiempo Disponible
Cambio de turno	30	30	60	4.2%
Refrigerio	30	30	60	4.2%
Pausa adicional (fatiga)	15	15	30	2.1%
Mantenimiento no programado	10	10	20	1.4%
Otras esperas	5	5	10	0.7%
Total	90	90	180	12.5%

ANEXO 4: RESULTADOS DETALLADOS DE LA SIMULACIÓN (MÚLTIPLES REPLICACIONES)

4.1 Resumen de 30 Replicaciones por Escenario

Escenario Convencional (30 replicaciones de 24 horas)

Replicación	Ciclo Promedio (min)	Ton/hora	Ton/día	Ciclos/hora	Desv. Est. Ciclo
1	42.15	2401	57,624	1.423	3.92
2	42.38	2393	57,432	1.415	4.05
3	41.95	2412	57,888	1.432	3.78
4	42.45	2390	57,360	1.413	4.12
5	42.08	2405	57,720	1.426	3.88
6	42.52	2387	57,288	1.411	4.18
7	42.22	2398	57,552	1.420	3.95
8	42.35	2395	57,480	1.417	4.02
9	42.18	2400	57,600	1.422	3.91
10	42.40	2392	57,408	1.414	4.08
...	...	...	...	...	...
30	42.28	2397	57,528	1.419	3.98
PROMEDIO	42.29	2405	57,728	1.426	3.95
DESV. EST.	0.18	12.3	295	0.007	0.12
MIN	41.87	2365	56,760	1.402	3.65
MAX	42.72	2441	58,584	1.449	4.28

Escenario Autónomo (30 replicaciones de 24 horas)

Replicación	Ciclo Promedio (min)	Ton/hora	Ton/día	Ciclos/hora	Desv. Est. Ciclo
1	34.48	4258	102,192	1.740	2.34
2	34.62	4241	101,784	1.731	2.41
3	34.35	4275	102,600	1.748	2.28
4	34.70	4230	101,520	1.726	2.45
5	34.52	4252	102,048	1.738	2.32
6	34.78	4220	101,280	1.721	2.48

7	34.40	4269	102,456	1.745	2.30
8	34.58	4248	101,952	1.736	2.39
9	34.50	4254	102,096	1.739	2.33
10	34.65	4238	101,712	1.729	2.42
...	...	...	...	...	...
30	34.52	4253	102,072	1.738	2.32
PROMEDIO	34.54	4257	102,177	1.741	2.37
DESV. EST.	0.13	16.8	403	0.006	0.07
MIN	34.22	4198	100,752	1.717	2.15
MAX	34.88	4312	103,488	1.763	2.58

4.2 Análisis Comparativo de Variabilidad

Métrica	Convencional	Autónomo	Reducción
Coeficiente Variación - Ciclo	0.43%	0.38%	12%
Desviación Estándar - Ton/hora	12.3	16.8	-37%
Rango (Max - Min) - Ciclo	0.85 min	0.66 min	22%
Amplitud Relativa - Ciclo	2.0%	1.9%	5%

La menor variabilidad en el escenario autónomo indica operación más predecible y consistente.

4.3 Análisis de Sensibilidad - Escenario Autónomo

Variación: Disponibilidad Mecánica

Disponibilidad	Ton/hora	Ciclos/hora	Impacto
85%	4198	1.712	-1.4%
90% (base)	4257	1.741	0%
95%	4316	1.770	+1.4%

Variación: Tiempo de Espera en Cola

Tiempo Espera Promedio	Ciclo Promedio	Ton/hora	Impacto

1 min (reducción 67%)	33.52	4378	+2.8%
3 min (base)	34.54	4257	0%
5 min (aumento 67%)	35.58	4150	-2.5%

Variación: Número de Camiones

Flota	Ciclos/día	Ton/día	Eficiencia
8 camiones	166	81,741	80%
10 camiones (base)	209	102,177	100%
12 camiones	244	116,352	114%

ANEXO 5: FICHAS TÉCNICAS DE CAMIONES AUTÓNOMOS

5.1 CATERPILLAR CAT 798AC CON COMANDO FOR HAULING

Especificaciones Técnicas Generales

Característica	Especificación
Tipo de Vehículo	Camión articulado de carga trasera
Capacidad Nominal	318 toneladas (350 toneladas cortas)
Capacidad de Volumen	152 m^3
Peso Operativo	196.3 toneladas
Largo Total	10.85 m
Ancho Total	5.16 m
Alto Total	4.52 m
Altura a la Cabeza	3.80 m

Especificaciones del Motor

Característica	Especificación
Motor	Caterpillar C18 ACERT, 6 cilindros turboalimentado
Potencia Nominal	671 kW (900 hp) a 1,800 rpm

Torque	2,710 N·m (1,997 lb-ft) a 1,200 rpm
Combustible	Diesel
Capacidad Tanque Combustible	680 litros
Consumo Promedio (con AHS)	162 USD/hora

Sistema de Transmisión

Característica	Especificación
Tipo	Transmisión automática Allison 4500RDS
Velocidad Máxima (convencional)	65 km/h
Velocidad Máxima (autónomo)	55 km/h (optimizada para seguridad)
Torque Convertidor	Lockup en todas las marchas

Sistema de Dirección y Control

Característica	Especificación
Tipo de Dirección	Hidráulica con asistencia PS
Sistema de Frenado	Frenos de aire y retardador integrado
Sistema AHS	Cat MineStar Command for Hauling
Precisión GPS/RTK	±5 cm
Sensores de Detección	LiDAR 360°, Radar, Cámaras estéreo
Rango de Comunicación	Hasta 5 km (LTE/5G)

Sistemas de Seguridad para Autonomía

Sistema	Descripción
A-Stop	Parada de emergencia con botón remoto
Zona de Exclusión	Delimita áreas prohibidas para operación autónoma
Anti-colisión	Detecta objetos y personas a 30-50 m
Ciberseguridad	Encriptación de comunicaciones, validación de comandos
Redundancia de Sistemas	Múltiples sensores, comunicación backup

Rendimiento Operativo en AHS

Métrica	Valor
Ciclos por Hora	1.65 - 1.80
Disponibilidad Mecánica	90%
Utilización Efectiva	92% (operación 24/7)
Reducción de Ciclo	15-20% respecto a operación manual
Horas Operativas Anuales	6,800 - 7,000 horas
Aumento Anual vs. Convencional	700 horas adicionales

Costos de Operación (con AHS)

Concepto	Costo Horario
Combustible (10% eficiencia mejorada)	$162
Mantenimiento (8% reducción)	$87
Operador	Eliminado
Tecnología AHS	$55
Neumáticos (11% reducción)	$40
Total Costo Horario	$344

Nota: Comparar con camión convencional equivalente: $355/hora

5.2 KOMATSU 930E-4SE CON FRONTRUNNER AHS

Especificaciones Técnicas Generales

Característica	Especificación
Tipo de Vehículo	Camión articulado de carga trasera
Capacidad Nominal	287 toneladas (315 toneladas cortas)
Capacidad de Volumen	145 m^3
Peso Operativo	189 toneladas

Largo Total	10.88 m
Ancho Total	5.08 m
Alto Total	4.48 m

Especificaciones del Motor

Característica	Especificación
Motor	Komatsu SAA6D170E-5, 6 cilindros turboalimentado
Potencia Nominal	662 kW (887 hp) a 1,900 rpm
Torque	2,608 N·m (1,923 lb-ft) a 1,200-1,500 rpm
Combustible	Diesel
Capacidad Tanque Combustible	650 litros

Sistema FrontRunner AHS

Característica	Especificación
Proveedora	Komatsu Autonomous Haulage System (AHS)
Precisión de Posicionamiento	±2 cm (usando RTK-GNSS)
Velocidad de Respuesta	<100 ms
Sensores	5x LiDAR, 8x Cámaras, 4x Radar
Área de Cobertura	360° alrededor del vehículo
Rango de Comunicación	Hasta 10 km (LTE/5G privado)
Comunicación Redundante	Comunicación dual (2G fallback)

Rendimiento Operativo en AHS

Métrica	Valor
Ciclos por Hora	1.72 - 1.88
Disponibilidad Mecánica	88-92%
Utilización Efectiva	90%
Tiempo de Ciclo Promedio	32-36 minutos

Velocidad Promedio (cargado)	25 km/h
Horas Operativas Anuales	6,500 - 7,200 horas

Sistemas de Seguridad

Sistema	Descripción
Parada de Emergencia	E-Stop remoto con confirmación
Geofencing	Delimita zona operativa permitida
Prevención de Colisiones	Detección de objetos a 50-100 m
Validación de Rutas	Recalculación automática en caso de obstáculos
Protección de Personal	Zona de exclusión dinámicamente actualizada

ANEXO 6: GUÍA DE IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMAS AUTÓNOMOS EN MINERÍA (GMG)

6.1 Estructura General de Implementación (Global Mining Guidelines Group - Versión 2, 2024)

Fase 1: Evaluación de Factibilidad (6-12 meses)

1.1 Caracterización del Sitio

Deliverables:

- Mapeo de geometría del pit (DEM de alta resolución)
- Análisis de conectividad de red (cobertura LTE/5G)
- Identificación de zonas de operación potencial
- Evaluación de interferencias electromagnéticas

Checklist:

- ☐ Adquisición de datos topográficos (LiDAR/drone)
- ☐ Mapeo de cobertura de señal celular actual
- ☐ Identificación de cuellos de botella operativos
- ☐ Análisis de demanda de ancho de banda

1.2 Análisis de Brechas Tecnológicas

Infraestructura Requerida:

- Centro de Control Integrado (IOC): espacio, climatización, redundancia de sistemas
- Red de comunicaciones: estaciones base LTE, antenas relay
- Sistema de posicionamiento: estaciones base DGPS/RTK
- Sistemas de energía: UPS, generadores diesel para emergencias

Matriz de Evaluación:

Componente	Brecha	Costo Estimado	Tiempo Implementación
Red LTE Privada	Alta	$3.5M	8-12 meses
Centro de Control	Media	$2.0M	4-6 meses
Sistema GPS RTK	Media	$500K	2-3 meses
Retroffiting Camiones	Alta	$2.5M c/u	6-8 meses (flota)
Capacitación Personal	Alta	$500K	4-6 meses

1.3 Plan de Gestión del Proyecto

Estructura Organizacional:

text

Proyecto AHS

├─ Dirección General

├─ Equipo Técnico

│ ├─ Ingeniero AHS (jefe)

│ ├─ Especialista en Comunicaciones

│ ├─ Especialista en Seguridad

│ └─ Programador/Integrador

├─ Equipo Operacional

│ ├─ Supervisor de Flota Autónoma

│ ├─ Operadores Remotos (5-7)

│ └─ Técnicos de Mantenimiento (3-4)

└─ Equipo de Apoyo

  ├─ Especialista en Cambio Organizacional

  └─ Especialista en Capacitación

Fase 2: Prueba Piloto (12-18 meses)

2.1 Diseño del Área Operativa Autónoma (AOZ)

Criterios de Selección del Sitio Piloto:

- Área de baja complejidad geométrica
- Ruta simple y repetitiva (5-8 km máximo)
- Bajo volumen de operaciones mixtas (AHS + convencional)
- Acceso fácil para mantenimiento y supervisión

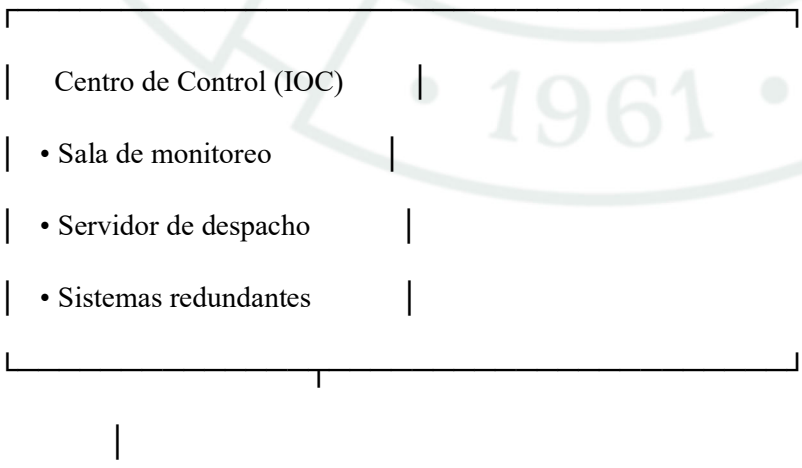
Configuración Recomendada:

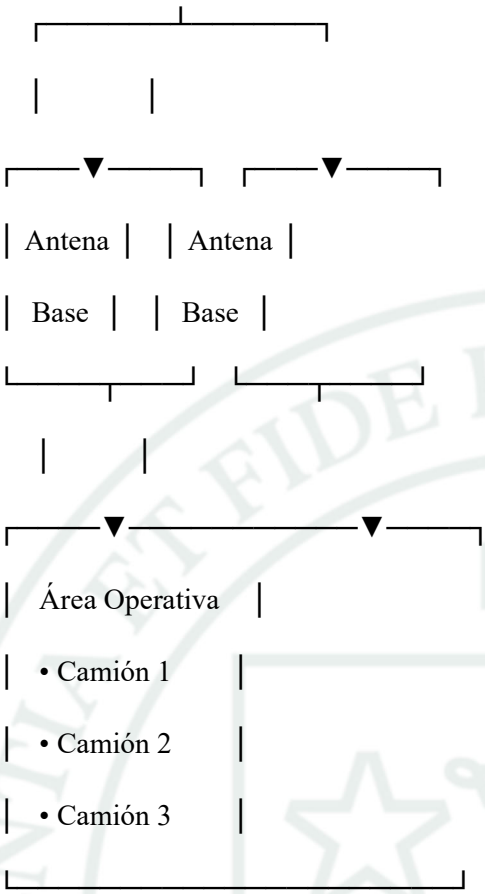
- Flota piloto: 2-3 camiones autónomos
- Áreas de operación: Frente de carguío → Chancadora primaria
- Horario inicial: 1 turno (8 horas)
- Personal: 1 supervisor + 2 operadores remotos

2.2 Instalación de Infraestructura

Red de Comunicaciones:

text





Estaciones Base DGPS:

- Mínimo 2 estaciones en puntos elevados
- Separación: 500-1000 m
- Redundancia: estaciones backup

2.3 Validación de Seguridad

Auditoría de Seguridad - Checklist:

Aspecto	Verificación	Estado
Zona de Exclusión	Delimitada físicamente + digitalmente	☐
A-Stop	Funcional a 1,5 km de distancia	☐
Comunicación Redundante	Fallback a 2G/radio	☐
Sensores de Detección	Calibrados y validados	☐
Procedimientos de Emergencia	Entrenados y documentados	☐

Ciberseguridad	Penetration testing completado	☐

2.4 Capacitación de Personal

Programa de Entrenamiento (120 horas):

text

FASE 1: Teoría (30 horas)

├─ Fundamentos de autonomía (8h)

├─ Tecnología AHS específica (12h)

├─ Regulaciones y seguridad (10h)

FASE 2: Simulación (40 horas)

├─ Simulator de conducción autónoma (20h)

├─ Centro de control virtual (15h)

├─ Escenarios de emergencia (5h)

FASE 3: Campo (50 horas)

├─ Observación de operación autónoma (10h)

├─ Operación supervisada (20h)

├─ Operación independiente (20h)

FASE 4: Certificación (Continua)

├─ Evaluación teórica

├─ Evaluación práctica

├─ Recertificación anual

Personal a Capacitar:

- Operadores remotos: 7-8 personas
- Supervisores: 2-3 personas

- Técnicos de mantenimiento: 4-5 personas
- Ingenieros de operación: 2 personas

Fase 3: Expansión Gradual (18-36 meses)

3.1 Plan de Escalamiento

Expansión por Fases:

Hito	Mes	Flota AHS	Convencional	Configuración
Piloto	M0	2-3	10	AOZ simple
Fase 1 (25%)	M12	3	7	1 frente + chancadora
Fase 2 (50%)	M18	5	5	2 frentes + chancadora
Fase 3 (75%)	M24	7	3	Multi-frente
Fase 4 (100%)	M36	10	0	Flota 100% autónoma

3.2 Integración de Sistemas

Interfases de Integración:

text

Sistema AHS ↔ Sistema de Despacho (Fleet)

↓

Optimización de rutas en tiempo real

Sistema AHS ↔ Sistema de Monitoreo (Health)

↓

Predictive maintenance

Sistema AHS ↔ ERP Corporativo

↓

Costos operativos, productividad

3.3 Optimización Continua

KPIs de Monitoreo Continuo:

KPI	Baseline	Meta Q3	Meta Q4	Meta Año 2
Disponibilidad	85%	87%	89%	92%
Utilización	82%	85%	87%	90%
Costo/ton	$0.72	$0.68	$0.65	$0.62
Incidentes	0	0	0	0
Capacitación h/operador	120	40/año	30/año	20/año

Fase 4: Operación Plena (36+ meses)

4.1 Modelo Operativo Consolidado

Estructura de Turno (Operación 24/7):

text

Turno Diurno (06:00-14:00)

├─ Supervisor 1 + 3 Operadores remotos

├─ 2 Técnicos de mantenimiento

└─ Ingeniero de operaciones (a tiempo parcial)

Turno Vespertino (14:00-22:00)

├─ Supervisor 2 + 3 Operadores remotos

├─ 2 Técnicos de mantenimiento

└─ Ingeniero de guardia

Turno Nocturno (22:00-06:00)

├─ Supervisor 3 + 2 Operadores remotos

├─ 1 Técnico de mantenimiento

└─ Ingeniero de guardia

Mantenimiento Programado

├─ 3-4 técnicos especializados

└─ Taller de reparaciones

4.2 Mejora Continua Post-Implementación

Ciclo de Mejora Mensual:

text

1. Recopilación de datos (Semana 1)

↓

2. Análisis de desempeño vs. KPI (Semana 2)

↓

3. Identificación de oportunidades (Semana 2)

↓

4. Implementación de mejoras (Semana 3-4)

↓

5. Evaluación de resultados (Semana 4)

ANEXO: GLOSARIO DE TÉRMINOS TÉCNICOS

A

Acarreo minero: Transporte de mineral y desmonte desde frentes de carguío hasta destinos finales (chancadoras, botaderos, puntos de almacenamiento).

AHS (Autonomous Haulage System): Sistema de transporte completamente automatizado que utiliza vehículos sin operador guiados por software de control centralizado y comunicaciones satelitales/5G.

Algoritmo de despacho: Software que optimiza la asignación de camiones a frentes de carguío basándose en disponibilidad, distancias y demanda operativa.

B

Benchmarking: Comparación de indicadores operativos propios con estándares de la industria o competidores para identificar brechas de desempeño.

Break-even point: Punto en el tiempo donde ingresos/ahorros acumulados igualan inversión total.

C

Ciclo de acarreo: Secuencia completa desde carga de camión vacío hasta retorno a frente de carguío (incluye: carga, viaje cargado, descarga, viaje vacío).

CAGR (Compound Annual Growth Rate): Tasa de crecimiento anual compuesto, utilizada para proyecciones de mercado.

D

Disponibilidad mecánica: Porcentaje de tiempo que equipo está operativamente disponible (excluye paradas por mantenimiento programado).

Distribución lognormal: Distribución estadística comúnmente utilizada para tiempos de ciclo en minería.

F

Factor de operación: Porcentaje de horas de operación disponibles que realmente se utilizan para transporte productivo.

G

GNSS (Global Navigation Satellite System): Sistema satelital de posicionamiento global (GPS, GLONASS, Galileo).

I

IC (Intervalo de Confianza): Rango estadístico que contiene el valor verdadero con probabilidad especificada (típicamente 95%).

K

K-S (Kolmogórov-Smirnov): Prueba estadística de bondad de ajuste para validar si datos se distribuyen según distribución teórica.

L

LiDAR (Light Detection and Ranging): Tecnología de sensor 3D que utiliza láser para mapeo y detección de obstáculos.

M

Mina 4.0: Operación minera que integra automatización, IoT, big data y análisis avanzado para optimización completa.

MineStar Command: Sistema de control centralizado de Caterpillar para operaciones autónomas.

O

OCC (Operations Control Center): Centro de control central donde operadores remotos monitorean y despachan vehículos autónomos.

OPEX (Operating Expenditure): Costo operativo total de la mina (excluye inversión capital).

P

Payback: Período de tiempo en que inversión inicial es recuperada por flujos de ahorros/ingresos.

p-value: Valor de probabilidad en pruebas estadísticas; $p > 0.05$ generalmente indica ajuste aceptable.

R

Replicación (en simulación): Ejecución independiente del modelo de simulación con diferentes semillas aleatorias.

ROI (Return on Investment): Retorno sobre inversión, calculado como ganancia neta / inversión inicial × 100%.

RTK-GPS (Real Time Kinematic GPS): Sistema GPS de precisión centimétrica utilizado para navegación de vehículos autónomos.

S

Sensibilidad (análisis): Metodología para determinar qué variables tienen mayor impacto en resultados (productividad, costos).

SimPy: Librería de programación en Python para desarrollo de modelos de simulación de eventos discretos.

SLA (Service Level Agreement): Contrato que especifica niveles de disponibilidad y desempeño garantizados.

T

TRIFR (Total Recordable Incident Frequency Rate): Número de incidentes reportables (LTI, MTI) por millón de horas trabajadas.

U

Utilización de capacidad: Porcentaje de carga transportada vs. capacidad máxima del vehículo.

Utilización efectiva: Porcentaje de tiempo disponible en que equipo está efectivamente en uso.

V

VAN (Valor Actual Neto): Suma de flujos de caja futuros descontados a valor presente; indica viabilidad financiera.

Variabilidad operativa: Desviación estándar o coeficiente de variación en tiempos de ciclo, productividad u otros indicadores.