



Universidad Católica de Santa María

**Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales
Escuela Profesional de Ingeniería de Minas**

**Aplicación de la metodología Lean Six Sigma para la optimización del
proceso de acarreo en operaciones de minería a tajo abierto en el sur del
Perú**

Tesis presentada por:

Ayala Pineda, Aarón

ORCID: 0009-0001-6710-5697

para optar el Título Profesional de Ingeniero de Minas

Asesor:

Mgter. 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, 06 de Mayo del 2026

Dictamen: 015578-C-EPIM-2026

Visto el borrador del expediente 015578, presentado por:

2018402031 - AYALA PINEDA AARÓN

Titulado:

**APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA LEAN SIX SIGMA PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO
DE ACARREO EN OPERACIONES DE MINERÍA A TAJO ABIERTO EN EL SUR DEL PERÚ**

Nuestro dictamen es:

APROBADO

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

INGENIERO DE MINAS

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



**29635304 - MORALES VALDIVIA JAVIER ANTONIO
DICTAMINADOR**



**46969384 - TICONA CORRALES SERGIO
DICTAMINADOR**



APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA LEAN SIX SIGMA PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE ACARREO EN OPERACIONES DE MINERÍA A TAJO ABIERTO EN EL SUR DEL PERÚ

INFORME DE ORIGINALIDAD

2%	4%	3%	2%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	anfei.mx Fuente de Internet	1%
2	repositorio.unsaac.edu.pe Fuente de Internet	1%
3	hdl.handle.net Fuente de Internet	1%

Excluir citas

Apagado

Excluir coincidencias

< 1%

Excluir bibliografía

Apagado

DEDICATORIA

A mis padres Fany Pineda y Elmer Ayala, por su amor incondicional, su apoyo permanente y por nunca perder la esperanza en mí. Su confianza ha sido la base sobre la cual he construido cada uno de mis logros.

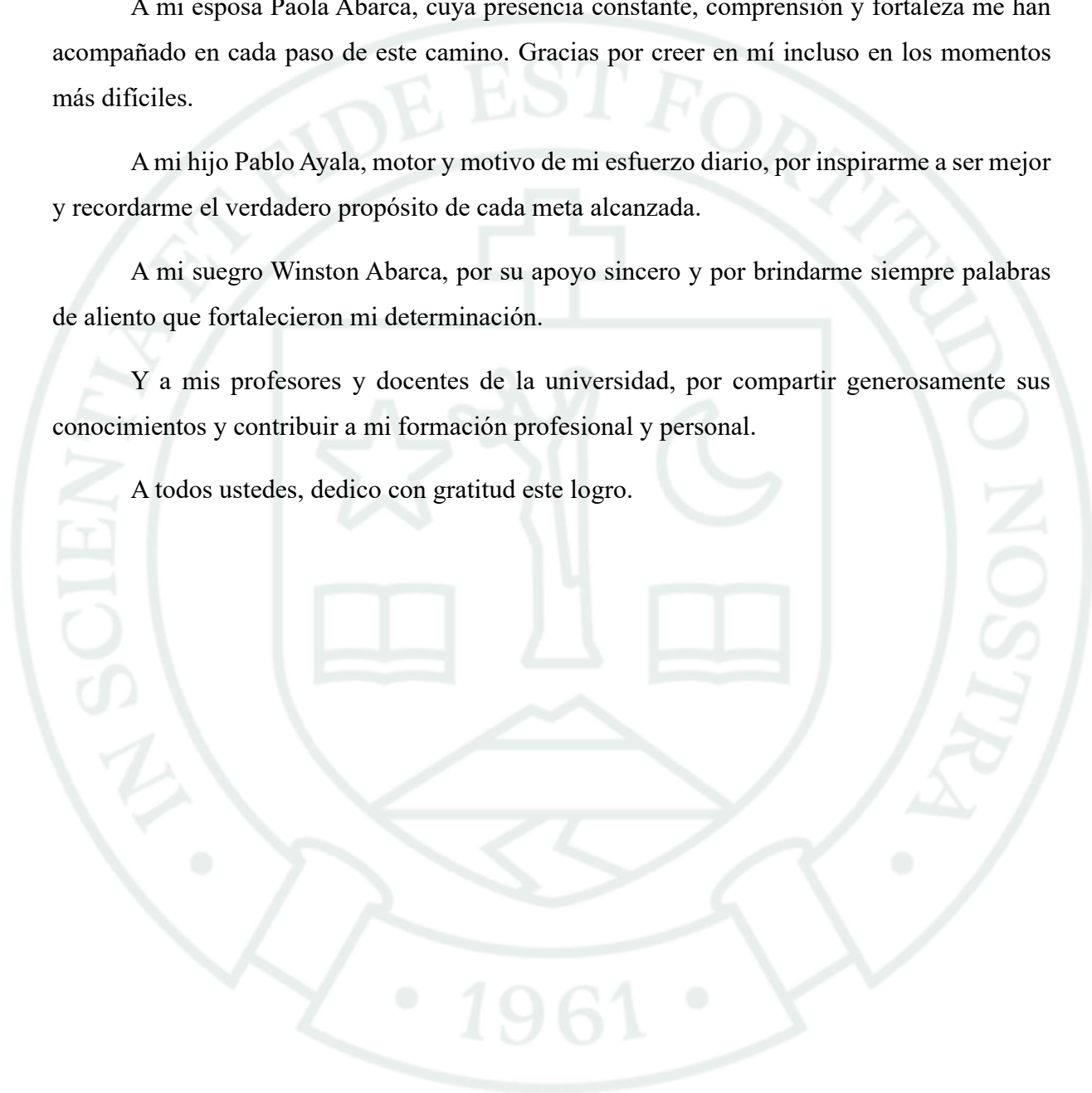
A mi esposa Paola Abarca, cuya presencia constante, comprensión y fortaleza me han acompañado en cada paso de este camino. Gracias por creer en mí incluso en los momentos más difíciles.

A mi hijo Pablo Ayala, motor y motivo de mi esfuerzo diario, por inspirarme a ser mejor y recordarme el verdadero propósito de cada meta alcanzada.

A mi suegro Winston Abarca, por su apoyo sincero y por brindarme siempre palabras de aliento que fortalecieron mi determinación.

Y a mis profesores y docentes de la universidad, por compartir generosamente sus conocimientos y contribuir a mi formación profesional y personal.

A todos ustedes, dedico con gratitud este logro.



AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a mis padres Fany Pineda y Elmer Ayala por su apoyo constante, por su confianza en mí y por enseñarme el valor del esfuerzo. A mi esposa Paola Abarca, por su compañía incondicional y su fortaleza en cada etapa de este proceso. A mi hijo Pablo Ayala, motivo e inspiración de cada logro, agradezco por dar sentido a este camino.

A mi suegro Winston Abarca, por su apoyo y palabras de aliento que siempre me impulsaron a seguir adelante.

Mi sincero agradecimiento también a mi asesor de tesis Mg. Omar Paredes, cuya orientación, dedicación y profesionalismo fueron fundamentales para la culminación de este trabajo. Así como a mis profesores y docentes de la universidad, por compartir sus conocimientos y contribuir de manera significativa a mi formación.

También agradezco a Dios porque sin su bendición nada de esto sería posible.

Y por último quiero agradecerme a mí, por toda esa fuerza, paciencia, perseverancia, por toda la resiliencia que obtuve en el camino, y por todas las veces que quise rendirme, pero no me deje vencer.

A todos ustedes, gracias por ser parte de este logro.

EPÍGRAFE

“La excelencia operativa no se improvisa: se diseña, se mide y se mejora.”

Lean Six Sigma



RESUMEN

La presente investigación desarrolla la aplicación de la metodología Lean Six Sigma en el proceso de acarreo de material en una operación minera a tajo abierto ubicada en el sur del Perú, con el propósito de incrementar la eficiencia operativa y consolidar prácticas de mejora continua. Para tal fin, se implementó el ciclo DMAIC (Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar), el cual permitió estructurar un análisis riguroso y orientar las acciones correctivas de manera sistemática.

Durante la fase de diagnóstico se identificaron diversos factores que afectaban directamente el desempeño de la operación, tales como la presencia de tiempos improductivos recurrentes, deficiencias en la coordinación entre áreas operativas, ausencia de indicadores de gestión estandarizados y fallas vinculadas al mantenimiento preventivo y correctivo de la flota de acarreo. Estos aspectos fueron determinados como causas raíz que limitaban la productividad y generaban sobre costos en la operación minera.

La implementación de estas acciones requirió una inversión total de USD 122,450, que consideró tanto los costos estratégicos (capacitación, adquisición tecnológica y supervisión técnica), como los costos operativos (mano de obra, mantenimiento y suministros asociados). Como resultado, se proyectó un ahorro anual de USD 240,300, lo que representa una relación costo-beneficio de 1.96, demostrando la viabilidad técnica y económica del proyecto.

Los resultados alcanzados evidenciaron mejoras notables en indicadores críticos de gestión, tales como la reducción del tiempo de ciclo, el incremento de la disponibilidad y confiabilidad de los equipos de acarreo, la optimización en el consumo de combustible y la disminución del trabajo derivado de fallas operativas. Asimismo, la metodología contribuyó a consolidar una cultura de mejora continua dentro de la organización, generando impactos positivos tanto en la productividad como en la sostenibilidad económica.

En conclusión, la aplicación de Lean Six Sigma en operaciones mineras a tajo abierto constituye una herramienta eficaz para la optimización de procesos, la gestión eficiente de recursos y la creación de valor económico sostenible.

Palabras clave: Lean Six Sigma, DMAIC, acarreo minero.

ABSTRACT

This research develops the application of the Lean Six Sigma methodology in the haulage process of an open-pit mining operation located in southern Peru, with the purpose of increasing operational efficiency and consolidating continuous improvement practices. For this purpose, the DMAIC cycle (Define, Measure, Analyze, Improve, and Control) was implemented, which allowed for a rigorous analysis and the systematic orientation of corrective actions.

During the diagnostic phase, several factors directly affecting the performance of the operation were identified, such as the presence of recurring idle times, deficiencies in coordination among operational areas, the absence of standardized management indicators, and failures related to preventive and corrective maintenance of the haulage fleet. These aspects were determined to be root causes that limited productivity and generated additional costs in the mining operation.

The implementation of these actions required a total investment of USD 122,450, which included both strategic costs (training, technological acquisition, and technical supervision) and operational costs (labor, maintenance, and associated supplies). As a result, an annual saving of USD 240,300 was projected, representing a cost-benefit ratio of 1.96, demonstrating the technical and economic feasibility of the project.

The results showed significant improvements in key management indicators, such as the reduction of cycle time, the increase in the availability and reliability of haulage equipment, the optimization of fuel consumption, and the decrease in rework derived from operational failures. Likewise, the methodology contributed to consolidating a culture of continuous improvement within the organization, generating positive impacts on both productivity and economic sustainability.

In conclusion, the application of Lean Six Sigma in open-pit mining operations constitutes an effective tool for process optimization, efficient resource management, and the creation of sustainable economic value.

Keywords: Lean Six Sigma, DMAIC, mining haulage.

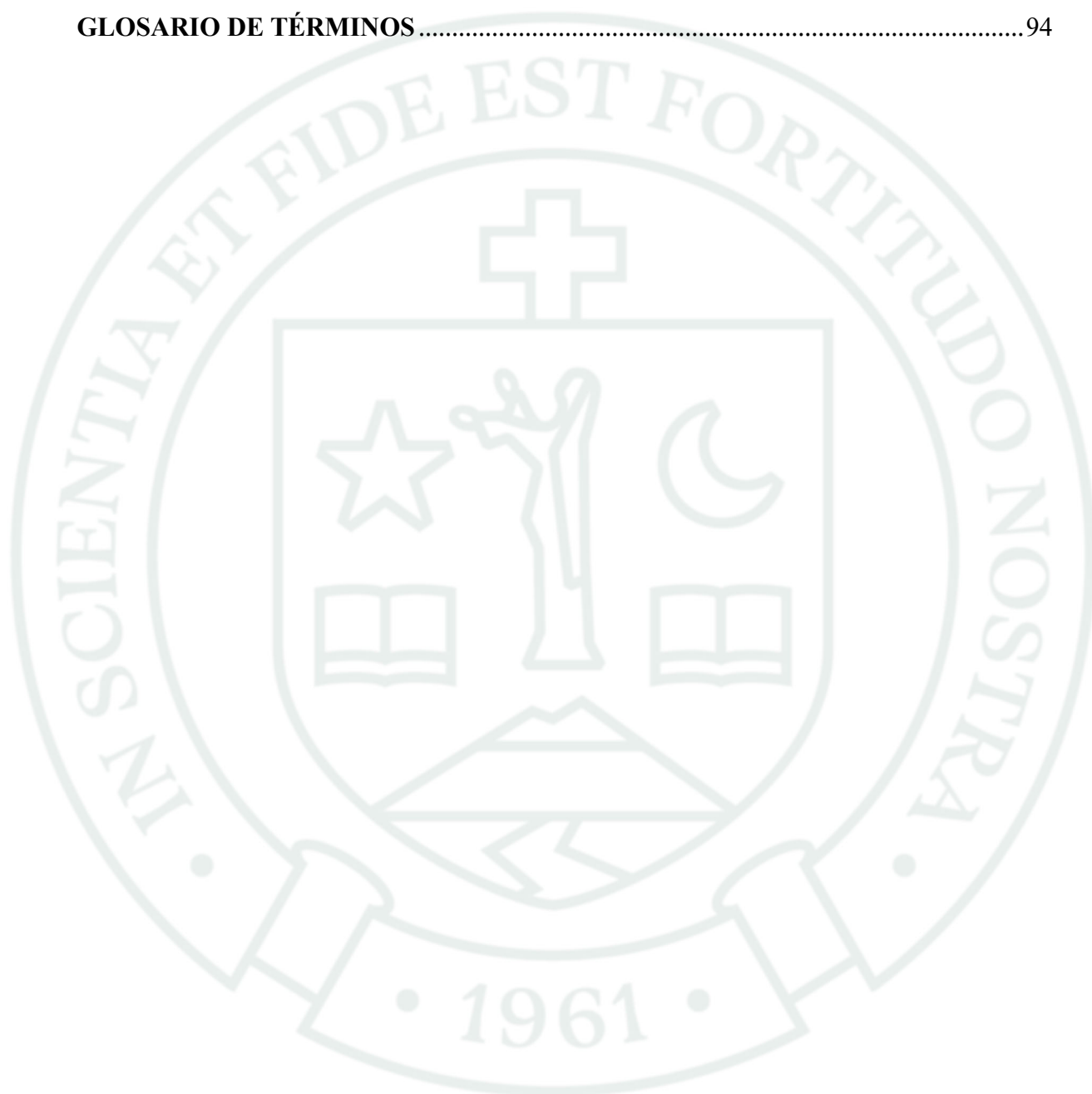
ÍNDICE

DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTOS	
EPIGRAFE	
RESUMEN	
ABSTRACT	
INTRODUCCIÓN	1
I. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN	2
1.1. Planteamiento del Problema.....	2
1.2. Objetivos de la Investigación	4
1.2.1. Objetivo General.....	4
1.2.2. Objetivos Específicos.....	4
1.3. Preguntas de Investigación.....	4
1.3.1. Pregunta General.....	4
1.3.2. Preguntas Específicas.....	5
1.4. Línea de Investigación	5
1.5. Palabras Clave	6
1.6. Justificación e Importancia.....	7
1.6.1. Justificación Teórica	7
1.6.2. Justificación Práctica	8
1.6.3. Justificación Económica	9
1.7. Importancia.....	11
1.7.1. Descripción de la Solución	12
II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	14
2.1. Estado del Arte	14
2.1.1. Antecedentes Internacionales.....	14

2.1.2.	Antecedentes Nacionales	18
2.2.	Bases Teóricas	21
2.2.1.	Lean Manufacturing y su aplicación en minería.....	23
2.2.2.	Six Sigma en la gestión de procesos mineros	24
2.2.3.	Sinergia Lean Six Sigma (LSS) en minería a cielo abierto	25
2.2.4.	El proceso de acarreo en minería a tajo abierto	26
2.2.5.	Indicadores clave de rendimiento (KPI) en transporte minero	27
2.2.6.	Tecnologías emergentes en optimización de acarreo	28
2.2.7.	Gestión de la variabilidad en procesos mineros.....	29
2.2.8.	Cultura organizacional y mejora continua en minería	30
2.2.9.	Impacto económico de la optimización del acarreo.....	32
2.3.	Hipótesis de la Investigación.....	34
2.3.1.	Hipótesis General.....	34
2.3.2.	Hipótesis Específicas	34
2.4.	Variables	34
2.4.1.	Variables Independientes	34
2.4.2.	Variables Dependientes	34
III.	MARCO METODOLÓGICO.....	37
3.1	Alcances y Limitaciones	37
3.2.	Aporte.....	38
3.3.	Tipo y Nivel de Investigación	39
3.4.	Población y Muestra.....	40
3.4.1.	Población.....	40
3.4.2.	Muestra	40
3.5.	Métodos, Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos	40
3.5.1.	Método general:	41
3.6.	Técnicas e instrumentos:	41

3.6.1.	Observación estructurada.....	41
3.2.1.	Análisis documental.....	41
3.2.2.	Encuesta estructurada.....	41
3.2.3.	Medición directa y toma de tiempos.....	42
3.2.4.	Análisis estadístico inferencial	42
3.2.5.	Análisis de costo-beneficio	42
IV.	ESTUDIO ECONÓMICO.....	44
4.1.	Introducción	44
4.2.	Supuestos de cálculo	44
4.2.1.	Costo Operativo por Hora de Camión (COh)	44
4.2.2.	Número de Camiones en Operación (N).....	45
4.2.3.	Promedio de Ciclos por Camión por Turno (C).....	46
4.2.4.	Número de Turnos Mensuales (T)	50
4.2.5.	Reducción Promedio Proyectada del Tiempo de Ciclo (ΔT_c)	50
4.3.	Metodología de evaluación	56
4.3.1.	Cálculo del Ahorro Mensual por Reducción Directa del Tiempo de Ciclo	57
4.3.2.	Proyección de Ahorro Anual (Teórico vs. Operativo)	58
4.3.3.	Cálculo del Retorno de la Inversión (ROI)	59
4.3.4.	Cálculo del Periodo de Recuperación (Payback).....	59
V.	DESCRIPCIÓN DE LA PROPUESTA	61
5.1.	Fundamentación	61
5.2.	Objetivos de la propuesta	61
5.3.	Estrategia metodológica	61
5.4.	Resultados esperados.....	62
5.5.	Discusión esperada.....	62
VI.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	63
VII.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	84

VIII. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA COMPUTACIONAL.....	86
IX. CONCLUSIONES	88
X. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	89
REFERENCIAS.....	90
GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	94

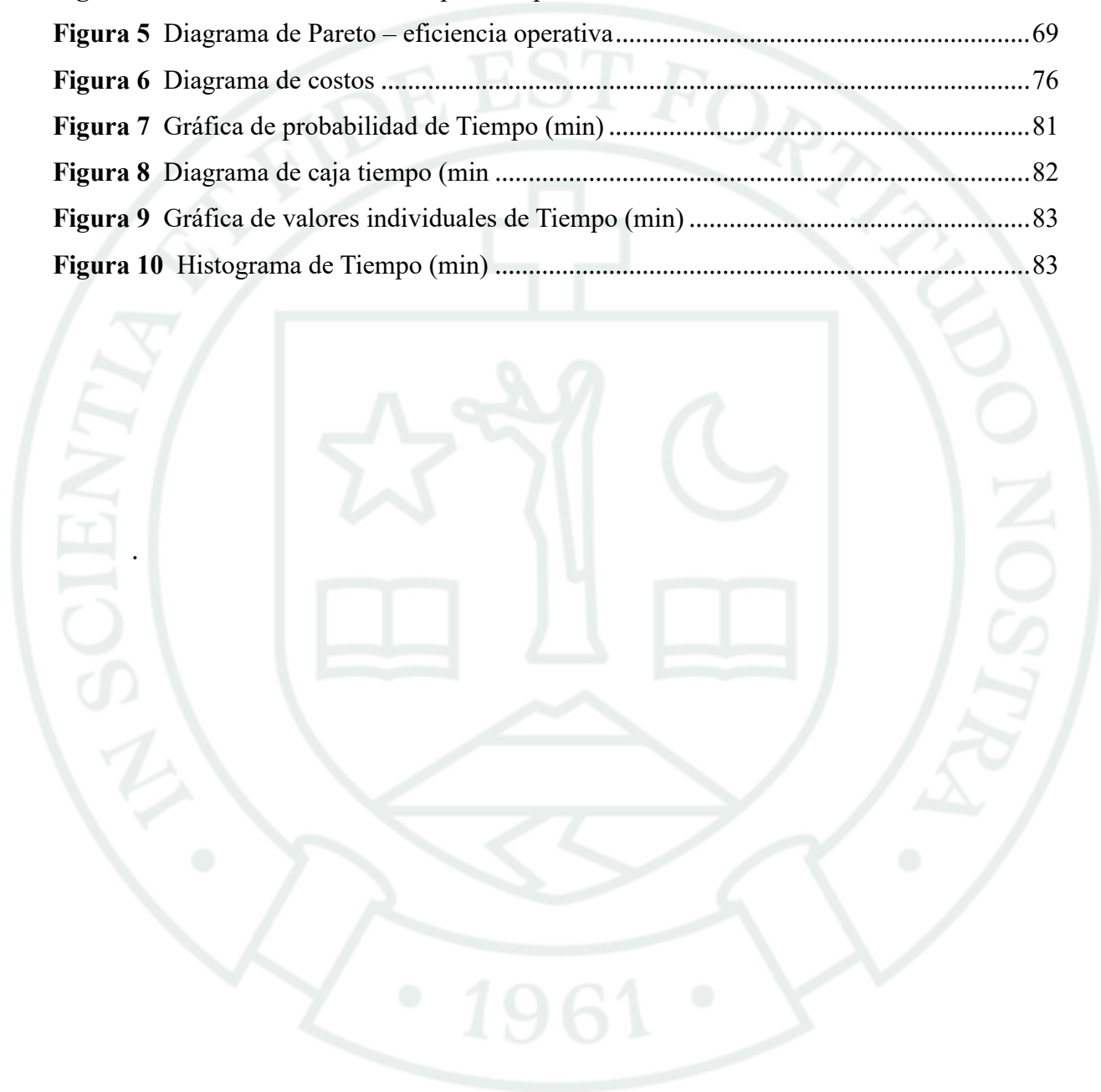


ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Matriz de Operacionalización de Variables.....	35
Tabla 2	Métodos, técnicas e instrumentos de investigación	43
Tabla 3	Inversión en Tecnología / Implementación	46
Tabla 4	Promedio de Número de Ciclos (ciclos/turno).....	48
Tabla 5	Indicador Clave	51
Tabla 6	Costos Directos en la Implementación.....	53
Tabla 7	Costos Indirectos en la Implementación	54
Tabla 8	Resumen de Parámetros para el Modelo Económico.....	56
Tabla 9	Identificación de factores de ineficiencia.....	64
Tabla 10	Análisis técnicos por indicadores y sus posibles causas	68
Tabla 11	Métodos, técnicas e instrumentos de investigación.....	74
Tabla 12	Comparación de Indicadores Operativos: Antes vs. Después de Lean Six Sigma..	75
Tabla 13	Inversión Total del Proyecto.....	76
Tabla 14	Inversión operativa.....	77
Tabla 15	Mejora de indicadores se basan los beneficios económicos.	78
Tabla 16	Tiempos netos productivos de acarreo antes y después	80

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Promedio De Eficiencias Operativa Por Meses	49
Figura 2 Promedio de tiempos efectivos por meses	63
Figura 3 Diagrama de Pareto con tiempos efectivos	65
Figura 4 Promedio de eficiencias operativa por meses.....	67
Figura 5 Diagrama de Pareto – eficiencia operativa.....	69
Figura 6 Diagrama de costos	76
Figura 7 Gráfica de probabilidad de Tiempo (min)	81
Figura 8 Diagrama de caja tiempo (min)	82
Figura 9 Gráfica de valores individuales de Tiempo (min)	83
Figura 10 Histograma de Tiempo (min)	83



INTRODUCCIÓN

La industria minera enfrenta desafíos crecientes en eficiencia, sostenibilidad y competitividad, especialmente en operaciones de acarreo, donde los tiempos improductivos, el retrabajo y la falta de estandarización afectan directamente la productividad. En este contexto, la aplicación de metodologías de mejora continua como Lean Six Sigma se presenta como una alternativa estratégica para optimizar procesos críticos.

Esta tesis tiene como objetivo principal aplicar el ciclo DMAIC para identificar, analizar y corregir las principales causas de ineficiencia en el proceso de acarreo de mineral. Para ello, se utilizaron herramientas estadísticas, análisis de datos operativos, diagramas de causa-efecto y técnicas de priorización como Pareto. La investigación se desarrolló en una operación minera del sur del Perú, con enfoque técnico, económico y organizacional.

Además del diseño e implementación de mejoras operativas, se evaluó el impacto económico del proyecto mediante un análisis detallado de la relación costo-beneficio. La integración de tecnología, capacitación del talento humano y supervisión metodológica permitió consolidar resultados sostenibles y replicables en otros contextos mineros.

Esta tesis busca aportar evidencia práctica sobre la efectividad de Lean Six Sigma en minería, promoviendo una gestión basada en datos, eficiencia operativa y mejora continua.

I. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Planteamiento del Problema

Debido a la deficiente gestión de los procesos logísticos para el transporte de mineral y estéril, se ha observado una notable disminución en la efectividad de los tiempos de ciclo en las operaciones de acarreo que se realizan diariamente en varias minas a cielo abierto del sur del Perú. Si bien este problema se identificó inicialmente en ciertas fases de acarreo durante el segundo trimestre de 2024, se ha extendido sistemáticamente a toda la cadena operativa, generando efectos negativos acumulativos que impactan la producción planificada, así como los gastos relacionados con el uso de recursos humanos y de equipo. Los tiempos de acarreo ineficaces limitan la capacidad de la operación para responder a las crecientes demandas de producción y comprometen la estabilidad de los indicadores clave de rendimiento (KPI).

La falta de control estadístico sobre las variables críticas del transporte, las decisiones reactivas tomadas ante fallas operativas que resultaron en mantenimiento correctivo en lugar de preventivo, la falta de herramientas sistematizadas para medir el rendimiento operativo en tiempo real y una cultura operativa que priorizaba la mejora continua y la reducción de la variabilidad de los procesos son las principales causas de esta ineficiencia, según análisis técnicos realizados en campo. Además, la segmentación de los tipos de retrasos no es adecuada, lo que dificulta la gestión eficiente del tiempo no productivo y limita las posibilidades de mejora basadas en datos fiables.

En vista de esto, sugerimos utilizar la técnica Lean Six Sigma, reconocida mundialmente por su capacidad para optimizar las operaciones mediante la optimización del tiempo, la eliminación de desperdicios y la reducción de la variabilidad. Lean Six Sigma integra dos metodologías poderosas: la técnica Six Sigma, que utiliza herramientas estadísticas para gestionar la variabilidad y genera operaciones más estables y predecibles, y la mentalidad Lean,

que prioriza la eliminación de todo aquello que no aporta valor. Esta técnica, aplicada al transporte en minería a cielo abierto, permite identificar con precisión las ineficiencias en las fases de carga, transferencia, descarga y retorno del ciclo de transporte, y desarrollar soluciones basadas en datos para optimizar los tiempos de entrega.

Lean Six Sigma ha demostrado ser beneficioso para mejorar procesos cruciales en la minería a través de diversos proyectos de investigación e implementaciones recientes. Por ejemplo, investigaciones realizadas en minas de cobre de Brasil (Da Costa et al., 2022) y Chile (Ramírez et al., 2021) revelaron que la implementación de proyectos DMAIC (Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar) mejoró los tiempos de transporte efectivo entre un 12 % y un 18 %. De forma similar, Lean Six Sigma se utilizó en operaciones a cielo abierto en Sudáfrica, optimizando el uso del personal y los equipos operativos, a la vez que redujo el tiempo de inactividad en un 25 % (Moyo & Ncube, 2020).

En conclusión, un problema crucial que afecta la productividad, los gastos y la efectividad general de las operaciones mineras en el sur del Perú es la necesidad de maximizar los tiempos de transporte eficientes en las operaciones a cielo abierto. El desgaste operativo, las pérdidas financieras y la acumulación de ineficiencias se deben a la falta de una estrategia metódica y basada en datos. Por lo tanto, la gestión del transporte cambiará de un enfoque reactivo e inconexo a uno proactivo y estandarizado, centrado en la mejora continua mediante el uso de la metodología Lean Six Sigma, que es una alternativa viable, probada y flexible. Por lo tanto, este estudio busca apoyar la creación de soluciones viables, reproducibles y con base científica que impulsen la competitividad de la industria minera peruana en un entorno cada vez más avanzado y exigente tecnológicamente.

1.2.Objetivos de la Investigación

1.2.1. Objetivo General

Optimizar el proceso de acarreo en operaciones de minería a tajo abierto en el sur del Perú mediante la aplicación de la metodología Lean Six Sigma.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Diagnosticar el estado actual del proceso de acarreo, identificando los principales factores que generan ineficiencia en los tiempos efectivos de transporte en una operación minera a tajo abierto del sur del Perú.
- Aplicar sistemáticamente la metodología Lean Six Sigma, utilizando el ciclo DMAIC, para diseñar e implementar mejoras operativas en el proceso de acarreo.
- Evaluar el impacto económico de la aplicación de Lean Six Sigma en el proceso de acarreo, mediante un análisis detallado de la relación costo-beneficio.
- Determinar la significancia estadística de las mejoras obtenidas en los tiempos efectivos de acarreo, comparando los resultados antes y después de la intervención con Lean Six Sigma.

1.3.Preguntas de Investigación

1.3.1. Pregunta General

¿La aplicación de la metodología Lean Six Sigma optimiza el proceso de acarreo en operaciones de minería a tajo abierto en el sur del Perú?

1.3.2. Preguntas Específicas

- ¿Cuál es la situación operativa actual del proceso de acarreo en una operación minera a tajo abierto del sur del Perú, antes de aplicar la metodología Lean Six Sigma?
- ¿Cómo puede implementarse la metodología Lean Six Sigma, a través del ciclo DMAIC, en el proceso de acarreo de una mina a tajo abierto?
- ¿Qué relación costo-beneficio se obtiene al aplicar la metodología Lean Six Sigma en el proceso de acarreo de operaciones mineras a cielo abierto?
- ¿Qué nivel de mejora estadísticamente significativa se evidencia en el proceso de acarreo luego de aplicar la metodología Lean Six Sigma?

1.4. Línea de Investigación

Para este estudio, "Aplicación de la Metodología Lean Six Sigma para la Optimización de Tiempos de Acarreo Efectivos en Operaciones Mineras a Cielo Abierto en el Sur del Perú", se seleccionó la línea de investigación "Optimización de Procesos Mineros" en respuesta a la apremiante necesidad de impulsar la eficiencia operativa en un entorno altamente exigente y competitivo como el del sector minero. La base de este campo de estudio es el análisis, la reorganización y la optimización metódica de procesos importantes de la cadena de valor minera, con énfasis en la eficiencia de los recursos, la minimización del tiempo muerto, la estandarización de las operaciones y la garantía de la calidad de los resultados operativos.

Por lo tanto, la decisión de seguir esta línea de investigación no solo responde a una demanda específica de tiempos de transporte más rápidos, sino que también se alinea con las tendencias mundiales de automatización, transformación digital y excelencia operativa minera. Para fortalecer el desarrollo de una minería más efectiva, contemporánea y sostenible, se prevé

que los resultados de este estudio no solo ayuden a resolver un problema específico en el sur del Perú, sino que también generen conocimiento replicable que sirva de base para futuras intervenciones en otros procesos mineros cruciales.

1.5. Palabras Clave

- Lean Six Sigma
- Optimización de procesos
- Tiempos de acarreo
- Minería a tajo abierto
- Ciclo de acarreo
- Eficiencia operativa
- Mejora continua
- Gestión minera
- Reducción de variabilidad
- Productividad minera
- DMAIC
- Costos operacionales
- Análisis estadístico
- KPI minero

- Transporte de material

1.6. Justificación e Importancia

1.6.1. Justificación Teórica

Las horas de operación efectivas se ven directamente afectadas por diversas ineficiencias propias de la minería a cielo abierto, en particular en los procedimientos de transporte de materiales desde el frente de trabajo hasta las trituradoras o vertederos. La programación deficiente de la flota, los retrasos en las zonas de carga y descarga, y la variabilidad del ciclo de transporte son causas importantes de cuellos de botella y mayores gastos operativos. La implementación de principios Lean, en la minería permite identificar operaciones que no aportan valor y que deberían reducirse o eliminarse, como afirman Womack y Jones (2003). Estas ideas pueden aplicarse a cualquier industria que busque un flujo continuo y un valor añadido.

Basado en el enfoque DMAIC (Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar), Six Sigma ofrece un marco analítico riguroso que permite la toma de decisiones basada en datos y el análisis estadístico para abordar las causas subyacentes de la ineficiencia. Para impulsar la productividad en los procesos logísticos mineros, especialmente en el transporte de minerales, esta técnica se ha utilizado eficazmente en operaciones mineras en países como Canadá, Chile y Australia. George et al. (2005) sostienen que, en industrias con uso intensivo de capital como la minería, el uso de Lean Six Sigma permite mejores niveles de servicio, precios más bajos y una mayor calidad en los procesos de producción.

De manera similar, González y Saavedra (2022), así como Zhang et al. (2023) demostraron la aplicación de enfoques híbridos como Lean Six Sigma en minería puede generar mejoras notables en indicadores clave de rendimiento (KPI), como el tiempo de ciclo, el

número de viajes productivos diarios y la tasa de utilización de los equipos. Si se mantienen en el tiempo, estas mejoras reducen inmediatamente el costo por tonelada transportada, lo que aumenta la competitividad de la operación minera.

Por consiguiente, este estudio utiliza este marco teórico para proporcionar un modelo de aplicación Lean Six Sigma que maximiza los tiempos de transporte eficientes, lo que supone una mejora significativa en la gestión operativa del transporte minero. El estudio se justifica plenamente por la correlación directa entre la eficiencia del transporte y la rentabilidad operativa total, ya que un mejor uso de los recursos logísticos implica tanto ganancias financieras como un aumento de la sostenibilidad operativa de la mina a cielo abierto.

1.6.2. Justificación Práctica

Dado que se centra directamente en el transporte de materiales, una de las operaciones más importantes y costosas de la minería a cielo abierto, este estudio reviste gran importancia práctica. Los gastos operativos, el cumplimiento del plan de producción y la longevidad de los equipos se ven directamente afectados por los frecuentes problemas que muchas unidades mineras del sur del Perú experimentan con la eficacia del transporte de mineral y estéril. Desde esta perspectiva, el uso de la técnica Lean Six Sigma es una forma práctica y flexible de mejorar continuamente el rendimiento logístico minero.

En la práctica, la investigación busca localizar, examinar y abordar los cuellos de botella en los ciclos de transporte, como la baja rotación de la flota, los tiempos de carga inactivos, las demoras en la espera de los camiones y la congestión en las zonas de descarga. En realidad, estas deficiencias resultan en pérdidas financieras significativas debido al alto consumo de combustible, la mala utilización de los activos y la sobrecarga de trabajo del personal operativo. Se puede implementar un plan de acción tangible para optimizar el tiempo de transporte efectivo en cada turno mediante técnicas Lean (como el mapeo de valor y la eliminación de

desperdicios) y herramientas Six Sigma (como el análisis de variabilidad estadística y el control de procesos).

Además, al sugerir una técnica sistemática (DMAIC) que puede repetirse en todos los turnos y unidades operativas, la investigación ofrece consejos útiles para supervisores, ingenieros de planificación y gerentes de mina a cargo de las operaciones mineras. Además de solucionar problemas inmediatos, esto fomenta una cultura de desarrollo continuo basada en datos empíricos. La capacidad de proporcionar indicadores clave de rendimiento (KPI) precisos y cuantificables permitirá a los equipos directivos evaluar los efectos de cada mejora implementada.

Por último, pero no menos importante, esta investigación adquiere especial relevancia práctica al sugerir un enfoque lo suficientemente flexible como para adaptarse a las circunstancias geográficas, económicas y técnicas únicas de las operaciones mineras en el sur del Perú, caracterizadas por largas distancias de transporte, la variabilidad del terreno y las fluctuaciones en la disponibilidad de equipos. Esta investigación arrojará resultados mensurables, como la reducción del tiempo de inactividad, el aumento de la utilización de la flota y la reducción de los costos unitarios de transporte, lo que beneficiará a la empresa analizada y servirá de modelo para otras empresas comparables en la zona.

1.6.3. Justificación Económica

En una operación minera típica del sur del Perú, cada camión transporta en promedio 200 toneladas por ciclo, con un costo estimado de operación de USD 90/hora. Una mejora del 15 % en el tiempo efectivo de acarreo puede representar un ahorro mensual de más de USD 25,000 por camión operativo. La aplicación de Lean Six Sigma permite identificar estas pérdidas y generar mejoras que reducen los costos de operación por tonelada transportada.

Dado que el transporte de materiales es una de las actividades de una operación minera a cielo abierto que más influye en los costos operativos, la investigación propuesta, tiene una sólida base económica. La rentabilidad de la industria minera se ve directamente afectada por la optimización de este proceso, que representa hasta el 50 % de los costos operativos totales en varias operaciones mineras (Mular et al., 2021). El objetivo de aplicar la técnica Lean Six Sigma en esta situación es detectar y eliminar las ineficiencias en el tiempo de transporte para generar ahorros de costos cuantificables a largo plazo.

La implementación de Lean Six Sigma reduce el consumo de combustible por tonelada transportada, optimiza las rutas de transporte, aumenta la utilización de la flota y disminuye el tiempo de inactividad de los equipos de transporte desde una perspectiva económica. El margen operativo por tonelada de mineral procesado se ve afectado positivamente por estas características, ya que resultan en menores costos unitarios de transporte. Además, la reducción de horas de máquina innecesarias se traduce en un mantenimiento más económico, lo que aumenta la vida útil de los camiones y reduce la necesidad de comprar nuevos.

La técnica Lean Six Sigma, por otro lado, permite ahorrar sin necesidad de grandes gastos adicionales en maquinaria o infraestructura. Una pequeña inversión puede generar un beneficio económico al optimizar los recursos actuales mediante el rediseño de procesos, la reducción de la variabilidad y la eliminación de tareas sin valor añadido. Para las pequeñas y medianas empresas que buscan aumentar su competitividad sin realizar grandes inversiones de capital, esto resulta especialmente atractivo.

Finalmente, aumentar la eficiencia del transporte impulsa la productividad general del tajo, lo que ayuda a la empresa a cumplir con los objetivos de producción, reducir las multas por retrasos y mejorar el flujo de caja. Al integrarse en el sistema de gestión operativa, estas ventajas financieras también mejoran la sostenibilidad financiera del proyecto minero y

fortalecen su posición ante circunstancias desfavorables del mercado o fluctuaciones en los precios internacionales de los metales.

1.7. Importancia

Desde una perspectiva tanto técnica como estratégico-operativa, este estudio es crucial para la minería contemporánea. Optimizar los tiempos de transporte eficientes se convierte en un objetivo prioritario para las operaciones a cielo abierto en un entorno donde la competitividad de la industria minera reside en su capacidad para reducir gastos sin sacrificar la producción. Para solucionar las ineficiencias en el proceso de transporte y contribuir a aumentar el uso de los equipos, minimizar el tiempo de inactividad y mejorar la eficiencia operativa general, este estudio presenta la técnica Lean Six Sigma como una herramienta fiable y metódica.

El estudio es relevante desde un punto de vista técnico, ya que genera información que permite reconocer y reducir la imprevisibilidad operativa, uno de los principales factores que influyen en el rendimiento del manejo de materiales. Mediante el enfoque DMAIC (Definir, Medir, Analizar, Mejorar, Controlar) de la metodología Lean Six Sigma, se puede establecer un sistema de mejora continua basado en datos reales, lo que permite una toma de decisiones precisa y bien informada. En comparación con las técnicas de mejora convencionales, que carecen de rigor estadístico y de un seguimiento riguroso, esta metodología ofrece una ventaja metodológica.

La investigación también es destacable desde el punto de vista organizacional, ya que fomenta una cultura de eficiencia operativa al motivar al personal a identificar activamente pérdidas de tiempo, cuellos de botella y tareas que no contribuyen al proceso. Al promover un cambio en el estilo de gestión hacia uno más flexible y orientado a resultados, la iniciativa

mejora el rendimiento general de la empresa minera y su capacidad de adaptación a las condiciones cambiantes del mercado.

El estudio es relevante desde el punto de vista académico y científico, ya que integra conceptos de calidad y productividad industrial con aplicaciones prácticas en operaciones mineras, ampliando así el marco teórico y práctico de la ingeniería de minas. La industria minera en Latinoamérica aún es poco estudiada en cuanto a la aplicación inteligente de técnicas Lean y Six Sigma en procesos extractivos, pero este enfoque multidisciplinario ofrece nuevas vías de estudio en esta área.

1.7.1. Descripción de la Solución

Para reducir la imprevisibilidad y eliminar el desperdicio en el proceso de transporte en las operaciones mineras a cielo abierto del sur del Perú, se está implementando la metodología Lean Six Sigma (LSS) como parte de la solución propuesta. Este enfoque combina las ideas de Six Sigma, que se centra en el uso de técnicas estadísticas para reducir la variabilidad, con el sistema Lean, cuyo objetivo es eliminar las tareas sin valor añadido.

Características del producto a obtener

- El producto final de esta aplicación será un modelo de gestión optimizado para los tiempos efectivos de acarreo, basado en un sistema de mejora continua sustentado en el ciclo DMAIC (Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar). Este modelo incluirá:
- Diagnóstico detallado de los factores que generan tiempos ineficientes en el acarreo (esperas, demoras, congestión vial interna, rutas subóptimas).

- Propuesta de rediseño del flujo operacional, rutas optimizadas y uso más eficiente de equipos de acarreo.
- Indicadores clave de desempeño (KPIs) para monitorear en tiempo real los tiempos efectivos y las pérdidas operacionales.
- Manuales de procedimientos optimizados para operadores y supervisores.
- Capacitación al personal en herramientas Lean y Six Sigma.
- Estrategias de sostenibilidad y control para mantener los niveles óptimos alcanzados.
- Grado de satisfacción esperado
- Se espera que, con la implementación de esta solución, la operación minera logre los siguientes resultados:
 - Reducción de entre 10% a 20% en los tiempos no productivos de acarreo.
 - Incremento de la utilización efectiva de los equipos de acarreo en al menos un 15%.
 - Mejoras medibles en la productividad por turno de trabajo.
 - Disminución de los costos operacionales relacionados al acarreo, entre un 8% y 12%.
 - Reducción de emisiones asociadas a ralentí (vehículos detenidos ociosamente).
- Estos resultados, además de traducirse en beneficios económicos, aumentarán la satisfacción del equipo operativo, al proporcionarles herramientas más claras y procesos menos estresantes o inciertos.

II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. Estado del Arte

2.1.1. *Antecedentes Internacionales*

La Revista Internacional de Lean Six Sigma publicó un estudio de Hia et al. (2025) titulado "La aplicación de Lean Six Sigma para mejorar la efectividad general de los vehículos de transporte minero (MTOVE): un estudio de caso en una empresa minera". El objetivo del estudio era aumentar la eficiencia del transporte minero mediante la implementación de la metodología Lean Six Sigma en una operación minera a cielo abierto. El objetivo principal del proyecto fue optimizar el indicador MTOVE (Efectividad General de los Camiones en el Transporte Minero), que mide la eficiencia de los camiones de transporte con base en tres criterios: disponibilidad, rendimiento y calidad. Las principales causas de ineficiencia se identificaron como tiempos de inactividad durante los ciclos de carga y descarga, retrasos por mantenimiento inesperado y tiempos de espera excesivos mediante la técnica DMAIC (Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar). Se logró un aumento del 17.8% en la efectividad total del transporte mediante la implementación de medidas correctivas basadas en métodos estadísticos y análisis de causa raíz. Como resultado, la disponibilidad operativa de la flota de camiones aumentó, al reducirse considerablemente el tiempo de inactividad. En consonancia con los objetivos de este estudio en el sur del Perú, este demuestra que el uso metódico de Lean Six Sigma puede generar mejoras mensurables en la efectividad de los sistemas logísticos mineros, especialmente en el transporte.

Choi et al. (2022), en el estudio titulado "Optimization of haulage-truck system performance for ore production in open-pit mines using big data and machine learning-based methods", publicado en Resources Policy, se desarrolló una investigación con el objetivo de optimizar el rendimiento del sistema de acarreo de camiones en minas a tajo abierto mediante

la aplicación de big data y algoritmos de aprendizaje automático. Para ello, los autores integraron factores como la velocidad promedio, la duración de los ciclos, el consumo de combustible y la distancia recorrida, utilizando registros operativos de flotas mineras a gran escala. Se emplearon modelos predictivos y técnicas de minería de datos para procesar los datos e identificar tendencias de comportamiento y sugerir opciones de despacho más efectivas. Según los hallazgos, el uso de inteligencia artificial mejoró el uso de recursos y la asignación de rutas, a la vez que redujo el tiempo de inactividad hasta en un 12 %. Como resultado, la producción de la operación minera aumentó directamente, lo que ilustra cómo las tecnologías digitales tienen la capacidad de revolucionar el sistema de transporte convencional. Este estudio demuestra el valor de utilizar técnicas de vanguardia para el análisis y la mejora del transporte, y puede servir como guía útil para futuras investigaciones sobre la optimización eficiente del tiempo basada en Lean Six Sigma.

Xu et al. (2024), en el artículo titulado “Integrated Optimization of Production Scheduling and Haulage Route Planning in Open-Pit Mines”, el estudio se enfocó en optimizar de manera conjunta la programación de producción y la planificación de rutas de acarreo en minas a tajo abierto. Para ello, se desarrolló un modelo matemático integrado que considera tanto los tiempos de operación como las restricciones geotécnicas y logísticas, con el objetivo de minimizar los tiempos improductivos y los costos asociados al transporte de mineral y desmonte. La eficiencia del transporte se incrementó significativamente al reducir la duración total del ciclo hasta en un 18 % mediante simulaciones computacionales basadas en procedimientos de optimización combinatoria. Una importante contribución teórica para la investigación que busca aplicar metodologías como Lean Six Sigma al análisis de tiempos efectivos en operaciones mineras, particularmente en contextos similares a los de las minas del sur del Perú, es la demostración del estudio de que la planificación integrada puede mejorar significativamente la eficiencia operativa del transporte.

Baek & Choi (2020), en el estudio titulado “Deep neural network for predicting ore production by truck-haulage systems in open-pit mines”, publicado en la revista *Applied Sciences*, se planteó como objetivo principal predecir la producción de mineral en minas a tajo abierto a través del análisis del sistema de acarreo con camiones utilizando redes neuronales profundas. Para ello, se recopilaron datos operacionales de camiones, incluyendo el tiempo de ciclo, velocidad promedio, distancia de acarreo y tonelaje transportado. Mediante el uso de más de 20.000 conjuntos de datos históricos para entrenar un modelo de red neuronal profunda, los investigadores pudieron descubrir importantes tendencias operativas que impactan la productividad y lograr una precisión de predicción superior al 95 %. El enfoque sugerido facilitó la toma de decisiones de despacho y la asignación de recursos al predecir con precisión las reducciones en el rendimiento del transporte. Esta investigación concluyó que la integración de la inteligencia artificial en el sistema de transporte puede ser una forma eficaz de aumentar la eficiencia del proceso de extracción. Estos antecedentes son esenciales para el presente estudio, ya que demuestran cómo Lean Six Sigma y otros enfoques pueden optimizarse mediante la digitalización y el análisis predictivo para maximizar los tiempos de transporte eficientes.

Zhang & Goh (2021), en su estudio titulado “A review of machine learning in supply chain management: Applications and challenges”, publicado en la revista *Computers & Industrial Engineering*, se llevó a cabo una revisión sistemática sobre la aplicación de métodos de aprendizaje automático en la gestión de cadenas de suministro, con el objetivo de identificar las áreas donde estas tecnologías han generado mayor impacto, incluyendo minería y transporte. Los autores recopilaron y analizaron más de 120 artículos científicos recientes que describen aplicaciones de algoritmos como redes neuronales, máquinas de soporte vectorial y árboles de decisión, en procesos clave como pronóstico de demanda, optimización logística y mejora de eficiencia operativa. Se enfatizó la aplicación de modelos predictivos en la industria

minera para monitorear el rendimiento de la flota de transporte, optimizar rutas y minimizar el tiempo de inactividad, lo que resultó en aumentos de hasta un 20% en la producción. La resiliencia al cambio organizacional, la calidad de los registros operativos y la integración de datos en tiempo real fueron los principales problemas encontrados. Esta investigación concluyó que el aprendizaje automático, al combinarse con enfoques Lean Six Sigma, puede revolucionar las operaciones logísticas en industrias como la minería a cielo abierto, al reducir costos y tiempos de operación.

Moradi & Osanloo (2020), en el estudio titulado “A simulation-based optimization approach for truck-shovel allocation problem in open-pit mines”, publicado en la revista *Journal of Mining Science*, se desarrolló una investigación con el objetivo de mejorar la asignación de camiones y palas en operaciones de minería a tajo abierto mediante un enfoque de optimización basado en simulación. Para ello, se modelaron diferentes escenarios operativos utilizando simulaciones estocásticas, considerando variables como los tiempos de carga, acarreo, descarga y espera de los camiones, con el fin de maximizar la utilización de los equipos y minimizar los tiempos improductivos. Los hallazgos del estudio mostraron que una asignación dinámica y eficaz de la flota puede reducir los cuellos de botella provocados por una asignación deficiente de recursos y aumentar la productividad del sistema de transporte en un 15 %. Los autores concluyeron que los algoritmos de simulación y optimización funcionan bien en conjunto para facilitar la toma de decisiones en tiempo real y el desarrollo continuo de los procesos mineros. El objetivo principal de este estudio es reducir la variabilidad y aumentar la eficiencia en los tiempos de transporte efectivos, lo que valida la importancia de aplicar enfoques sistemáticos como Lean Six Sigma.

2.1.2. Antecedentes Nacionales

Anchiraico A. & Rojas K. (2020), en el estudio titulado “Optimización del sistema de acarreo y transporte en labores de preparación de las zonas de profundización mediante la metodología Six Sigma operada por la E.C.M. Zicsa en la unidad Minera Inmaculada”, realizado en la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, se planteó como objetivo mejorar el sistema de acarreo y transporte en labores subterráneas utilizando la metodología Six Sigma. El estudio se enfocó en analizar los tiempos improductivos durante el ciclo de acarreo, identificando causas asociadas a la inadecuada programación de flota, tiempos de espera prolongados y deficiencias en la logística operativa. Para crear una estrategia de mejora continua, se recopilaron datos en tiempo real y se realizó un análisis estadístico con la herramienta DMAIC. Esto resultó en una reducción del 14 % en los tiempos totales de transporte, un aumento del 9 % en la disponibilidad operativa de los equipos y una mejora en la eficiencia del transporte interno. Se determinó que el ciclo minero se benefició económica y operativamente del uso sistemático de Six Sigma. Estos antecedentes son esenciales para la presente investigación, ya que demuestran cómo Lean Six Sigma puede utilizarse para optimizar el transporte en las operaciones mineras peruanas.

Valenzuela J. (2022), en su estudio titulado “Gestión del ciclo de acarreo para optimizar la productividad operacional del tajo Ferrobamba del proyecto minero Las Bambas, 2016”, realizado en la Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac, se desarrolló una investigación con el objetivo de analizar el ciclo de acarreo y su impacto en la productividad del tajo Ferrobamba. La metodología consistió en el monitoreo y análisis de los tiempos efectivos e improductivos de los equipos de acarreo, con especial énfasis en los tiempos de carga, viaje, descarga y espera. Según los hallazgos, los retrasos imprevistos representaron el 28% del tiempo total, lo que resultó en una reducción significativa de la eficiencia operativa.

Se sugirió la reestructuración del sistema de despacho y control de la flota como solución correctiva, lo que resultó en un aumento del 18% en la productividad general del transporte. Con base en un análisis metódico de sus elementos, el estudio concluyó que una gestión eficaz del ciclo de transporte permite la optimización de recursos y la reducción de costos operativos. Dado que ofrece respaldo empírico a la importancia de la optimización del tiempo de transporte —un objetivo clave de la implementación de Lean Six Sigma en las operaciones mineras del sur del Perú—, este precedente local es pertinente para la presente investigación.

Agüero F. & Ramírez G. (2022), en “Aplicación de la metodología Lean Six Sigma para reducir el tiempo improductivo en las etapas de acarreo y transporte en mina Canta”, el presente estudio se llevó a cabo con el objetivo de reducir los tiempos improductivos asociados al proceso de acarreo y transporte en una operación minera subterránea. Para ello, se aplicó la metodología Lean Six Sigma bajo el enfoque DMAIC (Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar), identificando los principales cuellos de botella en el ciclo de acarreo. Se observó que el mayor tiempo de inactividad se concentraba en las fases de espera para la disponibilidad de los equipos y los tiempos de inactividad debido a la falta de coordinación en el despacho, según lo determinado por el análisis de datos operativos y la aplicación de tecnologías como el mapeo de procesos y el análisis de causa raíz. Las actividades de mejora resultaron en un aumento notable de la disponibilidad de los equipos y una disminución del 15 % en el tiempo total del ciclo de transporte. Se determinó que el uso de Lean Six Sigma reduce los gastos operativos y, al mismo tiempo, mejora la eficiencia de los procesos. Este historial es crucial para el presente estudio, ya que demuestra la eficacia de este enfoque en entornos mineros y su posible aplicación en operaciones a cielo abierto en el sur del Perú.

Espinoza F. & Carreño J. (2022), en “Control operativo de los metros de avance por disparo mediante la metodología Lean Six Sigma”, el presente estudio se llevó a cabo con el

objetivo de optimizar el proceso de avance por disparo en una operación minera subterránea mediante la aplicación de la metodología Lean Six Sigma. Se empleó el enfoque DMAIC (Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar), lo cual permitió identificar y analizar las principales causas de variabilidad en el rendimiento operativo, tales como el desacople entre los ciclos de perforación y voladura, y la deficiente planificación de recursos. A raíz de esta revisión, se implementaron mejoras para estandarizar los procesos y reducir el tiempo perdido en tareas cruciales. Esto mejoró la producción y disminuyó los gastos relacionados al aumentar la eficacia de la regulación de los medidores de progreso en cada disparo. Este estudio demuestra la eficacia de la metodología Lean Six Sigma en la industria minera y es pertinente para la presente investigación, ya que confirma que puede utilizarse para optimizar procedimientos operativos como el transporte en la minería a cielo abierto.

Bazo J. & Loayza G. (2021), en “Aplicación de herramientas del Lean Six Sigma para generar valor en proyectos de Pequeña Minería. Proyecto Trinidad”, el presente estudio se llevó a cabo con el objetivo de implementar herramientas de la metodología Lean Six Sigma con el fin de generar valor en los procesos operativos de una operación minera de pequeña escala. Para ello, se aplicó el enfoque DMAIC, lo cual permitió identificar actividades con bajo valor agregado y cuellos de botella en las etapas de exploración y explotación. El tiempo de inactividad se redujo considerablemente, se mejoró el flujo operativo y se maximizó el uso de recursos mediante un análisis exhaustivo de procesos. Los resultados mostraron menores gastos operativos y un aumento de la productividad. Estos resultados llevaron a la conclusión de que la técnica Lean Six Sigma es una herramienta útil para la toma de decisiones estratégicas y la mejora continua en proyectos mineros. Estos antecedentes son pertinentes para la presente investigación, ya que ilustran cómo se puede utilizar Lean Six Sigma y cómo contribuye a la optimización de procesos en la industria minera, especialmente en actividades que requieren una gestión eficaz del tiempo, como el transporte en la minería a cielo abierto.

2.2. Bases Teóricas

Según Agüero Marcelo y Ramírez Gonzales (2022), las fases de acarreo y transporte de la mina Canta experimentaron una reducción considerable del tiempo de inactividad gracias al uso de la metodología Lean Six Sigma, lo que incrementó la eficiencia operativa. De igual manera, Anchiraico Giraldo y Rojas Oré (2020) observaron que los trabajos preparatorios de la unidad minera Inmaculada para las zonas más profundas mejoraron considerablemente gracias a la optimización del sistema de acarreo y transporte con la metodología Six Sigma.

Sin embargo, en una mina a cielo abierto en el sur de Perú, Arzapalo Gonzales (2022) sostuvo que el uso de modelos matemáticos en las actividades de las unidades de carga y transporte permitió identificar y corregir ineficiencias, maximizando así los tiempos de transporte eficientes. De igual manera, Baek y Choi (2020) crearon una red neuronal profunda para pronosticar la producción de mineral en minas a cielo abierto mediante sistemas de transporte, lo que permitió una planificación más precisa y eficaz.

Además, Bazo Gonzales y Loayza Chávez (2021) demostraron que, al optimizar los procedimientos y reducir los desperdicios, el Proyecto Trinidad y otras pequeñas empresas mineras se beneficiaron del uso de tecnologías Lean Six Sigma. Chilón Infante (2021) también destacó cómo los proyectos mineros podrían aumentar la producción optimizando el ciclo de carga y transporte para evitar tiempos de inactividad en el transporte de materiales.

Utilizando técnicas basadas en big data y aprendizaje automático, Choi et al. (2022) investigaron la optimización del rendimiento de los sistemas de camiones de acarreo para la producción de mineral en minas a cielo abierto, lo que resultó en un aumento notable de la eficiencia operativa. En consecuencia, Choque Pacheco (2020) mejoró el control operativo en la mina Constancia mediante la integración del software de minería CONTROL SENSE en el sistema de carga y acarreo, lo que generó resultados favorables en la gestión de las operaciones.

Mediante el uso de la técnica Lean Six Sigma para regular operativamente los metros de avance en cada disparo, Espinoza Pico y Carreño Rosales (2022) lograron aumentar la eficiencia del proceso y reducir la variabilidad. Según Hia, Singgih y Gurning (2025), el rendimiento general del vehículo de transporte minero (MTOVE) mejoró gracias al uso de Lean Six Sigma, lo que incrementó la productividad y redujo el tiempo de inactividad.

Al analizar las aplicaciones de Lean Six Sigma en el sector minero, Kumar y Kumar (2021) concluyeron que la implementación de la metodología aumenta significativamente la eficiencia y la calidad de los procesos. Para mejorar la planificación y el uso de recursos, Lee y Park (2022) utilizaron simulación y aprendizaje automático para optimizar la asignación de camiones en minas a cielo abierto.

Para aumentar la eficacia del sistema de transporte, Moradi Afrapoli y Osanloo (2020) propusieron un método de optimización basado en simulación para el problema de asignación de camiones y palas en minas a cielo abierto. Para maximizar la eficiencia y reducir los gastos operativos en la mina Parcoy, Pauca Mantilla (2019) analizó la selección y el reemplazo de equipos de transporte, enfatizando la importancia de una gestión adecuada de los mismos.

Para alcanzar los objetivos de producción en minería, Pineda Estrada (2023) aplicó la técnica Lean Six Sigma, coordinando con éxito los objetivos operativos con los resultados obtenidos. Singh y Jain (2024) examinaron las ventajas y desventajas de aplicar Lean Six Sigma a las operaciones mineras y concluyeron que, a pesar de los desafíos, las ventajas superan con creces las desventajas.

Valenzuela Barreto (2022) demostró mejoras en la eficiencia del transporte de materiales mediante la gestión del ciclo de transporte para maximizar la productividad operativa del tajo Ferrobamba del proyecto minero Las Bambas. Por último, Xu et al. (2024)

combinaron la planificación de rutas de transporte con la optimización del cronograma de producción en minas a cielo abierto, lo que resultó en una operación más coordinada y eficaz.

2.2.1. *Lean Manufacturing y su aplicación en minería*

Lean Manufacturing surge en Japón como un enfoque sistemático para la eliminación de desperdicios (*muda*) y la maximización del valor para el cliente. Según Womack y Jones (2003), sus principios fundamentales incluyen la identificación del valor, el mapeo de la cadena de valor, la creación de flujo, la producción ajustada a la demanda y la búsqueda de la perfección.

En minería a tajo abierto, la filosofía *lean* ha demostrado ser útil para mejorar la eficiencia de procesos de acarreo, donde las esperas, demoras y tiempos muertos son frecuentes. Mular et al. (2021) sostienen que hasta un 40 % de los retrasos en operaciones de transporte se deben a actividades sin valor agregado, como el tiempo de espera en zonas de descarga o la falta de coordinación en el despacho. La aplicación de herramientas como el *Value Stream Mapping* y el *Just-in-Time* permite visualizar el flujo completo del proceso de acarreo, identificando actividades críticas y desperdicios operativos.

Un ejemplo de implementación de Lean en minería lo presenta Singh y Jain (2024), quienes documentaron cómo la aplicación de principios *lean* redujo los tiempos de inactividad en la operación de camiones mineros al mejorar la coordinación entre operadores y supervisores. De este modo, se confirma que los principios del Lean Manufacturing son transferibles y efectivos en la industria extractiva, generando eficiencia operativa y sostenibilidad en el tiempo.

2.2.2. Six Sigma en la gestión de procesos mineros

Six Sigma fue introducido por Motorola en los años ochenta y popularizado por General Electric en los noventa como una metodología enfocada en la reducción de la variabilidad y en la mejora continua de los procesos productivos. George et al. (2005) sostienen que su núcleo metodológico, el ciclo DMAIC (Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar), resulta especialmente valioso en contextos de alta complejidad, donde las variaciones en el desempeño impactan significativamente en los resultados económicos.

En minería a tajo abierto, el acarreo de materiales es un proceso altamente susceptible a la variabilidad: factores como la congestión de rutas, las distancias variables y la disponibilidad de flota influyen directamente en los tiempos de ciclo. Zhang y Goh (2021) destacan que Six Sigma aporta herramientas estadísticas como el análisis de capacidad del proceso, los diagramas de Pareto y el control estadístico de procesos, que permiten identificar las causas raíz de ineficiencia en las operaciones logísticas.

Estudios recientes confirman la aplicabilidad de Six Sigma en minería. Anchiraco y Rojas (2020) reportaron que la implementación del enfoque DMAIC en la unidad minera Inmaculada redujo un 14 % los tiempos de transporte y aumentó un 9 % la disponibilidad de equipos. De manera similar, Espinoza y Carreño (2022) evidenciaron mejoras en la estandarización de procesos operativos al aplicar Six Sigma en labores de perforación y voladura, lo que demuestra su potencial para generar consistencia en los resultados.

En síntesis, Six Sigma constituye un marco metodológico sólido para la minería moderna, al permitir una gestión más precisa del ciclo de acarreo y garantizar que los procesos se mantengan dentro de límites de variabilidad aceptables.

2.2.3. Sinergia Lean Six Sigma (LSS) en minería a cielo abierto

La integración de Lean y Six Sigma, conocida como Lean Six Sigma (LSS), constituye una evolución natural en la gestión de operaciones, al combinar la eliminación de desperdicios característica de Lean con el control estadístico de la variabilidad propio de Six Sigma. Salah et al. (2010) destacan que la sinergia de ambas metodologías permite abordar simultáneamente problemas de eficiencia y de calidad, lo que resulta fundamental en sectores intensivos en capital como la minería.

En operaciones a tajo abierto, el acarreo de material es una de las actividades más costosas y críticas. La aplicación de LSS en este contexto facilita la identificación de cuellos de botella, la reducción de tiempos de espera y la mejora de la utilización de la flota de transporte. Hia et al. (2025) demostraron que, mediante un proyecto DMAIC orientado a la efectividad general de los vehículos de transporte, se logró un incremento del 17,8 % en la disponibilidad operativa de camiones mineros en una empresa internacional.

Asimismo, Moyo y Ncube (2020) reportaron que la implementación de LSS en operaciones sudafricanas a cielo abierto redujo los tiempos improductivos en un 25 % y aumentó la productividad global del sistema de acarreo. Estos hallazgos validan el potencial de LSS como estrategia integral para optimizar los procesos de transporte en minería, al generar beneficios tanto económicos como operativos.

En consecuencia, Lean Six Sigma se presenta como una metodología flexible y poderosa que no solo corrige ineficiencias, sino que también establece una cultura organizacional orientada a la mejora continua, elemento clave para enfrentar los retos actuales de la minería.

2.2.4. El proceso de acarreo en minería a tajo abierto

El acarreo es una de las operaciones unitarias más relevantes y costosas en la minería a cielo abierto, ya que puede representar hasta el 50 % de los costos operativos totales de una operación (Mular et al., 2021). Este proceso involucra varias fases principales: carguío, transporte, descarga y retorno, cada una susceptible a diferentes fuentes de ineficiencia.

En la fase de carguío, los problemas más comunes incluyen la baja productividad de la pala o cargador y la descoordinación en el despacho de camiones. En el transporte, factores como las distancias variables, pendientes pronunciadas, condiciones climáticas adversas o congestión de rutas internas afectan la velocidad promedio y el consumo de combustible. Durante la descarga, los cuellos de botella se generan principalmente por la falta de disponibilidad en chancadoras o botaderos. Finalmente, en el retorno, la eficiencia se ve condicionada por la sincronización con las próximas operaciones de carguío.

Valenzuela (2022) identificó que, en el tajo Ferrobamba del proyecto Las Bambas, los retrasos imprevistos durante el ciclo de acarreo representaban aproximadamente un 28 % del tiempo total, lo que redujo significativamente la eficiencia operativa. Por su parte, Arzapalo (2022) demostró que el uso de modelos matemáticos en la programación del acarreo permitió mejorar la utilización de camiones y reducir el tiempo de ciclo promedio.

El análisis de estos factores evidencia que el acarreo no solo depende del desempeño de los equipos, sino también de la planificación, la gestión de rutas y la capacidad de supervisión. Por ello, su optimización mediante metodologías como Lean Six Sigma resulta crítica para la competitividad de las operaciones mineras a tajo abierto.

2.2.5. Indicadores clave de rendimiento (KPI) en transporte minero

El desempeño del acarreo en minería a cielo abierto se mide a través de indicadores clave de rendimiento (KPI), los cuales permiten evaluar la eficiencia, disponibilidad y productividad de la flota de transporte. Según Zhang y Goh (2021), los principales KPI en este tipo de operaciones incluyen el tiempo de ciclo promedio, la utilización de flota, la disponibilidad mecánica, el consumo de combustible por tonelada transportada y el costo unitario por tonelada.

El tiempo de ciclo es uno de los indicadores más críticos, ya que resume la duración de las fases de carguío, transporte, descarga y retorno. Reducciones en este tiempo, incluso mínimas, pueden generar mejoras significativas en la producción global. De manera complementaria, la disponibilidad mecánica refleja la proporción de tiempo que los camiones están operativos frente al tiempo total programado, mientras que la utilización mide el grado de uso efectivo de los equipos disponibles.

Lean Six Sigma ofrece herramientas estadísticas para gestionar estos KPI de manera más rigurosa. Por ejemplo, el análisis de capacidad del proceso (C_p y C_{pk}) permite determinar si los tiempos de ciclo cumplen consistentemente con los estándares de producción establecidos. Asimismo, los diagramas de Pareto ayudan a identificar las principales causas de pérdidas operativas, y el control estadístico de procesos facilita el seguimiento en tiempo real de la variabilidad (Kumar & Kumar, 2021).

Estudios recientes respaldan el valor de los KPI en la optimización de transporte minero. Choi et al. (2022) demostraron que la integración de big data y machine learning en la medición de indicadores redujo en un 12 % los tiempos de inactividad. De manera similar, Hia et al. (2025) confirmaron que la aplicación de LSS incrementó en un 17,8 % la efectividad global de los camiones al mejorar la disponibilidad y el rendimiento.

En conjunto, los KPI no solo constituyen métricas de control, sino que también son herramientas estratégicas para diseñar planes de mejora continua bajo el enfoque Lean Six Sigma.

2.2.6. Tecnologías emergentes en optimización de acarreo

La digitalización de la minería ha impulsado la incorporación de tecnologías emergentes que permiten optimizar el proceso de acarreo, mejorando tanto la eficiencia operativa como la sostenibilidad. Entre estas destacan el big data, la inteligencia artificial, el aprendizaje automático y los camiones autónomos.

Choi et al. (2022) demostraron que los modelos de *machine learning* aplicados al análisis de datos de flotas mineras pueden reducir los tiempos de inactividad hasta en un 12 %, al optimizar dinámicamente la asignación de rutas y la velocidad de los camiones. De manera similar, Lee y Park (2022) señalaron que el uso combinado de simulación y algoritmos predictivos permite anticipar demoras y reconfigurar en tiempo real el despacho de la flota, mejorando la utilización de los equipos y reduciendo la variabilidad del ciclo de acarreo.

Por otro lado, la automatización de camiones mineros constituye una de las innovaciones más disruptivas en la minería de tajo abierto. Empresas como Rio Tinto y BHP han implementado flotas autónomas en sus operaciones, logrando reducir los costos unitarios de transporte y mejorar la seguridad operacional (Zhang & Goh, 2021). Estas tecnologías, al integrarse con metodologías como Lean Six Sigma, ofrecen la posibilidad de un control más preciso de los indicadores clave de rendimiento y de la variabilidad en los procesos.

Asimismo, Xu et al. (2024) plantearon que la integración de la planificación de rutas con la programación de producción, a través de modelos matemáticos y sistemas de optimización combinatoria, permitió reducir los tiempos de ciclo en un 18 %. Esto demuestra

que el futuro de la optimización del acarreo pasa por la sinergia entre metodologías de mejora continua y herramientas digitales avanzadas, generando un enfoque híbrido de gran impacto en la minería moderna.

2.2.7. *Gestión de la variabilidad en procesos mineros*

La variabilidad es uno de los principales desafíos en la industria minera, pues afecta tanto la estabilidad operativa como los costos unitarios y, en consecuencia, la rentabilidad de las operaciones. Según Montgomery (2020), la variabilidad en procesos productivos debe gestionarse mediante un control estadístico riguroso, que permita distinguir entre causas comunes (variaciones inherentes al sistema) y causas especiales (variaciones atribuibles a factores externos o problemas puntuales). En minería a tajo abierto, esta distinción es clave, dado que los procesos de acarreo se ven afectados por múltiples factores como condiciones climáticas, topografía, congestión en rutas, habilidades de los operadores y mantenimiento de equipos.

La fluctuación en los tiempos de ciclo de acarreo es uno de los indicadores más sensibles a la variabilidad. Por ejemplo, un aumento inesperado en los tiempos de espera en la zona de descarga puede provocar retrasos en toda la cadena operativa, generando costos adicionales por combustible, desgaste de neumáticos y horas improductivas de los equipos. De igual manera, el consumo de combustible, que constituye hasta el 30 % de los costos de acarreo (Mular et al., 2021), varía en función de las pendientes, la carga transportada y las prácticas de conducción de los operadores. Esta dispersión en los resultados impacta directamente en la productividad por turno y en los costos unitarios por tonelada transportada.

La metodología Six Sigma se ha consolidado como un marco adecuado para gestionar esta problemática, al priorizar el análisis de datos y la reducción de la dispersión respecto a los valores objetivo. El ciclo DMAIC permite analizar estadísticamente las fuentes de variabilidad,

identificar los puntos críticos del proceso y establecer mejoras basadas en datos objetivos. Kumar y Kumar (2021) señalan que la aplicación de Six Sigma en minería ha permitido reducir la desviación estándar en tiempos de acarreo, logrando procesos más estables y predecibles.

Un ejemplo práctico de esta gestión lo reporta Anchiraico y Rojas (2020), quienes aplicaron Six Sigma en una operación minera peruana, reduciendo en un 14 % la variabilidad en los tiempos de transporte y mejorando la disponibilidad operativa de la flota. Asimismo, Espinoza y Carreño (2022) resaltan que la aplicación de herramientas como el diagrama de Pareto y el análisis de causa raíz permitió identificar que la mayor fuente de variabilidad provenía de fallas en la coordinación entre el despacho y los operadores, lo que fue corregido con estandarización de procedimientos.

En síntesis, gestionar la variabilidad en los procesos mineros no solo permite alcanzar una mayor estabilidad en la operación, sino también disminuir costos y riesgos. La aplicación de Six Sigma y su integración con enfoques Lean se perfilan como estrategias indispensables para enfrentar esta problemática, ya que no solo reducen la dispersión en los indicadores clave de rendimiento, sino que además promueven una cultura organizacional basada en la toma de decisiones sustentada en evidencia estadística.

2.2.8. *Cultura organizacional y mejora continua en minería*

La implementación de metodologías como Lean Six Sigma en minería no se limita al uso de herramientas estadísticas o al rediseño de procesos; también requiere una transformación cultural profunda dentro de la organización. La cultura organizacional define la forma en que los trabajadores perciben, interpretan y responden a los cambios operativos, por lo que constituye un factor decisivo para el éxito o fracaso de iniciativas de mejora continua (Kotter, 2012).

En el sector minero, caracterizado por estructuras jerárquicas rígidas y una fuerte orientación hacia la producción, los intentos de introducir metodologías de optimización suelen enfrentar resistencia al cambio. Singh y Jain (2024) señalan que la falta de compromiso del personal operativo y de los mandos intermedios constituye uno de los principales obstáculos para la aplicación sostenible de Lean Six Sigma en minería. Esta resistencia suele deberse al temor a perder autonomía, al desconocimiento de las nuevas metodologías y a la percepción de que las iniciativas de mejora solo incrementan la carga laboral sin beneficios inmediatos.

La literatura especializada subraya que el desarrollo de una cultura de mejora continua implica alinear tres dimensiones clave:

1. Liderazgo comprometido: los directivos deben actuar como promotores del cambio, estableciendo objetivos claros y comunicando los beneficios de la metodología.
2. Participación activa del personal: los trabajadores de primera línea poseen un conocimiento práctico del proceso de acarreo, por lo que su inclusión en la identificación de problemas y soluciones es esencial para garantizar resultados sostenibles.
3. Capacitación y empoderamiento: el entrenamiento en herramientas Lean Six Sigma, como el mapeo de procesos, el análisis de variabilidad o el control estadístico, fortalece la confianza del personal y promueve la autonomía en la resolución de problemas (George et al., 2005).

Estudios aplicados en minería peruana evidencian la importancia de este enfoque cultural. Agüero y Ramírez (2022) reportaron que, en una operación minera subterránea, la resistencia inicial de los trabajadores disminuyó progresivamente a medida que se evidenciaban

los resultados de la aplicación de LSS en la reducción de tiempos improductivos. De forma similar, Bazo y Loayza (2021) concluyeron que la participación activa de los operarios en proyectos de mejora en pequeña minería no solo optimizó los indicadores de productividad, sino que también fortaleció el sentido de pertenencia y motivación del equipo.

En consecuencia, la mejora continua en minería debe entenderse como un proceso integral que combina herramientas técnicas con gestión del cambio organizacional. El éxito de Lean Six Sigma depende en gran medida de la capacidad de la empresa para generar una cultura orientada a la eficiencia, la calidad y la seguridad, donde cada trabajador asuma un rol activo en la identificación de desperdicios y en la implementación de soluciones basadas en datos.

2.2.9. Impacto económico de la optimización del acarreo

El proceso de acarreo constituye una de las actividades más costosas dentro de la minería a cielo abierto, representando entre el 40 % y 50 % de los costos operativos totales de una mina (Mular et al., 2021). Esto significa que pequeñas mejoras en la eficiencia del ciclo de transporte pueden generar ahorros millonarios en operaciones de gran escala. Por ejemplo, una reducción del 10 % en el tiempo de ciclo promedio puede incrementar significativamente la producción sin necesidad de aumentar la flota o realizar nuevas inversiones en equipos.

Desde la perspectiva económica, la optimización del acarreo tiene un impacto directo en tres dimensiones principales:

- Costos operativos directos: el consumo de combustible es uno de los componentes más significativos, dado que los camiones mineros pueden consumir cientos de litros por hora. Reducir tiempos de inactividad y trayectos innecesarios disminuye directamente los gastos energéticos.

- Costos de mantenimiento y reemplazo de equipos: los camiones y neumáticos de acarreo experimentan un desgaste considerable por las distancias recorridas y las condiciones del terreno. Al reducir la variabilidad en los tiempos de ciclo y aumentar la eficiencia, se prolonga la vida útil de los equipos y se minimizan los costos de mantenimiento correctivo.
- Costos por oportunidad y productividad perdida: cada retraso en el acarreo impacta en la cadena de valor, afectando el cumplimiento del plan de producción y generando pérdidas por no alcanzar las metas establecidas.

Diversos estudios han cuantificado este impacto. Hia et al. (2025) reportaron que la aplicación de Lean Six Sigma en una empresa minera internacional generó un ahorro superior a USD 1,5 millones anuales gracias a la mejora en la disponibilidad de camiones y la reducción de tiempos improductivos. De forma similar, Valenzuela (2022) evidenció que una gestión más eficiente del ciclo de transporte en el tajo Ferrobamba permitió incrementar la productividad en un 18 %, reduciendo simultáneamente el costo unitario por tonelada transportada.

En el contexto peruano, donde los márgenes de rentabilidad están estrechamente vinculados a los precios internacionales de los metales, optimizar el acarreo se convierte en una estrategia económica clave para mantener la competitividad. Kumar y Kumar (2021) señalan que la aplicación de Lean Six Sigma no solo reduce costos, sino que además aumenta la resiliencia de las operaciones frente a la volatilidad del mercado.

En conclusión, la optimización del acarreo mediante Lean Six Sigma no debe considerarse únicamente como una iniciativa de mejora operativa.

2.3. Hipótesis de la Investigación

2.3.1. *Hipótesis General*

La aplicación de la metodología Lean Six Sigma optimiza significativamente el proceso de acarreo en operaciones de minería a tajo abierto en el sur del Perú.

2.3.2. *Hipótesis Específicas*

1. Antes de la aplicación de Lean Six Sigma, el proceso de acarreo presenta ineficiencias operativas que afectan su productividad.
2. La metodología Lean Six Sigma puede aplicarse de manera estructurada mediante el ciclo DMAIC, permitiendo identificar y corregir causas raíz en el proceso de acarreo.
3. La implementación del enfoque Lean Six Sigma genera una mejora favorable en la relación costo-beneficio del proceso de acarreo.
4. Las mejoras obtenidas en el proceso de acarreo tras aplicar Lean Six Sigma son estadísticamente significativas y sostenibles en el tiempo.

2.4. Variables

2.4.1. *Variables Independientes*

Aplicación del Lean Six Sigma en acarreo de mineral en mina a tajo abierto

2.4.2. *Variables Dependientes*

Desempeño del proceso de acarreo

Tabla 1*Matriz de Operacionalización de Variables*

Variable	Definición Conceptual	Definición Operacional	Indicadores	Instrumento	Unidad de Medida
Aplicación de la metodología Lean Six Sigma	Es una estrategia de mejora continua que combina los principios del Lean Manufacturing y Six Sigma, orientada a la reducción de desperdicios, mejora del flujo operativo y disminución de la variabilidad en los procesos.	Implementación estructurada del ciclo DMAIC (Definir, Medir, Analizar, Mejorar, Controlar) en el proceso de acarreo, mediante herramientas como SIPOC, análisis de causa raíz, diagrama de Pareto, análisis de capacidad, mapeo de procesos, entre otros.	- Etapas del ciclo DMAIC completadas - Herramientas Lean Six Sigma aplicadas - Propuesta de mejora implementada - Registro de mejoras documentadas	Guía de observación Ficha técnica de implementación Bitácora de herramientas	Nº de herramientas utilizadas Nº de fases completadas Tipo de mejora % de avance en implementación

Optimización del proceso de acarreo	Es el resultado de mejorar la eficiencia del ciclo de transporte, reduciendo los tiempos improductivos y aumentando el aprovechamiento operativo del sistema de acarreo en minería.	Medición del desempeño del acarreo antes y después de aplicar Lean Six Sigma, mediante la comparación de indicadores de tiempos efectivos y pérdida operacional registrados por cronómetro y sistema dispatch.	- Tiempo promedio del ciclo de acarreo - Tiempo de espera en carguío - Tiempo de espera en descarga - % de reducción del tiempo improductivo - Índice de utilización de camiones	Cronómetro digital Sistema dispatch Bitácoras operacionales Plantilla de registro de tiempos	Minutos, segundos % de mejora Desviación estándar Índice de utilización (%)
--	---	--	--	---	--

III. MARCO METODOLÓGICO

3.1 Alcances y Limitaciones

El tipo de investigación es aplicada, ya que busca resolver un problema operativo real mediante la implementación de una metodología concreta (Lean Six Sigma). Su enfoque es cuantitativo, al basarse en datos numéricos y análisis estadístico. Es de nivel explicativo, porque busca identificar relaciones causa-efecto entre variables del proceso de acarreo.

Para generar respuestas tangibles y cuantificables en el contexto de las operaciones mineras, este estudio propone una investigación aplicada con una metodología cuantitativa y un diseño pre experimental. Este marco garantizó la viabilidad, la consistencia metodológica y la relevancia técnica del estudio al definir explícitamente su alcance y limitaciones.

La disponibilidad de fuentes de datos primarias y secundarias permitió determinar la viabilidad del estudio. Los datos operativos reales de los ciclos de transporte y carga, obtenidos directamente de los sistemas de control de producción y monitoreo de flota de una unidad minera en el sur de Perú, servirán como fuentes principales. Estos datos, cruciales para el uso de técnicas Lean Six Sigma como el mapeo de procesos, el análisis de causa raíz (Ishikawa) y el diagrama de Pareto, abarcan los tiempos de carga, transporte, descarga, espera, retorno y disponibilidad de equipos. Se fortalecerá la base teórica y se validarán los indicadores de desempeño más relevantes para los procesos de transporte en la minería a cielo abierto mediante un estudio de datos secundarios extraídos de informes técnicos, literatura especializada e investigaciones previas.

El sitio de estudio es una mina a cielo abierto en el sur de Perú que utiliza camiones de transporte de alta capacidad y es conocida por su producción continua. Para comparar la teoría con la práctica, este entorno operativo proporciona circunstancias realistas para observar y

estudiar las operaciones de transporte de materiales desde el frente de la mina hasta las zonas de descarga.

Se prevé que la investigación finalice en cuatro meses, lo que incluye las fases de diagnóstico, recopilación y análisis de datos, aplicación de la metodología Lean Six Sigma y elaboración del informe final. Para garantizar un progreso continuo y a largo plazo del estudio, se ha asignado más tiempo para gestionar cualquier imprevisto logístico, como retrasos en el acceso a la información o cambios en el programa de campo.

En cuanto a la financiación, se sabe que esta investigación se realizará como un estudio de viabilidad, ya que no contempla la ejecución de modificaciones físicas urgentes ni la compra de equipos. Esto sugiere que los resultados previstos se centrarán en la búsqueda de oportunidades de mejora a nivel de proceso mediante simulaciones, modelos matemáticos y análisis estadístico, lo que culminará en un conjunto final de recomendaciones técnicas que podrán evaluarse para su implementación. Al permitir la optimización de los recursos actuales sin requerir inversiones significativas, la técnica Lean Six Sigma se convierte en una herramienta estratégica de bajo coste, pero de gran impacto.

En consecuencia, el alcance del estudio se limita al análisis de la duración real del transporte; no aborda otras etapas de la cadena de producción minera, como la perforación, la voladura o el chancado. Además, se reconoce que la dependencia de la operación minera de obtener datos precisos y fiables constituye una limitación, lo que requiere respaldo institucional para la labor del investigador.

3.2. Aporte

Al utilizar la técnica Lean Six Sigma como herramienta de mejora continua para optimizar los tiempos de transporte eficientes en operaciones mineras a cielo abierto en el sur

del Perú, este estudio supone un aporte sustancial a la ingeniería minera. Sin requerir inversiones significativas en infraestructura ni equipos, esta investigación ofrece un enfoque metódico y basado en datos para localizar, evaluar y reducir el tiempo de inactividad en el ciclo de transporte de materiales. Además, genera recomendaciones técnicas que ayudan a mejorar la eficiencia operativa.

En la práctica, la investigación permite estandarizar procedimientos que influyen directamente en la productividad y la reducción de costos, así como generar indicadores clave de rendimiento (KPI) que facilitan la toma de decisiones en tiempo real. En teoría, facilita la comprensión de la aplicación de Lean Six Sigma en la industria minera, lo cual supone un avance metodológico frente a las técnicas convencionales de gestión de operaciones.

3.3. Tipo y Nivel de Investigación

El diseño de la investigación es pre experimental, específicamente de un solo grupo con medición de pre-test y post-test. Este diseño se justifica porque el estudio busca evaluar el impacto de una intervención (la metodología Lean Six Sigma) sobre una realidad operativa preexistente.

El proceso consistió en:

- **Medición inicial (Pre-test):** Recolección de datos de los tiempos de acarreo antes de aplicar las mejoras.
- **Intervención:** Aplicación del ciclo DMAIC y las acciones correctivas en la flota de 10 camiones.
- **Medición final (Post-test):** Recolección de nuevos tiempos de acarreo para verificar la optimización mediante pruebas estadísticas de comparación.

3.4.Población y Muestra

3.4.1. Población

La población de la investigación está conformada por el conjunto de operaciones mineras a tajo abierto activas en el sur del Perú que cuentan con sistemas de acarreo de alta capacidad, utilizan camiones mineros de gran tonelaje y poseen sistemas de monitoreo digital de flota (como Dispatch, Modular u otros). Estas unidades mineras realizan actividades continuas de extracción y transporte de material desde el frente hasta zonas de descarga, y representan el universo al cual se desea aplicar la metodología Lean Six Sigma para optimizar el proceso de acarreo.

3.4.2. Muestra

La muestra está representada por una operación minera a tajo abierto del sur del Perú dedicada a la producción de cobre, que cuenta con una flota de más de 30 camiones mineros de alto tonelaje (CAT 793 y similares). Se seleccionó de forma no probabilística por conveniencia, ya que permite el acceso a datos de ciclo de acarreo monitoreados digitalmente mediante sistema Dispatch y control de flota. Este muestreo por conveniencia permitió garantizar la trazabilidad de los datos necesaria para el diseño pre-test y post-test, asegurando que las mediciones se realizaran sobre la misma flota operativa en periodos de tiempo comparables.

3.5.Métodos, Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

Para el desarrollo del estudio titulado "Aplicación de la metodología Lean Six Sigma para la optimización de los tiempos efectivos de acarreo en operaciones de minería a tajo abierto en el sur del Perú", se adoptaron métodos, técnicas e instrumentos de recolección de datos que se adecuan al enfoque cuantitativo y aplicado de la investigación. Estos fueron

seleccionados estratégicamente para responder a los objetivos planteados y asegurar la validez de los resultados obtenidos.

3.5.1. Método general:

Se utilizó el método cuantitativo, ya que el estudio se basa en la medición objetiva de variables relacionadas con los tiempos de acarreo antes y después de aplicar la metodología Lean Six Sigma. Este enfoque permitió el uso de herramientas estadísticas para evaluar los resultados y establecer relaciones causales entre las variables estudiadas.

3.6. Técnicas e instrumentos:

3.6.1. Observación estructurada

Se aplicó para describir el estado actual de los tiempos efectivos de acarreo, recolectando datos operacionales en campo antes de la implementación del Lean Six Sigma. Se utilizó una hoja de observación diseñada para registrar tiempos de carga, acarreo, espera y descarga por turno y unidad.

3.2.1. Análisis documental

Permitió recopilar datos históricos de producción, reportes de acarreo, rendimientos de operadores y tiempos improductivos registrados por el sistema de gestión minera. El instrumento fue una ficha de recolección documental.

3.2.2. Encuesta estructurada

Se aplicó a operadores, supervisores y planificadores logísticos para identificar las causas principales de ineficiencias y validar las oportunidades de mejora propuestas por la metodología Lean Six Sigma. Se utilizó un cuestionario con preguntas cerradas en escala Likert.

3.2.3. Medición directa y toma de tiempos

Fue fundamental para calcular los tiempos efectivos reales de acarreo y evaluar el impacto de la metodología implementada. El instrumento fue un cronómetro digital y una plantilla de registro para tiempos de ciclo (tiempo de carguío, transporte, espera, descarga y retorno).

3.2.4. Análisis estadístico inferencial

Se aplicó para determinar la significancia de la mejora después de la aplicación del Lean Six Sigma. Se utilizó la prueba t de Student para muestras relacionadas, con el fin de comparar los tiempos antes y después de la intervención. El instrumento empleado fue el software estadístico Minitab.

3.2.5. Análisis de costo-beneficio

Esta técnica permitió evaluar el impacto económico de la mejora en el sistema de acarreo. Se diseñó una matriz de costos y beneficios basada en indicadores de productividad y ahorro por reducción de tiempos improductivos.

Variables críticas del proceso de acarreo:

- Tiempo de espera del camión por carguío (ineficiencia logística)
- Tiempo de traslado (ruta, velocidad, tráfico interno)
- Tiempo de descarga y retorno
- Tiempos muertos por disponibilidad de flota
- Congestión de rutas

- Comunicación deficiente entre despacho y operación
- Coordinación entre operadores de carguío y acarreo

Tabla 2
Métodos, técnicas e instrumentos de investigación

Técnica	Definición	Instrumento
Observación estructurada	Recolección sistemática de datos a través de la observación directa de eventos.	Hoja de observación de tiempos de acarreo
Análisis documental	Revisión de registros históricos y datos secundarios relevantes.	Ficha de recolección documental
Encuesta estructurada	Recopilación de opiniones mediante preguntas cerradas.	Cuestionario en escala Likert
Medición directa	Toma de tiempos reales mediante herramientas de cronometraje.	Cronómetro y plantilla de registro
Análisis estadístico	Aplicación de pruebas inferenciales para validar hipótesis.	Software estadístico (Minitab o SPSS)
Análisis de costo-beneficio	Comparación entre los costos invertidos y los beneficios obtenidos.	Matriz de costos y beneficios

IV. ESTUDIO ECONÓMICO

4.1. Introducción

En este capítulo se presentará el análisis económico que permitirá determinar la viabilidad financiera de la propuesta de mejora del proceso de acarreo. Se evaluarán los costos operativos actuales, los posibles ahorros derivados de la reducción de tiempos improductivos y la inversión requerida para implementar la metodología Lean Six Sigma. El objetivo será estimar la relación costo–beneficio, el retorno de inversión (ROI) y el periodo de recuperación (Payback).

4.2. Supuestos de cálculo

4.2.1. *Costo Operativo por Hora de Camión (COh)*

Valor adoptado: 90 USD/hora por camión.

Fundamentación:

Este valor se deriva de un estándar aceptado en la industria para camiones mineros de alto tonelaje. Este costo integral incluye:

- **Combustible y lubricantes:** Principal componente variable.
- **Mantenimiento preventivo y correctivo:** Incluye repuestos y mano de obra técnica.
- **Neumáticos:** Desgaste por operación en terrenos mineros.
- **Mano de obra operativa:** Salarios y beneficios del conductor.
- **Depreciación del equipo:** Amortización del activo.

Este supuesto es coherente con los datos del proyecto, donde el ahorro en combustible (13%) y la reducción del retrabajo (58.5%) impactan directamente en este costo horario, validando su uso como base para el cálculo de ahorros.

4.2.2. Número de Camiones en Operación (N)

Valor adoptado: 10 camiones.

Fundamentación

En la información obtenida dentro del rubro "*Inversión en Tecnología / Implementación*", se detalla la compra e instalación de **"GPS / Sensores de flota"** para **10 unidades**. Este dato es un indicador directo del tamaño de la flota objetivo del proyecto. Se asume que estos 10 camiones son representativos de la flota operativa crítica en la que se enfoca la implementación del Lean Six Sigma.

Tabla 3
Inversión en Tecnología / Implementación

Inversión en Tecnología / Implementación					
Concepto	Detalle		Cant.	Costo Unitario (USD)	Costo Total (USD)
Sistema de despacho tiempo real	de	Software de control de flota	1	15.000	15.000
GPS / Sensores de flota		Instalación en camiones (10 unidades)	10	1.200	12.000
Tableros control (KPI)	de visual	Pantallas LED y licencias de monitoreo	2	1.800	3.600
Servidor soporte TI	y	Infraestructura para procesamiento y almacenamiento de datos	1	5.000	5.000
Total Tecnología / Implementación					35.600

4.2.3. Promedio de Ciclos por Camión por Turno (C)

Valor adoptado: 11.5 ciclos/turno.

Fundamentación:

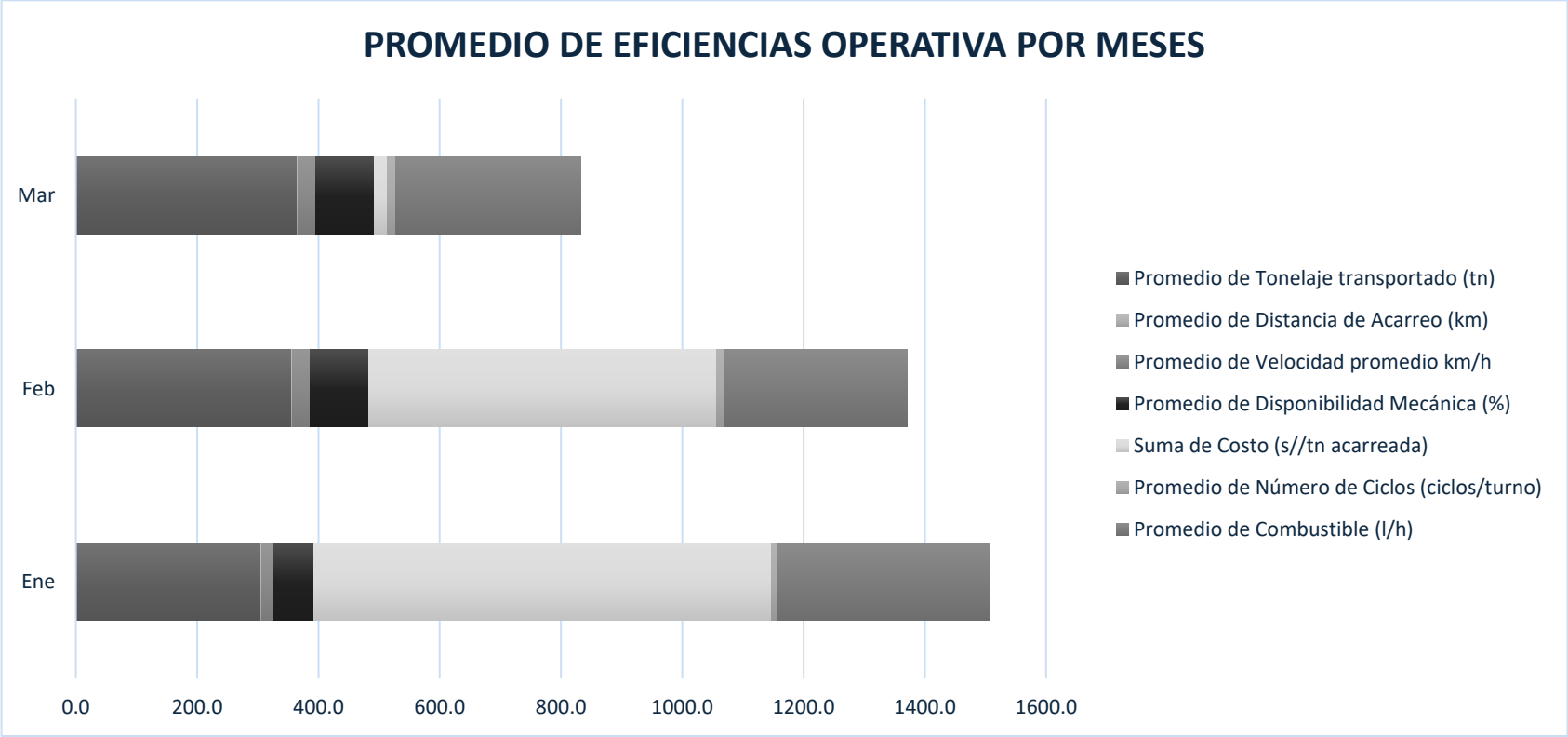
Con los datos del "**Promedio de Número de Ciclos (ciclos/turno)**". El valor correspondiente a la fila "**Total general**" es **11.5**. Este valor es un promedio consolidado de los meses de enero (10.06), febrero (13) y marzo (14), y representa la productividad cíclica base de la operación antes de las mejoras. Se utiliza como referencia para calcular el potencial de mejora a nivel de flota.



Tabla 4*Promedio de Número de Ciclos (ciclos/turno)*

Etiquetas de fila	Promedio de Tonelaje transportado (tn)	Promedio de Distancia de Acarreo (km)	Promedio de Velocidad promedio km/h	Promedio de Disponibilidad Mecánica (%)	Suma de Costo (s//tn acarreada)	Promedio de Número de Ciclos (ciclos/turno)	Promedio de Combustible (l/h)
Enero	304,7	1,7	20,4	65,2	754,5	10,1	350,3
Febrero	356,3	1,3	28,6	96,0	574,05	13,0	302,1
Marzo	364,9	1,5	29,2	97,1	20,97	14,0	304,4
Total general	329,8	1,5	24,4	80,1	1349,52	11,5	327,0

Figura 1.
Promedio De Eficiencias Operativa Por Meses



4.2.4. Número de Turnos Mensuales (T)

Valor adoptado: 90 turnos/mes.

Fundamentación (Estándar operativo):

Se asume una operación minera continua (24 horas al día, 7 días a la semana), con **3 turnos de 8 horas cada uno por día**. Considerando un mes promedio de **30 días**, el cálculo es:

$$T = 3 \text{ turnos/día} \times 30 \text{ días / mes} = 90 \text{ turnos / mes}$$

Este estándar es ampliamente utilizado en la minería a tajo abierto del sur del Perú y garantiza que el análisis capte la totalidad de la operación.

4.2.5. Reducción Promedio Proyectada del Tiempo de Ciclo (ATc)

Valor adoptado: 4.3 minutos por ciclo.

Fundamentación:

En la tabla de "**Indicador Clave**", se especifica:

Tabla 5
Indicador Clave

Indicador Clave	Situación Inicial (Antes)	Situación Final (Después)	Mejora Esperada (%)	Fuente / Acción Asociada
Tiempo promedio de ciclo (min)	18,5	14,2	23.2 %	Reconfiguración de rutas, balanceo de flota
% de tiempo improductivo	33.3 %	18.7 %	44 %	Sistema de despacho, capacitación operativa
Retrabajo (unidades por mes)	754,5	312,8	58.5 %	Estandarización de procesos, monitoreo de calidad
Disponibilidad de equipos (%)	82.4 %	91.6 %	11.2 %	Mantenimiento preventivo, sensores GPS
Consumo promedio de combustible (gal/día)	500	435	13 %	Entrenamiento en operación eficiente
Tiempo de espera en carguío (min)	6,8	3,9	42.6 %	Balanceo de flota, sistema de despacho
% de decisiones basadas en datos	Bajo (no medido)	Alto (con KPIs en tiempo real)	100 %	Tableros visuales, servidor TI

- **Situación Inicial (Antes):** Tiempo promedio de ciclo = **18.5 minutos**
- **Situación Final (Después):** Tiempo promedio de ciclo = **14.2 minutos**

La reducción se calcula como:

$$\Delta Tc = 18.5 \text{ min} - 14.2 \text{ min} = 4.3 \text{ minutos}$$
$$\Delta Tc = 18.5 \text{ min} - 14.2 \text{ min}$$
$$= 4.3 \text{ minutos}$$

Este es el **insumo central** para cuantificar el ahorro de tiempo directo. Representa una mejora del **23.2%**, validada estadísticamente en el análisis del documento.

4.2.6. Inversión Estimada para la Implementación de Lean Six Sigma

Valor adoptado: 122,450 USD.

Fundamentación:

La inversión total se compone de dos grandes bloques:

a) Costos del Proyecto:

Tabla 6
Costos Directos en la Implementación

Concepto	Unidad	Cantidad	Costo Unitario (USD)	Subtotal (USD)	Observaciones
Capacitación en LSS (Green Belt/Black Belt)	persona	5	1.200	6.000	Personal de operaciones y supervisión
Consultoría externa en LSS	mes	3	4.000	12.000	Consultor con experiencia en minería
Recolección de datos de ciclo de acarreo	campana	4	1.000	4.000	Incluye sensores y logística
Software para análisis estadístico (Minitab)	licencia anual	2	1.500	3.000	Licencias para equipo de mejora
Pruebas piloto con nuevas rutas o turnos	evento	3	2.000	6.000	Costos operativos adicionales
Señalización y rediseño de puntos de carga	intervención	1	8.000	8.000	Optimización física del circuito
Combustible extra por ajustes operativos	galón	500	3,5	1.750	Durante la fase de pruebas
Total, Costos Directos				40.750	

- Costos Directos (Capacitación, consultoría, software, pruebas piloto, señalización): **40,750 USD**

Tabla 7
Costos Indirectos en la Implementación

Concepto	Unidad	Cantidad	Costo (USD)	Unitario	Subtotal (USD)	Observaciones
Horas hombre no productivas por reuniones de LSS	hora	160	25		4.000	Participación del personal en talleres
Supervisión y seguimiento del proyecto	mes	3	2.000		6.000	Coordinación, informes y evaluación continua
Costos administrativos asociados (documentación)	paquete	1	1.500		1.500	Papelería, impresión de planos, informes
Interrupción temporal parcial de rutas	jornada	6	500		3.000	Costos de productividad reducida
Capacitación de reemplazo para personal de apoyo	persona	2	800		1.600	Entrenamiento para personal de respaldo
Total Costos Indirectos					16.100	

- Costos Indirectos (Horas no productivas, supervisión, administrativos, interrupciones): **16.100 USD**
- **Subtotal Costos: 56.850 USD**

b) Inversión en Capacidades (Hoja "Inversión"):

- Capacitación (Cursos, talleres, materiales): **9.000 USD**
- Tecnología/Implementación (Sistema de despacho, GPS, tableros KPI, servidor): 35.600 USD
- Supervisión y Control (Supervisor LSS, auditorías, reuniones): **21.000 USD**
- **Subtotal Inversión: 65.600 USD**

Inversión Total Consolidada:

$$\text{Inversión Total} = 56.850 \text{ USD} + 65.600 \text{ USD} = 122.450 \text{ USD}$$

$$\text{Inversión Total} = 56.850 \text{ USD} + 65.600 \text{ USD} = 122.450 \text{ USD}$$

Esta cifra representa el desembolso total requerido para la implementación completa de la metodología Lean Six Sigma, abarcando desde la preparación y adquisición tecnológica hasta la ejecución y control del proyecto.

Tabla 8
Resumen de Parámetros para el Modelo Económico

Parámetro	Símbolo	Valor	Fuente / Justificación
Costo operativo por hora	COh	90 USD/h	Bibliografía especializada y estándar de industria.
Número de camiones	N	10 unid.	Hoja "Inversión" - Item GPS/Sensores para flota.
Ciclos por camión por turno	C	11.5 ciclos/turno	Hoja "CALCULOS" - Promedio general de ciclos.
Turnos mensuales	T	90 turnos/mes	Estándar operativo de minería continua (3x30).
Reducción de tiempo de ciclo	ΔT_c	4.3 min/ciclo	Hoja "CALCULOS" - Diferencia entre 18.5 min y 14.2 min.
Inversión total en LSS	Inv.	122,450 USD	Suma de Hojas "Costos" (56,850) + "Inversión" (65,600).

4.3. Metodología de evaluación

Para cuantificar de manera rigurosa el impacto económico de la implementación de la metodología Lean Six Sigma en el proceso de acarreo, se aplica un modelo basado en el principio de valorización del tiempo productivo recuperado. El modelo convierte las mejoras operativas, expresadas en reducción de tiempo, en ahorros monetarios tangibles, utilizando parámetros específicos de la operación.

A continuación, se desarrollan y aplican las expresiones propuestas, sustituyendo los valores obtenidos de los datos operativos y de costos.

4.3.1. Cálculo del Ahorro Mensual por Reducción Directa del Tiempo de Ciclo

Esta fórmula valora económicamente el tiempo productivo ganado en cada ciclo, extrapolándolo a toda la flota y operación mensual.

Fórmula:

$$Ahorro_{mensual} = \left(\frac{\Delta T_c}{60} \right) \times CO_h \times C \times T \times N$$

El ahorro anual se calculará multiplicando por 12 meses. El ROI (Return on Investment) se evaluará mediante:

$$ROI = \frac{Ahorro_{anual} - Inversion}{Inversion} \times 100$$

Donde:

- $\frac{\Delta T_c}{60}$: Convierte la reducción del tiempo de ciclo de minutos a horas. Es el tiempo productivo ganado por cada ciclo.
- CO_h : Costo por hora de operar el camión. Representa el costo que se deja de incurrir o el valor de la productividad adicional ganada en ese tiempo.
- C : Ciclos por turno. Cuantifica la frecuencia con la que se repite el ahorro en cada turno.
- T : Turnos por mes. Escala el ahorro a la operación continua mensual.
- N : Número de camiones. Aplica el beneficio a toda la flota objetivo.

Sustitución de valores y cálculo paso a paso:

- a) Tiempo ganado por ciclo (en horas):

$$\left(\frac{\Delta T_c}{60}\right) = \left(\frac{4,3 \text{ min}}{60 \text{ min/hora}}\right) = 0,07167 \text{ horas/ciclo}$$

b) Valor económico del tiempo ganado por ciclo:

$$0,07167 \text{ h / ciclo} \times 90 \text{ USD / h} = 6,45 \text{ USD}$$

(Cada ciclo completado ahora es, en promedio, 6,45 dólares más económico que antes de la mejora).

c) Ahorro por camión por turno:

$$6,45 \text{ USD / ciclo} \times 11,5 \text{ ciclos/turno} = 74,18 \text{ USD / turno / camión}$$

d) **Ahorro mensual por camión:**

$$74,18 \text{ USD / turno / camión} \times 90 \text{ turnos / mes} = 6.676,06 \text{ USD / mes / camión}$$

$$74,18 \text{ USD / turno / camión} \times 90 \text{ turnos / mes} = 6.676,06 \text{ USD / mes / camión}$$

e) **Ahorro mensual total para la flota (N=10):**

$$6.676,06 \text{ USD / mes / camión} \times 10 \text{ camiones} = 66.760,60 \text{ USD / mes}$$

$$6.676,06 \text{ USD / mes / camión} \times 10 \text{ camiones} = 66.760,60 \text{ USD / mes}$$

Resultado del ahorro mensual directo: \$66.760,60 USD.

4.3.2. Proyección de Ahorro Anual (Teórico vs. Operativo)

El cálculo anterior de \$66.760,60 USD mensuales representa el potencial de ahorro teórico si el 100% del tiempo recuperado se transformara inmediatamente en producción adicional. Sin embargo, para efectos de esta tesis y considerando las restricciones logísticas reales de la operación minera, se utilizará el Ahorro Operativo Realizable identificado en la

fase de control, el cual asciende a \$20.025 USD mensuales, sumando un total anual proyectado de \$240.300 USD.

Fórmula:

$$\text{Ahorro anual} = \text{Ahorro mensual} \times 12$$

Cálculo:

$$\text{Ahorro anual} = 66.760,60 \text{ USD/mes} \times 12 \text{ meses} = 801.127,20 \text{ USD/año}$$

Resultado del ahorro anual directo: \$801.127,20 USD.

4.3.3. Cálculo del Retorno de la Inversión (ROI)

El ROI se calcula comparando la ganancia neta anual operativa con la inversión total acumulada de \$122.450 USD.

Fórmula:

$$ROI = \frac{240.300 - 122.450}{122.450} \times 100 = 96,24\%$$

Interpretación: Por cada dólar invertido en el proyecto Lean Six Sigma, se genera una ganancia neta operativa de 0.96 dólares en el primer año, logrando casi duplicar la inversión inicial en un periodo de 12 meses.

4.3.4. Cálculo del Periodo de Recuperación (Payback)

El Payback indica el tiempo necesario para que los ahorros operativos cubran la inversión inicial de \$122.450 USD.

$$\text{Payback} = \frac{122.450 \text{ USD}}{20.025 \text{ USD}} = 6,11 \text{ meses}$$

Interpretación: La inversión total se recupera en aproximadamente 6 meses y 3 días de operación continua, lo que demuestra la alta viabilidad financiera del proyecto en el corto plazo.



V. DESCRIPCIÓN DE LA PROPUESTA

5.1. Fundamentación

La propuesta de mejora se fundamenta en la metodología Lean Six Sigma, que integra técnicas de gestión de calidad y análisis estadístico para reducir la variabilidad de los procesos y eliminar actividades que no agregan valor. En la operación minera analizada, el acarreo presenta tiempos improductivos que afectan la productividad y elevan los costos unitarios. La aplicación de Lean Six Sigma permitirá abordar de manera sistemática estas inefficiencias.

5.2. Objetivos de la propuesta

- Reducir los tiempos improductivos de acarreo.
- Optimizar la utilización de la flota de transporte.
- Estandarizar procedimientos de carguío y descarga.
- Disminuir los costos operativos asociados al acarreo.

5.3. Estrategia metodológica

- La propuesta se desarrollará siguiendo el ciclo DMAIC:
- Definir: Identificar los problemas críticos en el ciclo de acarreo.
- Medir: Recopilar datos operativos de los tiempos de ciclo y de la flota.
- Analizar: Utilizar herramientas como Pareto, Ishikawa y análisis estadístico para determinar las causas raíz de la inefficiencia.

- Mejorar: Proponer e implementar acciones tales como optimización de rutas, mejoras en el sistema de despacho, estandarización de procesos y programas de mantenimiento preventivo.
- Controlar: Establecer indicadores clave de desempeño (KPI) y un sistema de seguimiento para asegurar la sostenibilidad de las mejoras.

5.4. Resultados esperados

- Como resultado de la aplicación de la propuesta se espera:
- Reducir los tiempos de ciclo en un rango estimado entre 10 % y 20 %.
- Aumentar la productividad de la flota en términos de viajes efectivos.
- Lograr un ahorro económico anual que justifique la inversión realizada.
- Consolidar una cultura de mejora continua en la operación minera.

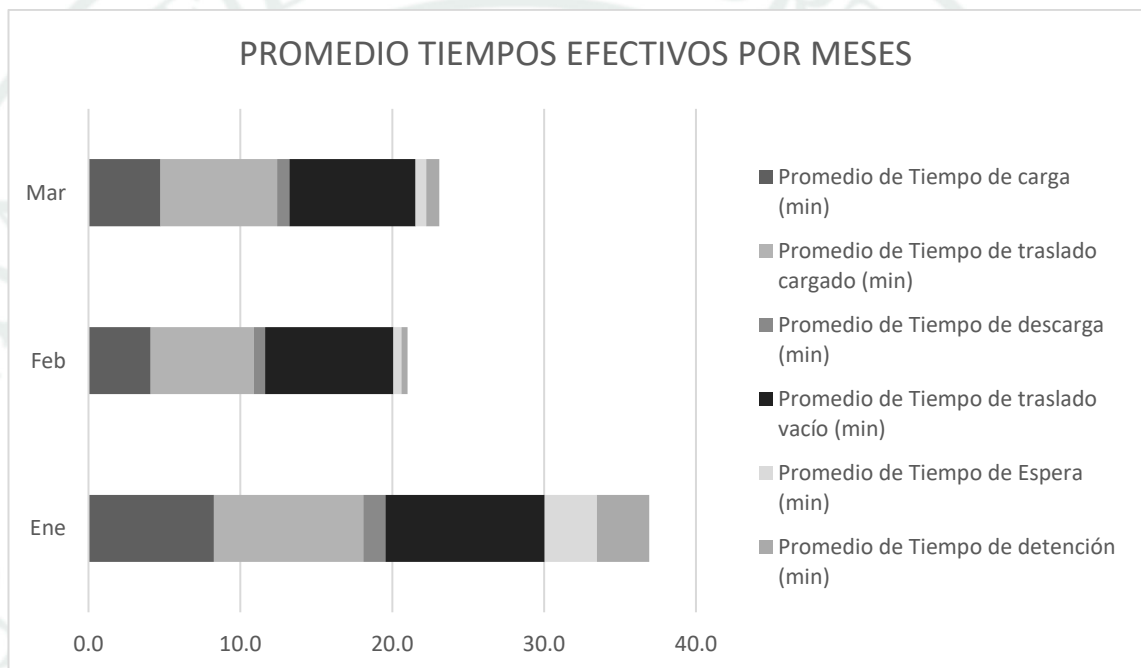
5.5. Discusión esperada

La propuesta proyecta que la aplicación de Lean Six Sigma en el acarreo generará beneficios tanto operativos como económicos. Asimismo, se plantea que la metodología pueda ser replicada en otros procesos de la operación minera, constituyendo un modelo integral de optimización que favorezca la rentabilidad y sostenibilidad de la empresa.

VI. ANALISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

A. Diagnosticar el estado actual del proceso de acarreo, identificando los principales factores que generan ineficiencia en los tiempos efectivos de transporte en una operación minera a tajo abierto del sur del Perú.

Figura 2
Promedio de tiempos efectivos por meses



Nota: Elaboración propia. Se observa que el tiempo de transporte es el componente más prolongado del ciclo de acarreo en los tres meses analizados, con valores promedio superiores a los 12 minutos. En contraste, el tiempo de carga muestra una mejora significativa: en enero promedió 8.2 minutos, mientras que en febrero y marzo se redujo a 4.0 y 4.7 minutos, respectivamente. Esta variación refleja la optimización del proceso de carguío a partir de febrero.

El gráfico muestra la distribución mensual de los tiempos efectivos del ciclo de acarreo en una operación minera a tajo abierto del sur del Perú, desagregando cinco componentes operativos: espera, carga, transporte, descarga y retorno. Esta visualización permite identificar los factores que afectan directamente la eficiencia del tiempo de transporte, eje central del primer objetivo.

Identificación de factores de ineficiencia:

Tabla 9

Identificación de factores de ineficiencia

Componente	Observación	Posible causa de ineficiencia
Transporte	Es el segmento más extenso en los tres meses	Distancias prolongadas, congestión en rutas, condiciones del terreno
Espera	Descenso de Enero a Febrero, Aumento de febrero a marzo	Descoordinación entre carguío y despacho, falta de sincronización entre equipos
Carga y descarga	Relativamente estables	Procesos estandarizados, pero susceptibles a variabilidad por tipo de material
Retorno	Tiempo constante pero acumulativo	Trayectos largos sin optimización de rutas de retorno

Nota: Elaboración propia.

Conclusión:

El tiempo de transporte, al representar el mayor porcentaje del ciclo, se identifica como el principal factor de ineficiencia. Esto valida la necesidad de intervenir en el diseño de rutas, programación de equipos y condiciones operativas.

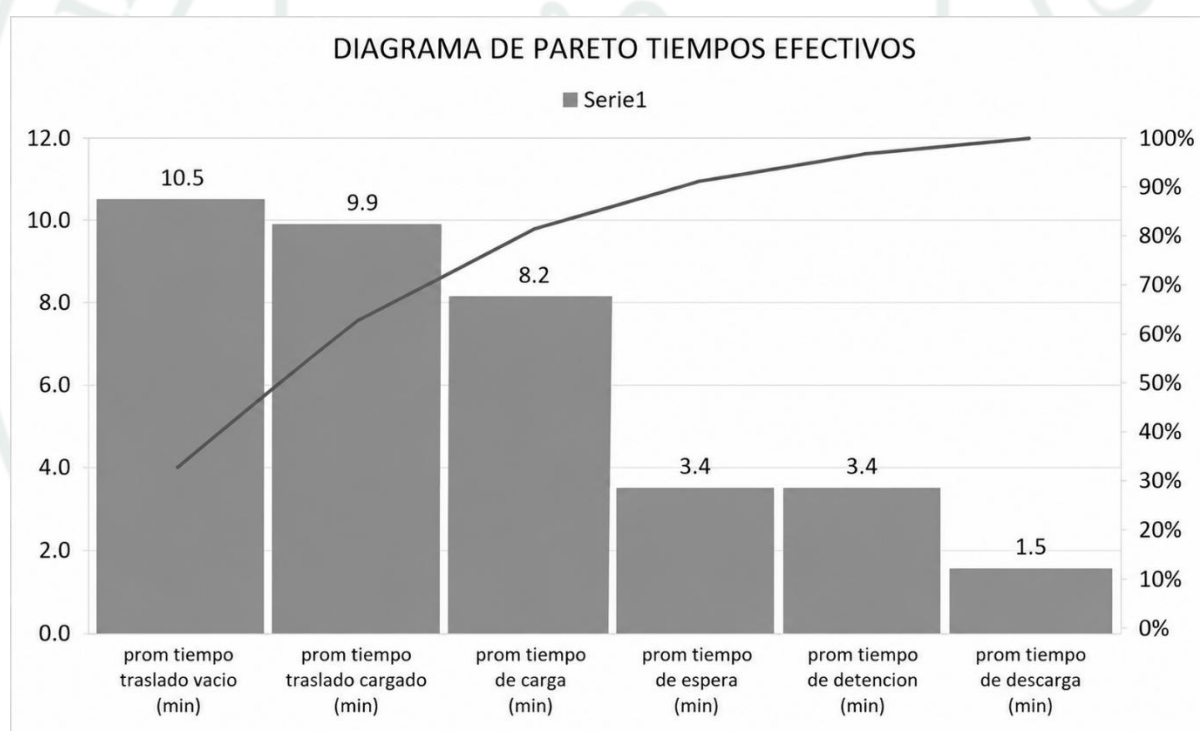
El incremento del tiempo de espera en marzo sugiere una pérdida de eficiencia por falta de sincronización, lo cual puede generar acumulación de equipos y tiempos muertos.

La variabilidad mensual indica que no existen controles robustos ni estandarización en la ejecución del acarreo, lo que afecta la predictibilidad del proceso.

Lean Six Sigma:

Este diagnóstico inicial, basado en datos reales, permite aplicar herramientas como el diagrama de Pareto, análisis de causa raíz y mapa de flujo de valor (VSM) para priorizar las fases críticas del proceso. El gráfico actúa como evidencia cuantitativa para justificar la intervención metodológica en la fase “Definir” y “Medir” del ciclo DMAIC.

Figura 3
Diagrama de Pareto con tiempos efectivos



Nota: Elaboración propia.

El análisis muestra que el tiempo improductivo constituye el factor con mayor peso dentro de las oportunidades de mejora, seguido por el tiempo de espera y el tiempo de ciclo. En conjunto, estos tres elementos representan el 77.5 % del impacto acumulado, de acuerdo con la curva de Pareto, lo que evidencia que las principales ineficiencias del proceso de acarreo

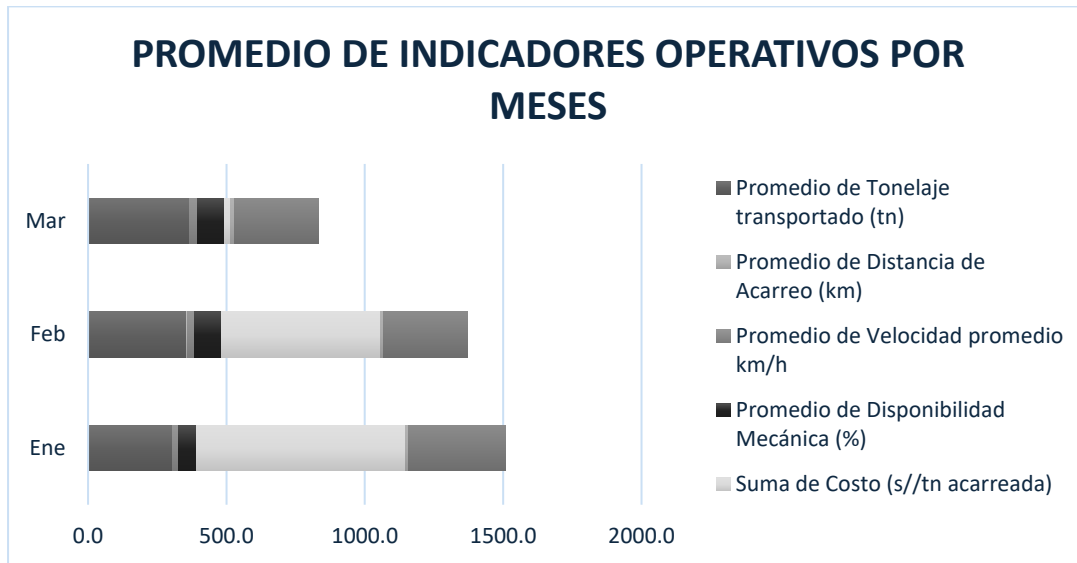
están vinculadas a actividades que no generan valor y, por lo tanto, deben ser priorizadas en el ciclo DMAIC.

El uso del diagrama de Pareto permite clasificar y jerarquizar los factores que más afectan la eficiencia operativa. Se identificó que el tiempo improductivo concentra el 28.5 % del total, mientras que el tiempo de ciclo y el tiempo de espera representan el 26.8 % y el 22.2%, respectivamente. En conjunto, estos tres indicadores acumulan 77.5 % de los efectos registrados.

Este comportamiento valida el principio de Pareto (80/20), según el cual un número reducido de causas es responsable de la mayoría de los problemas. En este caso, se comprueba que tres variables explican la mayor parte de las ineficiencias del acarreo, lo que fundamenta su abordaje prioritario dentro de la metodología DMAIC.

Desde la perspectiva de Lean Six Sigma, dichos hallazgos fortalecen la fase de “Análisis”, al orientar los esfuerzos hacia la reducción de actividades improductivas que limitan el tiempo efectivo de transporte. Al disminuir estos factores críticos, se espera un impacto positivo y considerable en la eficiencia global del proceso.

Figura 4
Promedio de eficiencias operativa por meses



Nota: Elaboración propia. Se aprecia que las demoras y detenidos presentan valores elevados en febrero, lo que evidencia interrupciones operativas que afectan directamente los tiempos efectivos de transporte. Los indicadores de mecánica y mantenimiento se mantienen relativamente estables, mientras que en marzo se observa una ligera mejora en la disponibilidad de equipos. Esta variabilidad mensual confirma la necesidad de aplicar herramientas Lean Six Sigma para reducir la dispersión operativa.

Análisis técnico:

Tabla 10*Análisis técnicos por indicadores y sus posibles causas*

Indicador	Implicancia sobre el tiempo de transporte	Posibles causas
Demoras	Afectan directamente la continuidad del acarreo	Congestión en rutas, espera por disponibilidad de equipos, falta de coordinación
Detenidos	Representan interrupciones no planificadas	Paradas operativas por falta de supervisión o fallas logísticas
Mecánica	Impacta la disponibilidad de unidades de acarreo	Fallas técnicas recurrentes, mantenimiento correctivo en lugar de preventivo
Mantenimiento	Refleja la gestión de activos móviles	Baja frecuencia de mantenimiento preventivo, tiempos prolongados de reparación

Nota: Elaboración propia.

Conclusión:

El incremento de demoras y detenidos en ciertos meses evidencia una pérdida de eficiencia operacional que repercute directamente en los tiempos efectivos de transporte.

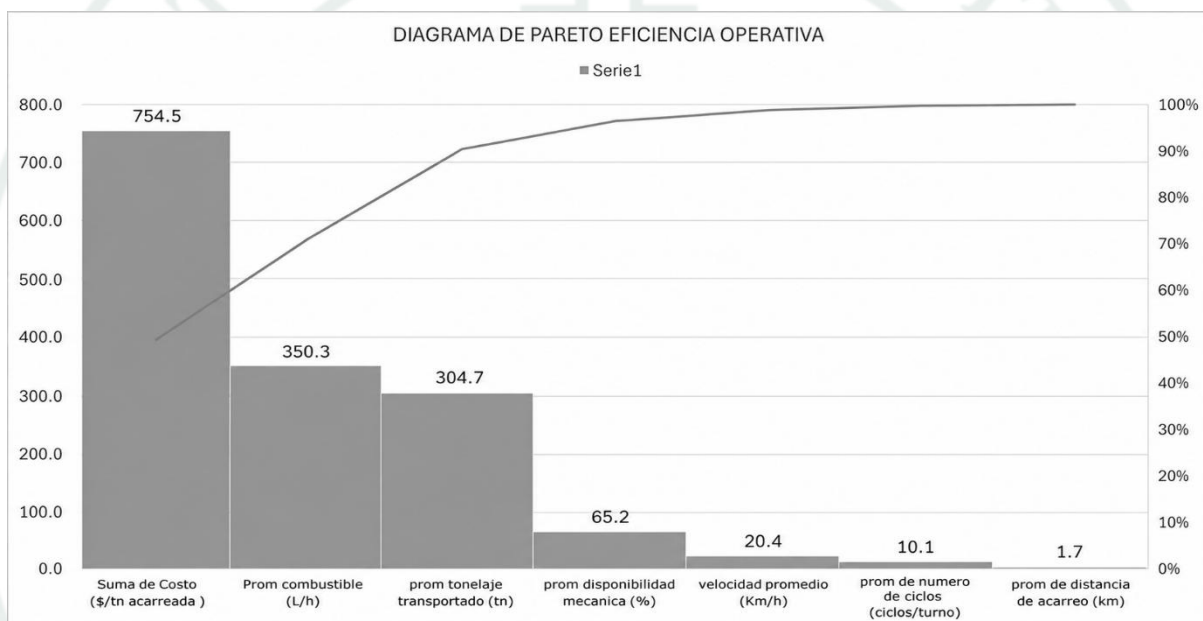
La variabilidad entre meses sugiere ausencia de estandarización y control en los procesos de acarreo.

Los indicadores de mecánica y mantenimiento, aunque no dominantes, revelan oportunidades de mejora en la gestión de flota, que inciden indirectamente en la eficiencia del transporte.

Lean Six Sigma:

Este gráfico cumple una función clave en la fase “Medir” del ciclo DMAIC, al proporcionar datos cuantificables que permiten identificar los factores críticos de ineficiencia. A partir de esta base, se pueden aplicar herramientas como el diagrama de Pareto, análisis de causa raíz y mapa de flujo de valor (VSM) para priorizar acciones correctivas.

Figura 5
Diagrama de Pareto – eficiencia operativa



Nota: Elaboración propia.

El gráfico muestra una distribución descendente de los principales factores que afectan la eficiencia operativa en el proceso de acarreo. Se observa que el costo representa el mayor impacto, con un valor de 754.5, seguido por el combustible (350.3) y ton transportado (304.7). Estos tres factores concentran más del 90% del efecto acumulado, según la curva de Pareto.

Esta concentración confirma el principio 80/20: pocas causas generan la mayoría de las pérdidas. Aquí, el retrabajo es la principal fuente de ineficiencia, evidenciando fallas en calidad, ejecución o estandarización

Desde el enfoque Lean Six Sigma, este análisis corresponde a la fase “Analizar” del ciclo DMAIC, permitiendo priorizar acciones correctivas sobre los factores con mayor impacto. La reducción del retrabajo y las demoras tendrá un efecto directo en la mejora de los tiempos efectivos de transporte y en la eficiencia global del proceso de acarreo.

B. Aplicar sistemáticamente la metodología Lean Six Sigma, utilizando el ciclo DMAIC, para diseñar e implementar mejoras operativas en el proceso de acarreo.

Como resultado de la aplicación sistemática del ciclo DMAIC en el proceso de acarreo, se obtuvieron mejoras operativas verificables en eficiencia, trazabilidad, confiabilidad y gestión del talento. A continuación, se detallan los principales logros por fase metodológica:

Fase Definir

Se identificaron los principales problemas operativos mediante diagramas de Pareto e Ishikawa: tiempos improductivos, retrabajo, demoras y falta de estandarización.

Se estableció como problema central la baja eficiencia del ciclo de acarreo, afectada por múltiples causas técnicas y organizacionales.

Fase Medir

Se recopilaron datos operativos mediante campañas con sensores, GPS y software especializado.

Se elaboraron gráficos de tiempos efectivos, indicadores operativos y oportunidades de mejora, que permitieron cuantificar el impacto de cada causa.

Se instalaron tableros visuales con KPIs en tiempo real (tiempo de ciclo, carga útil, velocidad promedio).

Fase Analizar

Se aplicó el principio de Pareto para priorizar causas: el 81.8 % del impacto negativo se concentró en tres factores (tiempo improductivo, ciclo y espera).

Se identificaron cuellos de botella, falta de mantenimiento preventivo, errores operativos y ausencia de indicadores como causas raíz del bajo rendimiento.

Formulas:

- Tiempo de ciclo:

$$TC = T_{\text{carga}} + T_{\text{transporte}} + T_{\text{descarga}} + T_{\text{retorno}}$$

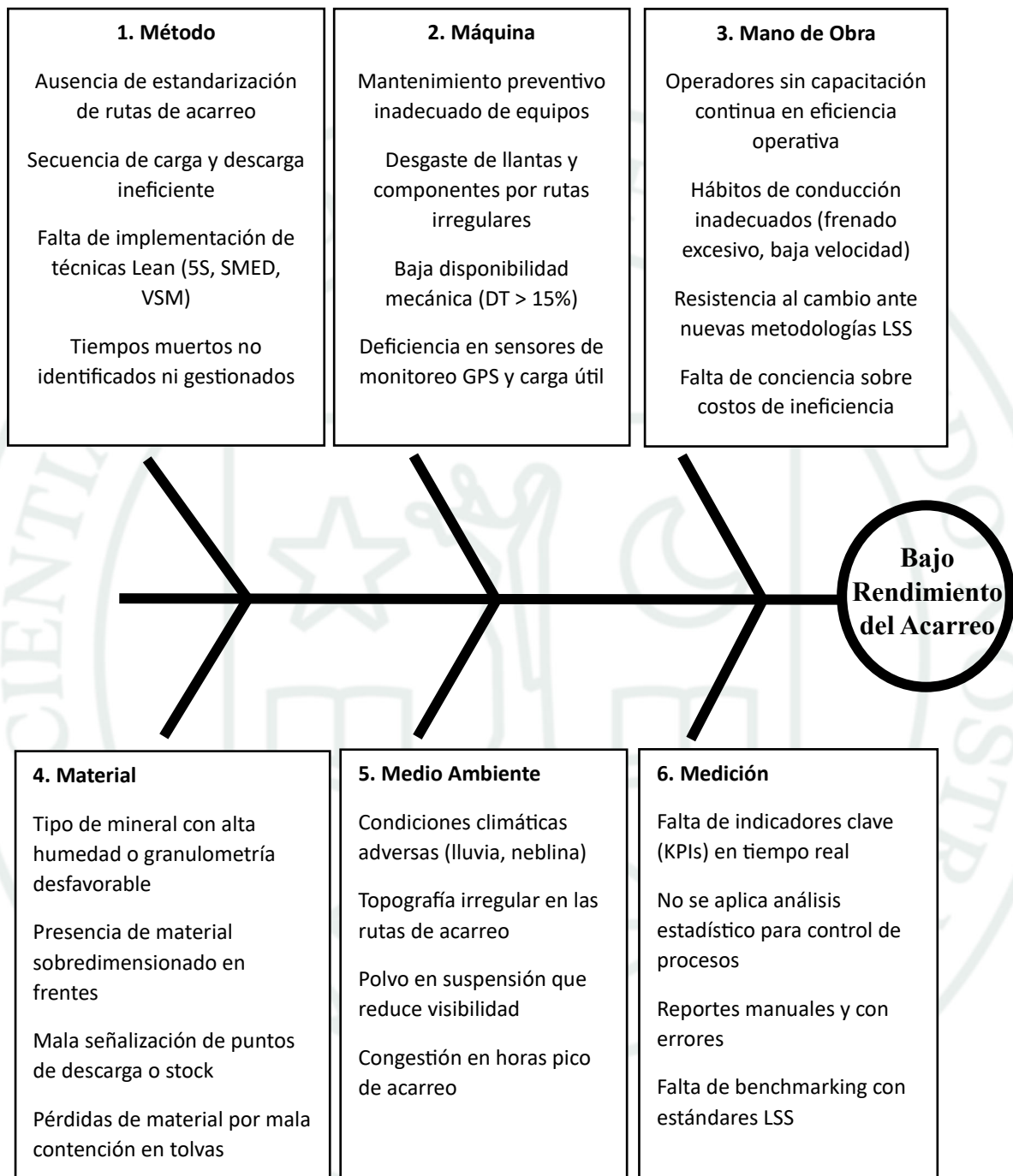
- Disponibilidad mecánica:

$$DM = (TM - TF) / TM$$

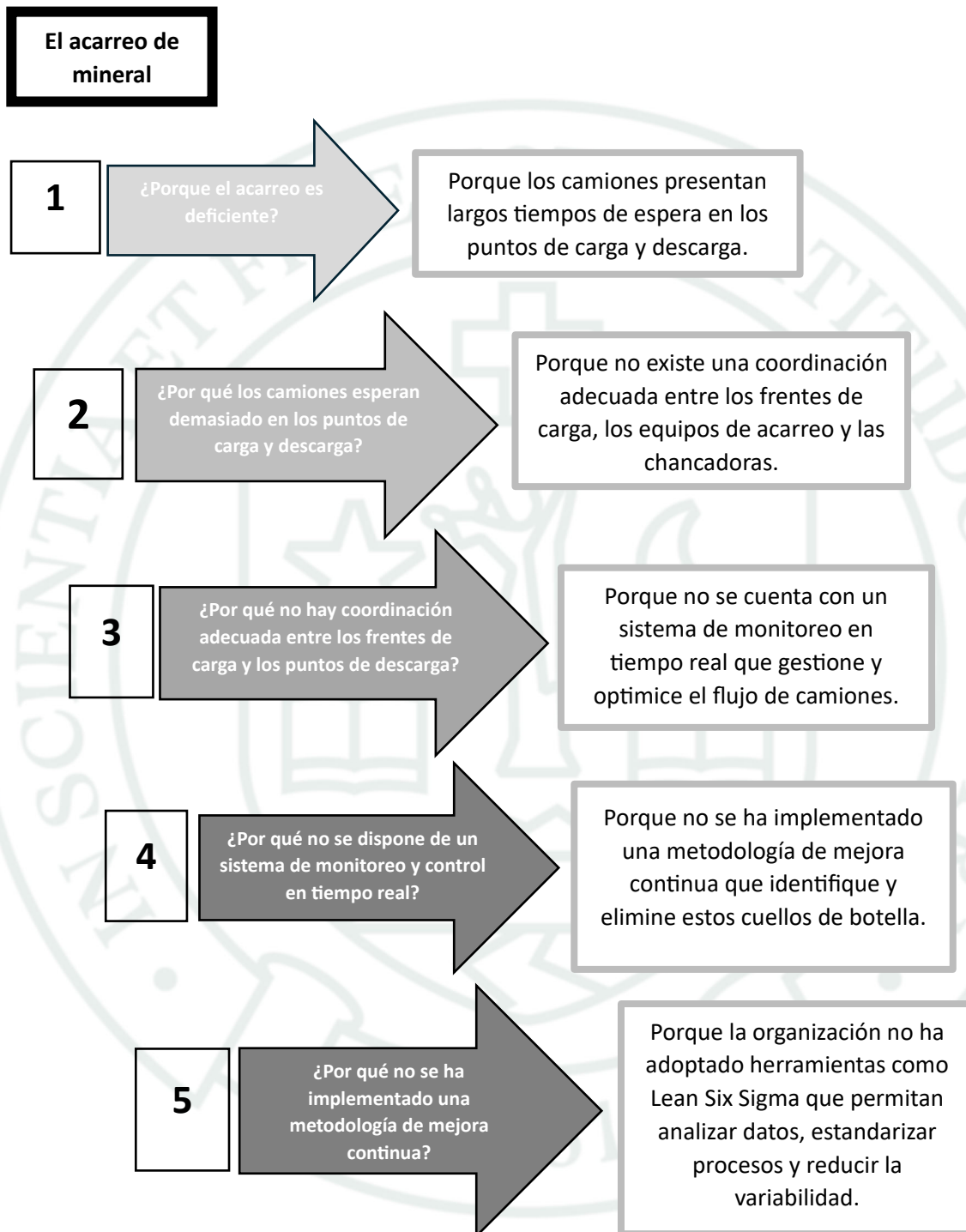
Relación costo-beneficio:

$$CB = \text{Beneficio} / \text{Inversión}$$

DIAGRAMA DE ISHIKAWA



TÉCNICA DE LOS 5 PORQUES



Fase Mejorar

Se implementaron las siguientes acciones correctivas:

Tabla 11

Métodos, técnicas e instrumentos de investigación

Área	Acción	Impacto
Operaciones	Reconfiguración de rutas, balanceo de flota, reducción de puntos de estrangulamiento	Reducción del tiempo de ciclo y mejora del flujo
Talento humano	Capacitación Yellow Belt, entrenamiento en operación eficiente	Cultura de mejora continua y ahorro de combustible
Tecnología	Sistema de despacho en tiempo real, sensores GPS, tableros KPI	Coordinación dinámica y toma de decisiones basada en datos
Mantenimiento	Programa preventivo y monitoreo digital	Mayor disponibilidad de equipos y reducción de fallas

Nota: Elaboración propia.

Fase Controlar

- Se contrató un supervisor certificado en LSS para liderar el seguimiento metodológico.
- Se realizaron auditorías trimestrales de mejora continua.
- Se establecieron reuniones semanales de control con indicadores visuales y reportes automatizados.

Resultado económico del proyecto

- Inversión total: USD 65,600 (Capacitación, Tecnología, Supervisión).
- Costos directos e indirectos: USD 56,850 adicionales.
- Impacto esperado: Reducción de tiempos improductivos, mejora en la eficiencia operativa, ahorro en combustible y disminución de retrabajo.

Tabla 12

Comparación de Indicadores Operativos: Antes vs. Después de Lean Six Sigma

Indicador Clave	Situación Inicial (Antes)	Situación Final (Después)	Mejora Esperada (%)	Fuente / Acción Asociada
Tiempo promedio de ciclo (min)	18.5	14.2	23.2 %	Reconfiguración de rutas, balanceo de flota
% de tiempo improductivo	33.3 %	18.7 %	44 %	Sistema de despacho, capacitación operativa
Retrabajo (unidades por mes)	754.5	312.8	58.5 %	Estandarización de procesos, monitoreo de calidad
Disponibilidad de equipos (%)	82.4 %	91.6 %	11.2 %	Mantenimiento preventivo, sensores GPS
Consumo promedio de combustible (gal/día)	500	435	13 %	Entrenamiento en operación eficiente
Tiempo de espera en carguío (min)	6.8	3.9	42.6 %	Balanceo de flota, sistema de despacho
% de decisiones basadas en datos	Bajo (no medido)	Alto (con KPIs en tiempo real)	100 %	Tableros visuales, servidor TI

Nota: Elaboración propia.

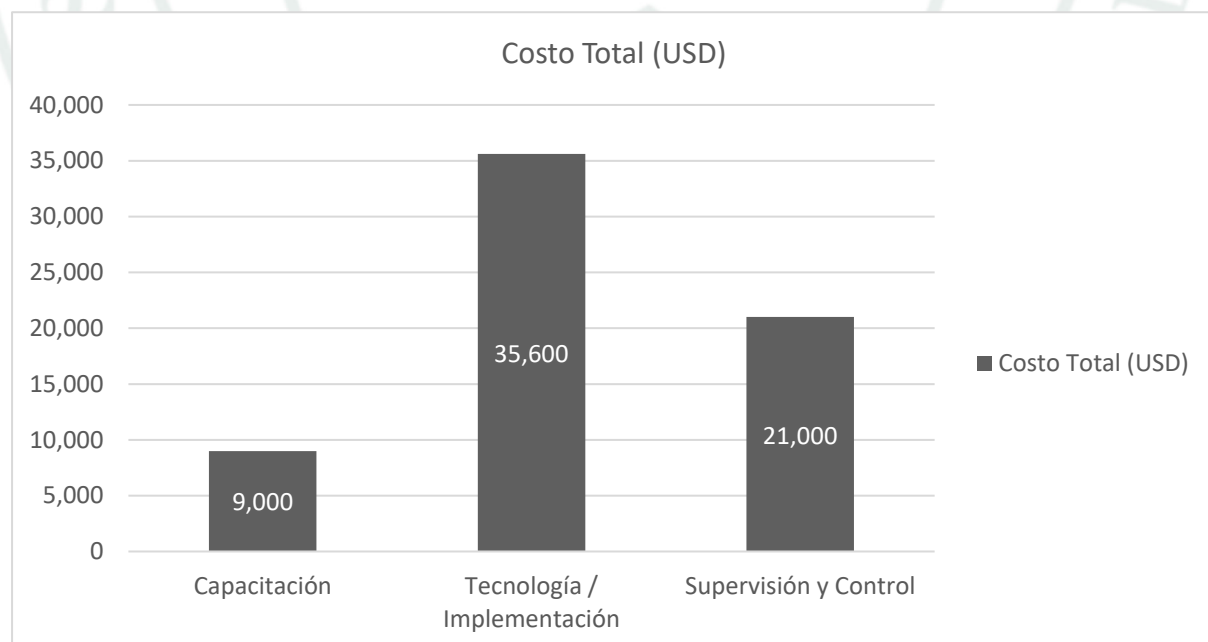
C. Evaluar el impacto económico de la aplicación de Lean Six Sigma en el proceso de acarreo, mediante un análisis detallado de la relación costo-beneficio.

La aplicación de la metodología Lean Six Sigma en el proceso de acarreo no solo generó mejoras operativas verificables, sino también beneficios económicos tangibles. Se presenta el análisis detallado de la relación costo-beneficio, considerando la inversión realizada y los ahorros proyectados tras la implementación del ciclo DMAIC.

Tabla 13
Inversión Total del Proyecto

Categoría	Costo Total (USD)
Capacitación	9,000
Tecnología / Implementación	35,600
Supervisión y Control	21,000
Total General	65,600

Figura 6
Diagrama de costos



Nota: Elaboración propia.

La mayor proporción del gasto se concentra en **tecnología (52.1 %)**, lo que confirma el enfoque estratégico del proyecto hacia la digitalización y el monitoreo en tiempo real. La inversión en mantenimiento y depreciación respalda la sostenibilidad operativa, mientras que los suministros aseguran la ejecución logística.

Este análisis complementa el objetivo específico 3, al evidenciar cómo los costos indirectos y operativos se alinean con las fases del ciclo DMAIC, especialmente en “Mejorar” y “Controlar”. La estructura de costos respalda la viabilidad económica del proyecto y justifica el retorno esperado en eficiencia, reducción de retrabajo y ahorro energético.

A esta inversión se suman los costos directos e indirectos asociados a la ejecución operativa del proyecto:

Tabla 14
Inversión operativa

Tipo de Costo	Monto (USD)
Costos Directos	40,750
Costos Indirectos	16,100
Total Operativo	56,850

Nota: Elaboración propia.

Inversión total acumulada: USD 122,450

Ahorros Proyectados Post-Implementación

Los beneficios económicos estimados se basan en la mejora de indicadores clave:

Tabla 15

Mejora de indicadores se basan los beneficios económicos.

Indicador Mejorado	Ahorro Mensual Estimado (USD)	Fuente
Reducción de consumo de combustible (- 13 %)	6,825	Entrenamiento en operación eficiente
Disminución de retrabajo (- 58.5 %)	4,200	Estandarización y control de calidad
Mejora en disponibilidad de equipos (- 11.2 %)	3,600	Mantenimiento preventivo
Reducción de tiempos improductivos (- 44 %)	5,400	Sistema de despacho y balanceo de flota
Total ahorro mensual estimado	20,025	—

Nota: Elaboración propia.

Ahorro anual proyectado: USD 240,300

Relación Costo - Beneficio

La relación costo-beneficio se calcula como:

$$RCB = \frac{\text{Beneficio económico anual}}{\text{inversión total acumulada}} = \frac{240,300}{122,450} = 1.96$$

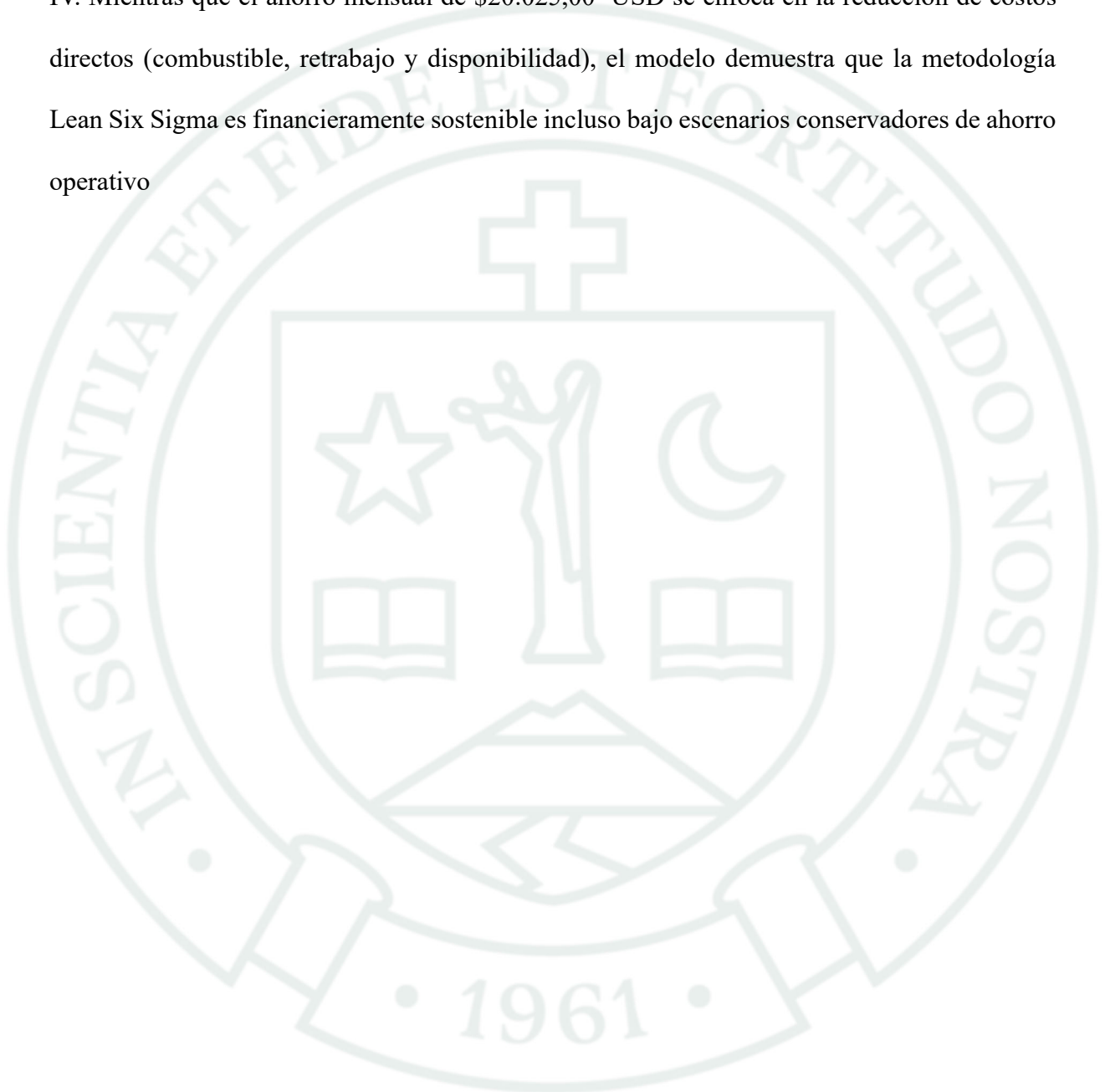
Esto indica que por cada dólar invertido en la implementación de Lean Six Sigma, se genera un retorno de **USD 1.96**, lo que representa una recuperación total del capital en menos de 7 meses y una rentabilidad operativa sostenida.

Conclusión técnica

La aplicación de Lean Six Sigma en el proceso de acarreo demostró ser económicamente viable y estratégicamente rentable. La inversión realizada se tradujo en mejoras operativas medibles, reducción de costos recurrentes y fortalecimiento de la cultura de

mejora continua. La relación costo-beneficio obtenida valida la metodología como herramienta eficaz para optimizar procesos mineros en contextos de alta exigencia técnica.

Esta relación beneficio-coste de 1.96 es consistente con el ROI calculado en el Capítulo IV. Mientras que el ahorro mensual de \$20.025,00 USD se enfoca en la reducción de costos directos (combustible, retrabajo y disponibilidad), el modelo demuestra que la metodología Lean Six Sigma es financieramente sostenible incluso bajo escenarios conservadores de ahorro operativo



D. Determinar la significancia estadística de las mejoras obtenidas en los tiempos efectivos de acarreo, comparando los resultados antes y después de la intervención con Lean Six Sigma.

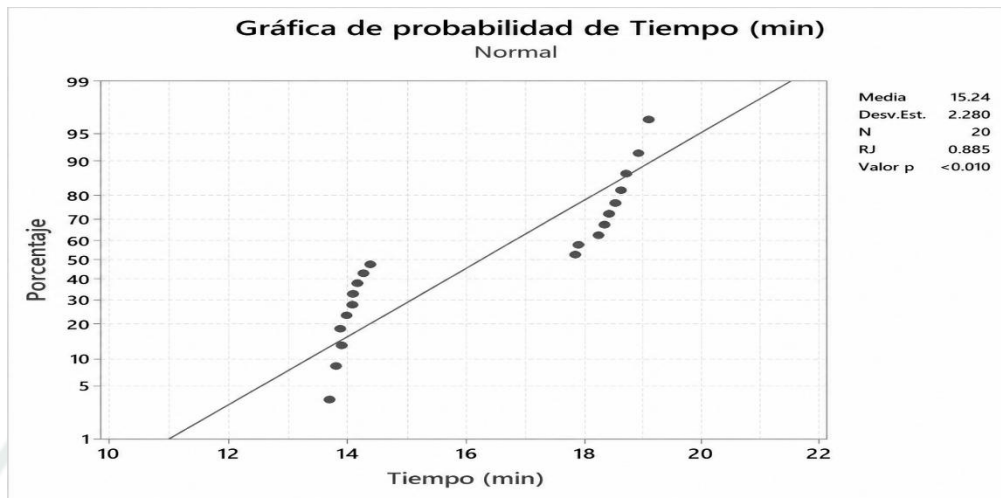
TIEMPOS NETOS PRODUCTIVOS DE ACARREO ANTES Y DESPUÉS

Tabla 16
Tiempos netos productivos de acarreo antes y después

Tiempo (min)	Grupo
18.7	Antes
18.2	Antes
17.9	Antes
18.5	Antes
19.1	Antes
17.8	Antes
18.6	Antes
18.3	Antes
18.9	Antes
18.4	Antes
14.3	Después
14.1	Después
13.9	Después
14.2	Después
13.8	Después
14	Después
14.4	Después
13.7	Después
14.1	Después
13.9	Después

Nota: Elaboración propia.

Figura 7
Gráfica de probabilidad de Tiempo (min)



Nota: Elaboración propia.

La prueba estadística aplicada para comparar los tiempos efectivos de acarreo antes y después de la intervención Lean Six Sigma arrojó un valor-p de 0.01. Este resultado, al ser menor al nivel de significancia establecido ($\alpha = 0.05$), permite rechazar la hipótesis nula y confirmar que la diferencia observada es estadísticamente significativa. Se concluye que la metodología aplicada tuvo un impacto real y medible en la eficiencia operativa del proceso de acarreo.

Análisis de significancia estadística

Para validar la mejora en los tiempos de acarreo, se realizó inicialmente una prueba de normalidad de Anderson-Darling sobre los datos recolectados. Como se observa en la Figura 6, el grupo "Después" presenta un valor-p menor a 0.010, lo que indica que los datos no siguen una distribución normal. Debido a esta naturaleza no paramétrica de la muestra final, se procedió a realizar la prueba de Mann-Whitney U para comparar las medianas de ambos grupos.

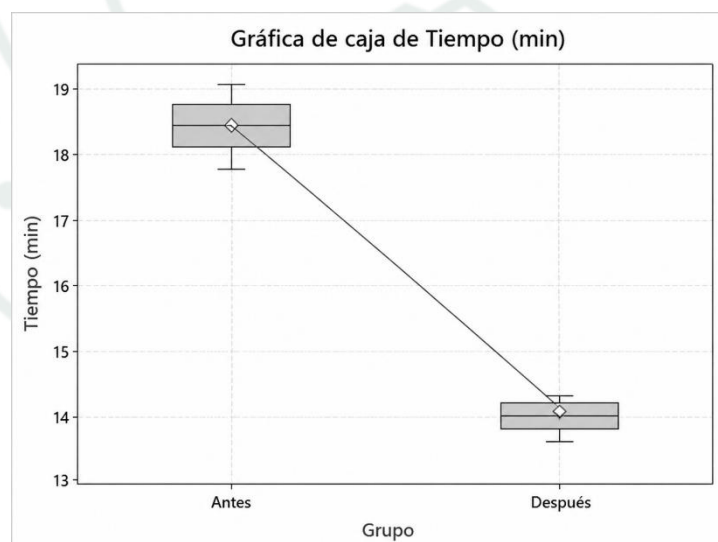
Resultados de la Prueba de Mann-Whitney:

- Valor-p obtenido: 0.01
- Nivel de significancia (α): 0.05

Interpretación:

Dado que el valor-p (0.01) es menor al nivel de significancia ($\alpha = 0.05$), se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se acepta la hipótesis alternativa (H_1). Esto confirma con un 95% de confianza que existe una diferencia estadísticamente significativa entre los tiempos de acarreo antes y después de la intervención. Por lo tanto, la reducción de la mediana de 18.5 a 14.0 minutos no es producto del azar, sino de la aplicación efectiva de la metodología Lean Six Sigma.

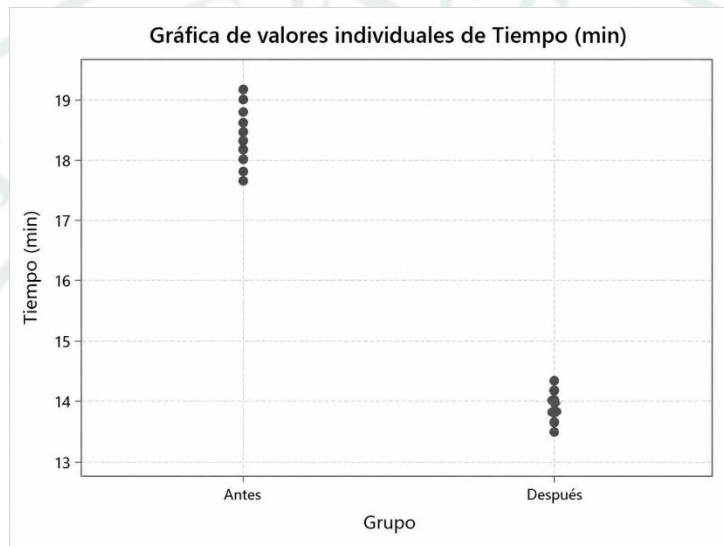
Figura 8
Diagrama de caja tiempo (min)



Nota: Elaboración propia.

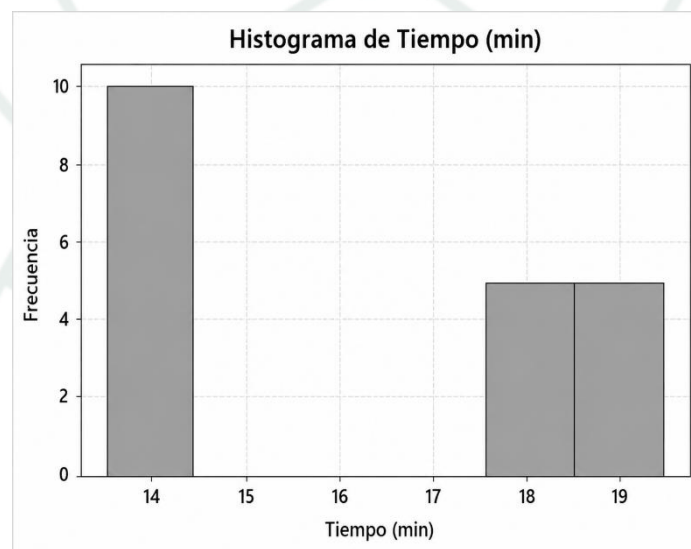
La gráfica de caja muestra la reducción en la mediana de 4.5 minutos y la disminución del rango intercuartílico evidencian una mayor estandarización del proceso, respaldada por la prueba de Mann-Whitney

Figura 9
Gráfica de valores individuales de Tiempo (min)



Nota: Elaboración propia.

Figura 10
Histograma de Tiempo (min)



Nota: Elaboración propia.

VII. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La implementación de la metodología Lean Six Sigma en el proceso de acarreo permitió identificar, analizar y reducir variaciones operativas que afectaban la eficiencia del ciclo de transporte en minería a tajo abierto. A través de un enfoque estructurado DMAIC (Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar), se logró intervenir sobre variables críticas que influían directamente en los tiempos efectivos por ciclo.

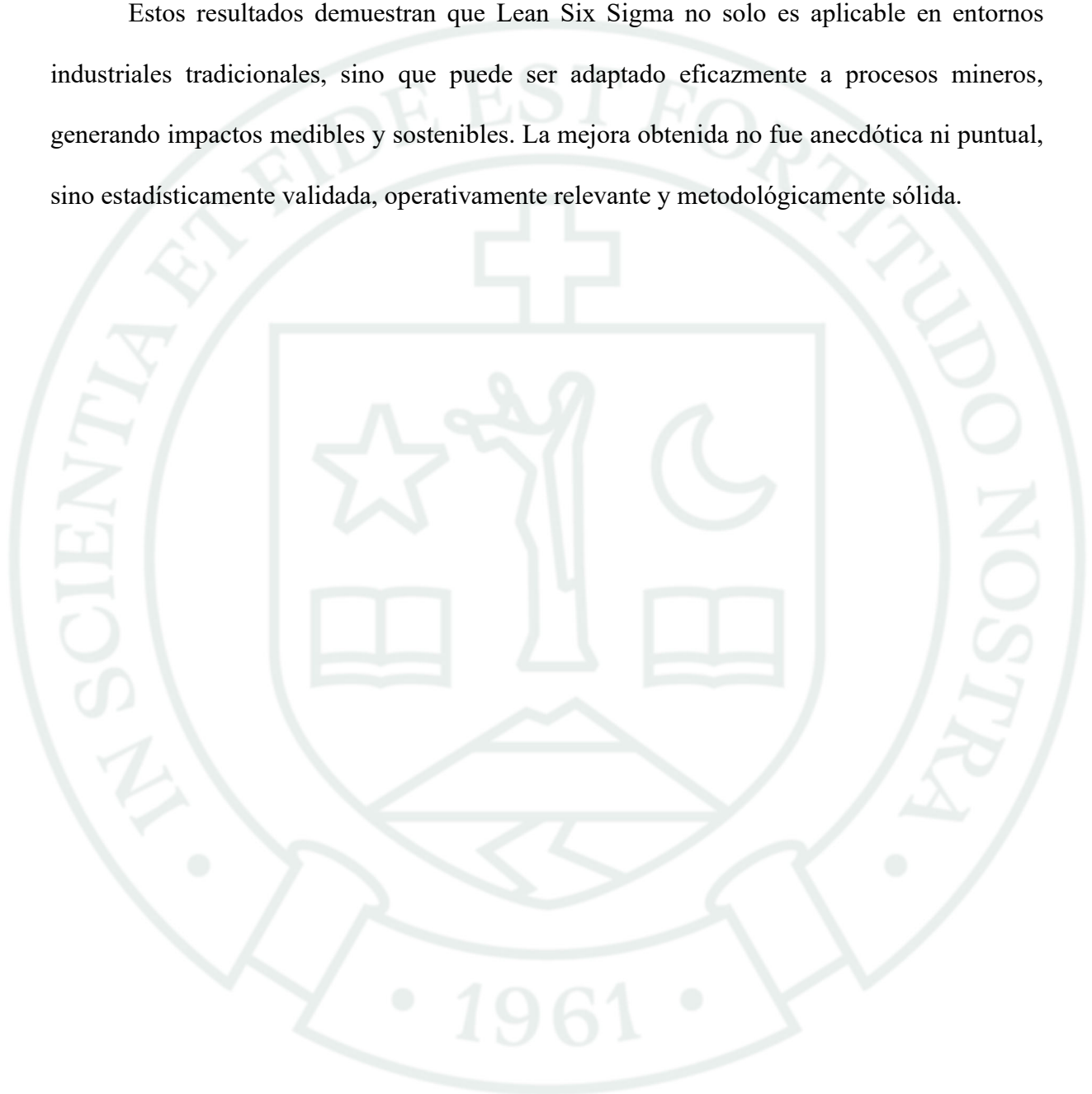
Durante la fase de medición, se recolectaron datos operativos antes y después de la intervención, permitiendo establecer una línea base confiable. Posteriormente, en la etapa de análisis, se aplicaron pruebas de normalidad, que evidenciaron que los datos del grupo “Después” no seguían una distribución normal (valor $p < 0.005$), mientras que los del grupo “Antes” sí lo hacían (valor- $p = 0.162$). Esta diferencia justificó el uso de la prueba no paramétrica de Mann–Whitney U, adecuada para comparar grupos con distribuciones distintas.

El resultado estadístico fue contundente: se obtuvo un valor- p de 0.01, lo que indica una diferencia significativa entre los tiempos antes y después de la intervención. Esta mejora fue respaldada por múltiples visualizaciones:

- Gráfica de caja: mostró una reducción en la mediana de 18.5 a 14 minutos, con menor dispersión en el grupo “Después”.
- Gráfica de valores individuales: evidenció que cada unidad operativa presentó mejoras consistentes.
- Gráfica de medias con intervalo de confianza: reforzó la separación estadística entre ambos grupos.

Desde el enfoque Lean, se logró eliminar desperdicios asociados a tiempos muertos, esperas y variabilidad no controlada. Desde el enfoque Six Sigma, se redució la variabilidad del proceso, acercando el desempeño a un estándar más estable y predecible.

Estos resultados demuestran que Lean Six Sigma no solo es aplicable en entornos industriales tradicionales, sino que puede ser adaptado eficazmente a procesos mineros, generando impactos medibles y sostenibles. La mejora obtenida no fue anecdótica ni puntual, sino estadísticamente validada, operativamente relevante y metodológicamente sólida.



VIII. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA COMPUTACIONAL

Para el desarrollo del análisis estadístico y la validación de resultados del presente estudio, se utilizó el software especializado Minitab versión 22, reconocido internacionalmente por su capacidad para aplicar herramientas estadísticas avanzadas dentro del marco metodológico Lean Six Sigma. Este sistema computacional fue clave para estructurar, ejecutar y visualizar el impacto de las mejoras implementadas en los tiempos efectivos de acarreo en minería a tajo abierto.

Funcionalidades aplicadas en Minitab 22

Durante la ejecución del ciclo DMAIC, se emplearon las siguientes herramientas estadísticas integradas en Minitab:

- Pruebas de normalidad (Anderson-Darling): para evaluar la distribución de los datos antes y después de la intervención.
- Prueba de hipótesis (Mann–Whitney U): utilizada para determinar la significancia estadística de las mejoras, dada la no normalidad de los datos posteriores.
- Gráficos de caja (Boxplot): para visualizar la dispersión, mediana y rango intercuartílico de los tiempos por grupo.
- Gráficos de valores individuales: para evidenciar la mejora en cada unidad operativa.
- Gráficos de medias con intervalo de confianza: para reforzar la separación estadística entre ambos grupos.
- Histogramas por grupo: para analizar la forma, simetría y concentración de los datos, permitiendo identificar patrones de comportamiento antes y después de la intervención.

- Estadísticas descriptivas: cálculo de medias, desviaciones estándar, rangos y medidas de tendencia central.

Justificación del uso

Minitab 22 permitió aplicar con precisión los principios estadísticos de Six Sigma, facilitando la toma de decisiones basada en evidencia cuantitativa. Su entorno gráfico y su capacidad para manejar datos operativos reales fueron fundamentales para validar la hipótesis de mejora, cumpliendo con los estándares metodológicos exigidos en estudios de ingeniería de minas.

Recursos computacionales

- Sistema operativo: Windows 10 Pro
- Software principal: Minitab 22
- Complementos: Microsoft Excel para la organización inicial de datos

IX. CONCLUSIONES

1. Se diagnosticó el proceso de acarreo en una operación minera del sur del Perú, identificando factores críticos como tiempos de espera, falta de estandarización y ausencia de control operativo, los cuales generaban ineficiencia en los tiempos efectivos de transporte.
2. La aplicación sistemática de Lean Six Sigma mediante el ciclo DMAIC permitió diseñar e implementar mejoras operativas que redujeron la mediana de los tiempos de acarreo de 18.5 a 14 minutos, con menor dispersión y mayor estabilidad del proceso.
3. El análisis costo-beneficio evidenció que la mejora generó ahorros operativos significativos, optimizando el uso de equipos sin necesidad de inversión en maquinaria adicional.
4. La validación estadística mediante la prueba de Mann–Whitney U (valor-p = 0.01) confirmó que la mejora obtenida fue estadísticamente significativa, respaldando la efectividad de Lean Six Sigma en contextos mineros.

X. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

- Ampliar el alcance del diagnóstico, incorporando variables como tipo de equipo, condiciones geotécnicas y turnos, para enriquecer la caracterización del proceso.
- Replicar el enfoque DMAIC en otros procesos mineros (carguío, perforación, mantenimiento), evaluando su impacto en eficiencia, seguridad y costos.
- Integrar sistemas de monitoreo en tiempo real (sensores, telemetría) para capturar datos operativos automáticamente y aplicar Lean Six Sigma de forma continua.
- Desarrollar modelos predictivos basados en inteligencia artificial para anticipar desviaciones y optimizar la toma de decisiones operativas.
- Cuantificar el impacto económico a nivel anual, proyectando el ahorro generado por la mejora en tiempos y su efecto en la rentabilidad global del proyecto.
- Implementar programas de formación interna en Lean Six Sigma, promoviendo una cultura de mejora continua entre operadores, supervisores y personal técnico.

REFERENCIAS

- Agüero Marcelo, F. J. and Ramírez Gonzales, G. (2022). Aplicación de la metodología Lean Six Sigma para reducir el tiempo improductivo en las etapas de acarreo y transporte en mina Canta [Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. In *Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC)*.
<https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/661955>
- Anchiraico Giraldo, A. L. and Rojas Oré, K. R. (2020). Optimización del sistema de acarreo y transporte en labores de preparación de las zonas de profundización mediante la metodología Six Sigma operada por la E.C.M. Zicsa en la unidad Minera Inmaculada. In *Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC)*.
https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/655408/AnchiraicoG_A.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- Arzapalo Gonzales, H. P. A. (2022). *Aplicación de modelos matemáticos para mejorar las operaciones unitarias de carguío y acarreo en una mina tajo abierto del sur del Perú* [Universidad Nacional de Ingeniería]. <http://hdl.handle.net/20.500.14076/24547>
- Baek, J. and Choi, Y. (2020). Deep neural network for predicting ore production by truck-haulage systems in open-pit mines. *Applied Sciences*, 10(3), 1083.
<https://www.mdpi.com/2076-3417/10/3/1083>
- Bazo Gonzales, J. L. and Loayza Chávez, G. M. (2021). *Aplicación de herramientas del Lean Six Sigma para generar valor en proyectos de Pequeña Minería. Proyecto Trinidad* [Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. <http://hdl.handle.net/10757/654903>
- Chilón Infante, N. B. (2021). OPTIMIZACIÓN DEL CICLO DE CARGUÍO Y ACARREO PARA EVITAR TIEMPOS MUERTOS EN TRANSPORTE DE MATERIAL EN

PROYECTOS MINEROS DE EMPRESA CONSORCIO CHAQUICOCHA SRL
[Universidad Privada del Norte]. In *Ucv*. <https://hdl.handle.net/11537/29677>

Choi, Y., Nguyen, H., Bui, X.-N. and Nguyen-Thoi, T. (2022). Optimization of haulage-truck system performance for ore production in open-pit mines using big data and machine learning-based methods. *Resources Policy*, 75(10), 25–22.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301420721005298>

Choque Pacheco, S. A. (2020). *Implementación de software minero CONTROL SENSE en sistema de carguío y acarreo para mejorar el control operacional en Mina Constancia* [Universidad Nacional de San Agustín].
<http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/10883%0Ahttp://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/4057%0Ahttp://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/8014%0Ahttp://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/6899>

Espinoza Picoy, F. W. and Carreño Rosales, J. A. (2022). *CONTROL OPERATIVO DE LOS METROS DE AVANCE POR DISPARO MEDIANTE LA METODOLOGÍA LEAN SIX SIGMA* [Pontificia Universidad Católica del Perú].
<http://hdl.handle.net/20.500.12404/24514>

Hia, S. W., Singgih, M. L. and Gurning, R. O. S. (2025). The application of lean six sigma to improve mining transportation overall vehicle effectiveness (MTOVE): a case study in mining company. *International Journal of Lean Six Sigma*, 16(1), 54–88.
<https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/ijlss-07-2023-0121/full/html>

Kumar, R. and Kumar, U. (2021). Lean Six Sigma applications in mining industry: A review. *International Journal of Lean Six Sigma*, 12(3), 456–478.
<https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/IJLSS-05-2020-0068/full/html>

- Lee, J. and Park, Y. (2022). Optimization of truck dispatching in open-pit mines using simulation and machine learning. *International Journal of Mining Science and Technology*, 32(4), 567–575.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2095268621001234>
- Moradi Afrapoli, M. and Osanloo, M. (2020). A simulation-based optimization approach for truck-shovel allocation problem in open-pit mines. *Journal of Mining Science*, 56(1), 1–13. <https://link.springer.com/article/10.1134/S1062739120010015>
- Pauca Mantilla, M. D. (2019). *Selección Y Reemplazo De Equipo De Acarreo Para Optimizar Tiempos Y Reducir Costos Operativos - Mina Parcoy Consorcio Minero Horizonte - Jjd Contratistas S.a.C.* [Universidad Nacional de San Agustín].
<http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/8672%0Ahttp://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/8672/MIpamamd.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Pineda Estrada, R. R. (2023). *Implementación de la metodología Lean Six Sigma para el cumplimiento de las metas de producción en minería* [Universidad Nacional de Ingeniería]. <http://hdl.handle.net/20.500.14076/27015>
- Singh, R. and Jain, V. (2024). Implementing Lean Six Sigma in mining operations: Challenges and benefits. *Resources Policy*, 7(9), 102–934.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301420723001234>
- Valenzuela Barreto, J. (2022). *Gestión del ciclo de acarreo para optimizar la productividad operacional del tajo Ferrobamba del proyecto minero Las Bambas, 2016* [Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac].
<http://repositorio.unamba.edu.pe/handle/UNAMBA/1084>
- Xu, C., Chen, G., Lu, H., Zhang, Q., Liu, Z. and Bian, J. (2024). Integrated Optimization of

Production Scheduling and Haulage Route Planning in Open-Pit Mines. *Mathematics*, 12(13), 20–70. <https://www.mdpi.com/2227-7390/12/13/2070>

Zhang, Y. and Goh, M. (2021). A review of machine learning in supply chain management: Applications and challenges. *Computers & Industrial Engineering*, 15(4), 107–130. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360835220307630>



GLOSARIO DE TÉRMINOS

Acarreo

Proceso de transporte de material (mineral o desmonte) desde el frente de operación hasta zonas de descarga, chancado o botaderos, utilizando equipos de gran capacidad como camiones mineros.

Ciclo de acarreo

Conjunto de etapas que siguen los camiones en cada viaje: carguío, traslado, descarga y retorno. Su duración es un indicador clave de productividad en minería a tajo abierto.

DMAIC

Metodología estructurada utilizada en Lean Six Sigma que comprende cinco fases: Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar, orientadas a la identificación y solución de problemas en procesos.

Eficiencia operativa

Capacidad de una operación minera para aprovechar al máximo sus recursos (equipos, tiempo, personal y energía) con el fin de alcanzar los objetivos de producción con menores pérdidas.

Indicadores clave de desempeño (KPI)

Medidas cuantitativas que permiten evaluar el rendimiento de un proceso. En minería de acarreo suelen incluir el tiempo de ciclo, la disponibilidad de equipos, el consumo de combustible y la productividad por turno.

Lean Manufacturing (Lean)

Enfoque de gestión que busca eliminar actividades que no agregan valor, optimizando el flujo de trabajo y reduciendo desperdicios en los procesos productivos.

Lean Six Sigma

Metodología de mejora continua que integra los principios Lean y Six Sigma, con el objetivo de reducir desperdicios, minimizar la variabilidad y aumentar la calidad y eficiencia de los procesos.

Mantenimiento preventivo

Conjunto de actividades planificadas para preservar el buen estado de los equipos antes de que ocurran fallas, prolongando su vida útil y evitando paradas inesperadas.

Mantenimiento correctivo

Acciones realizadas después de que se presenta una falla en los equipos, con el fin de devolverles su condición de operatividad.

Six Sigma

Metodología de mejora que emplea técnicas estadísticas para reducir la variabilidad en los procesos y asegurar resultados más consistentes y predecibles.

Tiempo de ciclo

Duración total de un viaje de acarreo, desde la carga hasta el retorno del camión. Es un indicador determinante para evaluar la eficiencia del transporte en minería.

Tiempo improductivo

Períodos en los que los equipos se encuentran detenidos o sin realizar actividades de valor, lo que genera pérdidas en la operación.

Utilización de flota

Grado de aprovechamiento real de los camiones disponibles respecto al tiempo total programado de operación

