

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería de Minas

**FACTORES OPERACIONALES QUE INFLUYEN EN LA
DISPONIBILIDAD MECÁNICA DE LOS EQUIPOS DE
CARGUÍO Y ACARREO EN LA MINERÍA A CIELO
ABIERTO, PERÚ – 2025**

TESIS

Presentada por:

Bach. HENRY ANDREE SANCHEZ PINELO

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO DE MINAS

TACNA – PERÚ

2026

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

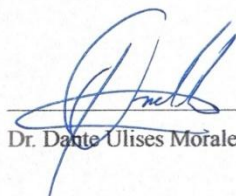
Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería de Minas

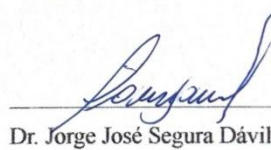
**FACTORES OPERACIONALES QUE INFLUYEN EN LA
DISPONIBILIDAD MECÁNICA DE LOS EQUIPOS DE
CARGUÍO Y ACARREO EN LA MINERÍA A CIELO
ABIERTO, PERÚ – 2025**

Tesis sustentada y aprobada el 22 de abril del 2026, estando el jurado calificador integrado por:

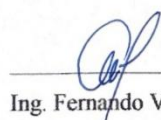
PRESIDENTE:


Dr. Dante Ulises Morales Cabrera

1er MIEMBRO:


Dr. Jorge José Segura Dávila

2do MIEMBRO:


Ing. Fernando Velázquez Díaz

ASESOR:


Dr. Jorge José Segura Dávila

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, Dr. Jorge José Segura Dávila, en mi condición de asesor acreditado por la Resolución de Facultad N° 10029 de la tesis titulada:

“Factores operacionales que influyen en la disponibilidad mecánica de los equipos de carguío y acarreo en la minería a cielo abierto, Perú - 2025”, presentada por el Bachiller Henry Andree Sanchez Pinelo con código N° 2019-101046, para optar título profesional de Ingeniero de Minas.

Que, habiendo cumplido con lo establecido en el reglamento de originalidad y de similitud de trabajo de investigación y producción intelectual, considerando que según la revisión, evaluación y análisis realizado a través del **software de similitud textual TURNITIN** cuenta con el **nivel de similitud permitido cuyo porcentaje es 5 %** Por lo que, **CERTIFICO LA SIMILARIDAD** de la tesis enunciada líneas arriba, la cual está expedita para continuar con los trámites para la obtención de título profesional, según corresponda consiguientemente la publicación en el repositorio institucional.

Tacna, 07 de mayo del 2026



FIRMA ASESOR

Nombres y apellidos: Jorge José Segura Dávila

ORCID: 0009-0005-4711-6371

DNI: 00505290



Huella digital



FIRMA TESISTA

Nombres y apellidos: Henry Andree Sanchez Pinelo

DNI: 71779548



Huella digital

DEDICATORIA

A mis padres, por su amor incondicional, esfuerzo y sacrificio, que han sido el motor que me impulsa a seguir adelante.

A mis hermanos, por su compañía, apoyo y constante aliento en cada etapa de mi vida.

A mis familiares, por sus palabras de ánimo y por compartir conmigo cada logro alcanzado.

Y a mi novia, por su comprensión, paciencia y por ser una fuente constante de motivación en este camino.

A todos ellos, les dedico con cariño este logro que también les pertenece.

AGRADECIMIENTOS

A los docentes de mi alma máter, la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, por su dedicación, enseñanza y compromiso con la formación de profesionales íntegros.

De manera especial, expreso mi más sincero agradecimiento al Dr. Jorge Segura Dávila, por su orientación, apoyo y valiosos aportes durante el desarrollo de esta tesis, los cuales fueron fundamentales para su culminación exitosa.

Asimismo, a mi familia y pareja por su constante respaldo y motivación que me permitieron alcanzar esta meta personal y profesional.

ÍNDICE

DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTOS.....	v
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
RESUMEN	xiv
ABSTRACT	xv
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA	3
1.1. Antecedentes.....	3
1.2. Descripción del problema	4
1.3. Formulación del problema	4
1.3.1. Problema general	4
1.3.2. Problemas específicos.....	4
1.4. Objetivos.....	5
1.4.1. Objetivo general	5
1.4.2. Objetivos específicos.....	5
1.5. Justificación e importancia de la investigación	5
1.6. Limitaciones.....	7
1.7. Viabilidad.....	7

1.8.	Línea de investigación	7
1.9.	Formulación hipótesis.....	8
1.9.1.	Hipótesis general	8
1.9.2.	Hipótesis específicas.....	8
1.10.	Variables	8
1.11.	Operacionalización de las variables	10
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO		11
2.1.	Antecedentes del trabajo de investigación.....	11
2.2.	Bases teóricas sobre el trabajo de investigación	13
2.2.1.	La minería a cielo abierto	13
2.2.2.	Proceso de carguío.....	14
2.2.3.	Factores operacionales en el proceso de carguío y acarreo	15
2.2.4.	Disponibilidad mecánica	16
2.3.	Definición de términos.....	17
CAPÍTULO III MARCO METODOLÓGICO.....		19
3.1.	Planteamiento metodológico.....	19
3.2.	Población y muestra.....	20
3.3.	Equipos y materiales	20
3.4.	Procedimientos.....	21
3.5.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	21
3.6.	Técnicas para el procesamiento y análisis de los datos	21
3.6.1.	Prueba de Hipótesis	22

CAPÍTULO IV RESULTADOS	25
4.1. Presentación y análisis de resultados	25
4.1.1. Descripción del proceso.....	25
4.1.2. Variable disponibilidad mecánica.....	26
4.1.3. Variable factores operacionales	44
4.2. Contrastación de las hipótesis.....	54
4.2.1. Prueba de normalidad	54
4.2.2. Influencia de las horas de mantenimiento preventivo en la disponibilidad mecánica de los equipos de carguío y acarreo en la minería a cielo abierto	56
4.2.3. Influencia de las horas de mantenimiento no programado en la disponibilidad mecánica de los equipos de carguío y acarreo en la minería a cielo abierto	60
4.2.4. Influencia del factor de llenado en la disponibilidad mecánica de los equipos de carguío y acarreo en la minería a cielo abierto	64
CAPÍTULO V DISCUSIÓN	68
5.1. Discusión de resultados obtenidos.....	68
5.2. Contraste con trabajos de investigación similares	68
CONCLUSIONES.....	71
RECOMENDACIONES	72
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74
ANEXOS.....	78

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Operacionalización de las variables.....	10
Tabla 2 Disponibilidad mecánica equipos carguío y acarreo Toquepala.....	27
Tabla 3 Causas que influyen en la disponibilidad mecánica del volquete 31 Toquepala - 2024	28
Tabla 4 Causas que influyen en la disponibilidad mecánica de la pala Toquepala – 202430	
Tabla 5 Causas que influyen en la disponibilidad mecánica del cargador Toquepala – 2024	33
Tabla 6 Disponibilidad mecánica equipos carguío y acarreo Cuajone 2024	35
Tabla 7 Causas que influyen en la disponibilidad mecánica del volquete 163 Cuajone 2024	37
Tabla 8 Causas que influyen en la disponibilidad mecánica de la Pala Cuajone 2024 ..	40
Tabla 9 Causas que influyen en la disponibilidad mecánica del cargador Cuajone 202443	
Tabla 10 Horas de mantenimiento preventivo equipos carguío y acarreo Toquepala 202445	
Tabla 11 Horas de mantenimiento no programados equipos carguío y acarreo Toquepala 2024	47
Tabla 12 Factor de llenado de los equipos carguío y acarreo Toquepala 2024	48
Tabla 13 Horas de mantenimiento preventivo de los equipos carguío y acarreo Cuajone 2024	50
Tabla 14 Horas de mantenimiento no programado de los equipos carguío y acarreo Cuajone 2024.....	51
Tabla 15 Factor de llenado de los equipos carguío y acarreo Cuajone 2024.....	53
Tabla 16 Prueba de normalidad variables de minera Toquepala	54
Tabla 17 Prueba de normalidad variables de minera Cuajone.....	55

Tabla 18 Prueba Tau-b de Kendall para la disponibilidad mecánica y horas de mantenimiento preventivo Volquete Toquepala	56
Tabla 19 Prueba Tau-b de Kendall para la disponibilidad mecánica y horas de mantenimiento preventivo Pala Toquepala.....	57
Tabla 20 Prueba Tau-b de Kendall para la disponibilidad mecánica y horas de mantenimiento preventivo cargador Toquepala.....	57
Tabla 21 Prueba Tau-b de Kendall para la disponibilidad mecánica y horas de mantenimiento preventivo volquete Cuajone	58
Tabla 22 Prueba Tau-b de Kendall para la disponibilidad mecánica y horas de mantenimiento preventivo Pala Cuajone.....	59
Tabla 23 Prueba Tau-b de Kendall para la disponibilidad mecánica y horas de mantenimiento preventivo cargador Cuajone.....	59
Tabla 24 Prueba Tau-b de Kendall para la disponibilidad mecánica y horas de mantenimiento no programado volquete Toquepala.....	60
Tabla 25 Prueba Tau-b de Kendall para la disponibilidad mecánica y horas de mantenimiento no programado pala Toquepala.....	61
Tabla 26 Prueba Tau-b de Kendall para la disponibilidad mecánica y horas de mantenimiento no programado cargador Toquepala	61
Tabla 27 Prueba Tau-b de Kendall para la disponibilidad mecánica y horas de mantenimiento no programado volquete Cuajone.....	62
Tabla 28 Prueba Tau-b de Kendall para la disponibilidad mecánica y horas de mantenimiento no programado pala Cuajone.....	63
Tabla 29 Prueba Tau-b de Kendall para la disponibilidad mecánica y horas de mantenimiento no programado cargador Cuajone.....	63

Tabla 30 Prueba Tau-b de Kendall para la disponibilidad mecánica y el factor de llenado volquete Toquepala	64
Tabla 31 Prueba Tau-b de Kendall para la disponibilidad mecánica y el factor de llenado pala Toquepala	65
Tabla 32 Prueba r Pearson para la disponibilidad mecánica y el factor de llenado cargador Toquepala.....	65
Tabla 33 Prueba Tau-b de Kendall para la disponibilidad mecánica y el factor de llenado volquete Cuajone	66
Tabla 34 Prueba Tau-b de Kendall para la disponibilidad mecánica y el factor de llenado pala Cuajone	66
Tabla 35 Prueba Tau-b de Kendall para la disponibilidad mecánica y el factor de llenado cargador Cuajone.....	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Disponibilidad mecánica volquete 31 Toquepala 2024.....	28
Figura 2 Jerarquización de causas que influyen en la DM del Volquete – Toquepala 2024	29
Figura 3 Disponibilidad mecánica del Pala Toquepala 2024	30
Figura 4 Jerarquización de causas que influyen en la DM de la pala S-04 Toquepala 2024	31
Figura 5 Disponibilidad mecánica del cargador - Toquepala 2024	32
Figura 6 Jerarquización de causas que influyen en la DM del cargador Toquepala 202434	
Figura 7 Disponibilidad mecánica del volquete Cuajone 2024.....	36
Figura 8 Jerarquización de causas que influyen en la DM del volquete 163 Cuajone 2024	38
Figura 9 Disponibilidad mecánica de la pala Cuajone 2024	39
Figura 10 Jerarquización de causas que influyen en la DM de la pala Cuajone 2024 ..	41
Figura 11 Disponibilidad mecánica del cargador- Cuajone 2024.....	42
Figura 12 Jerarquización de causas que influyen en la DM del cargador Cuajone 202444	
Figura 13 Horas de mantenimiento preventivo entre los equipos de carguío y acarreo Toquepala 2024.....	46
Figura 14 Horas de mantenimiento no programado entre los equipos de carguío y acarreo Toquepala 2024.....	48
Figura 15 Factor de llenado entre los equipos de carguío y acarreo Toquepala 2024....	49
Figura 16 Horas de mantenimiento preventivo entre los equipos de carguío y acarreo Cuajone 2024.....	51

Figura 17 Horas de mantenimiento no programado entre los equipos de carguío y acarreo Cuajone 2024.....	52
Figura 18 Factor de llenado entre los equipos de carguío y acarreo Cuajone 2024	53

RESUMEN

En esta investigación se tuvo como objetivo determinar los factores operacionales que influyen en la disponibilidad mecánica de los equipos de carguío y acarreo en la minería a cielo abierto, Perú - 2025. Se abordó una metodología de proceso cuantitativo, con diseño no experimental, nivel correlacional y de corte transeccional. Como unidad de análisis se tomaron los equipos volquete, pala y cargador de ruedas en dos unidades mineras, Toquepala en Tacna y Cuajone en Moquegua. Se tomaron registros de las horas de mantenimiento preventivo, las horas de mantenimiento no programado y el factor de llenado del período 2024. Como parte de los resultados, se obtuvo que las horas de mantenimiento preventivo influyen positivamente en la disponibilidad mecánica de los equipos de carguío y acarreo, mientras que las horas de mantenimiento no programado influyen de forma negativa en la disponibilidad mecánica, mientras que, no se encontró influencia del factor de llenado en la disponibilidad mecánica de los equipos. Se concluye que los factores operacionales que influyen en la disponibilidad mecánica, son las horas de mantenimiento preventivo y las de mantenimiento no programado de los equipos de carguío y acarreo en minería a cielo abierto Toquepala y Cuajone 2024.

Palabras claves: disponibilidad mecánica, horas de mantenimiento, factor de llenado.

ABSTRACT

In this research, the objective was to determine the operational factors that influence the mechanical availability of loading and hauling equipment in open-pit mining, Peru – 2025. A quantitative process methodology was applied, with a non-experimental design, correlational level, and cross-sectional approach. The units of analysis included dump trucks, shovels, and wheel loaders from two mining operations: Toquepala in Tacna and Cuajone in Moquegua. Records were taken of preventive maintenance hours, unscheduled maintenance hours, and the fill factor for the year 2024. As part of the results, it was found that preventive maintenance hours have a positive influence on the mechanical availability of loading and hauling equipment, while unscheduled maintenance hours have a negative influence. No significant influence of the fill factor on the mechanical availability of the equipment was observed. It is concluded that the operational factors influencing mechanical availability are the preventive and unscheduled maintenance hours of loading and hauling equipment in the Toquepala and Cuajone open-pit mining operations during 2024.

Keywords: mechanical availability, maintenance hours, filling factor.

INTRODUCCIÓN

La minería a cielo abierto representa una actividad económica fundamental en el Perú, ya que es responsable de una parte significativa de las exportaciones nacionales y, por ende, del producto interno bruto. Este tipo de proceso, integra equipos de carguío y acarreo como palas, cargadores frontales y volquetes, representan los principales elementos del sistema productivo, cuya eficiencia depende en gran medida de su disponibilidad mecánica. La continuidad operativa de estos equipos es esencial para asegurar que se logren todos los objetivos productivos y se optimicen los costos mineros.

En este contexto, la gestión del mantenimiento adquiere un rol estratégico, ya que permite asegurar la operatividad de los equipos y reducir los tiempos de inactividad. Factores operacionales como las horas de mantenimiento preventivo, las horas de mantenimiento no programado, las condiciones de operación y el factor de llenado influyen directamente en la disponibilidad mecánica. Por ello, se surge como necesidad, la identificación y análisis de los factores operacionales con mayor impacto, a fin de establecer estrategias técnicas que mejoren equipos más confiables y con mayor rendimiento en las faenas mineras.

La presente investigación tiene como objetivo determinar los factores operacionales que influyen en la disponibilidad mecánica de los equipos de carguío y acarreo en la minería a cielo abierto, Perú – 2025, considerando los casos de estudio de las minas Toquepala y Cuajone. El estudio se centra particularmente en los equipos de tipo volquete, pala y cargador, evaluando su comportamiento operativo mediante el análisis de registros históricos y variables de mantenimiento. Los resultados permitirán proponer lineamientos orientados a la mejora continua de la gestión del mantenimiento, contribuyendo a la eficiencia productiva y sostenibilidad de las operaciones mineras del país.

La investigación se estructuró en cinco (5) capítulos principales: el capítulo (i) que abarcó el planteamiento del problema, el capítulo (ii) que conformó el marco teórico, capítulo (iii) que comprendió el marco metodológico, capítulo (iv) contiene los resultados y el capítulo (v) presenta la discusión de los resultados.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA

1.1. Antecedentes

A lo largo de la historia, la minería ha desempeñado un papel clave en el desarrollo socioeconómico de numerosos países, impactando de manera directa en indicadores como el crecimiento del Producto Interno Bruto (PIB). Esta industria representa actualmente el 14,6% del PIB a nivel mundial (Cardemil, 2023). En el Perú, la minera juega un rol levante en el desarrollo económico, principalmente por su contribución a las exportaciones y la recaudación fiscal. Es así que, en las últimas décadas, se han generado divisas en un promedio representativo del 60% de las exportaciones del país (Cipriano et al., 2024).

Dada esta importancia, para mantener las operaciones del sector de una forma eficiente, se hace imperativo la integración de estrategias que aseguren un mantenimiento adecuado de los sistemas operativos y permita salvaguardar la integridad de los trabajadores (López, 2024).

No obstante, el sector minero sigue presentando muchos desafíos, entre ellos, los relacionados con el proceso de carguío y acarreo, en el cual es crucial la gestión de los factores operativos como los tiempos de ciclo, el factor de llenado, las horas de mantenimiento de los equipos, entre otros, para evitar retrasos y reducir costos operativos (Rojas y Zúñiga, 2022). En este contexto, es pertinente garantizar un rendimiento óptimo de los equipos y del personal involucrado, conlleva a crear un entorno operativo adecuado que incluya materiales, equipos, mantenimiento, disponibilidad de los quipos y maquinaria (Enkhchuluun et al, 2023).

Las empresas mineras para mantener sus equipos en funcionamiento aplicando un mantenimiento, se enfrentan a múltiples obstáculos, como son las condiciones de estrés por la exposición a polvo, temperaturas altas y vibraciones, ambiente hostil que aumenta el proceso de desgaste, provocando fallas frecuentes, las cuales generan un efecto en cadena, afectando el correcto desarrollo de las operaciones y por consiguiente, el rendimiento productivo. Así mismo, la falta de planificación y estrategias de mantenimiento preventivo diverge en acciones correctivas, las cuales se realizan únicamente cuando los problemas ya se han presentado, afectando la disponibilidad de los equipos. Este tipo de enfoque suele implicar mayores costos y generar interrupciones innecesarias en las operaciones (López, 2024).

1.2. Descripción del problema

Las unidades de negocio de la minería a cielo abierto, como las ubicadas en las regiones de Tacna y Moquegua, es común observar en las operaciones de carguío y acarreo, frecuentes ocurrencias de fallas mecánicas en los equipos, lo cual genera una reducción en el indicador de disponibilidad mecánica. Esta situación está impactando negativamente la sostenibilidad de las operaciones causando retrasos en los ciclos de producción y elevando los costos.

1.3. Formulación del problema

1.3.1. Problema general

¿Cuáles son los factores operacionales que influyen en la disponibilidad mecánica de los equipos de carguío y acarreo en la minería a cielo abierto, Perú - 2025?

1.3.2. Problemas específicos

- ¿Las horas de mantenimiento preventivo influyen en la disponibilidad mecánica de los equipos de carguío y acarreo en la minería a cielo abierto, Perú - 2025?

- ¿Las horas de mantenimiento no programado influyen en la disponibilidad mecánica de los equipos de carguío y acarreo en la minería a cielo abierto, Perú - 2025?
- ¿El factor de llenado en el carguío influye en la disponibilidad mecánica de los equipos de carguío y acarreo en la minería a cielo abierto, Perú - 2025?

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Determinar los factores operacionales que influyen en la disponibilidad mecánica de los equipos de carguío y acarreo en la minería a cielo abierto, Perú - 2025.

1.4.2. Objetivos específicos

- Determinar si las horas de mantenimiento preventivo influyen en la disponibilidad mecánica de los equipos de carguío y acarreo en la minería a cielo abierto, Perú - 2025.
- Determinar si las horas de mantenimiento no programado influyen en la disponibilidad mecánica de los equipos de carguío en la minería a cielo abierto, Perú - 2025.
- Determinar si el factor de llenado en el carguío influye en la disponibilidad mecánica de los equipos de carguío y acarreo en la minería a cielo abierto, Perú - 2025.

1.5. Justificación e importancia de la investigación

Teóricamente, el estudio se fundamenta en la relevancia que tiene el indicador de disponibilidad mecánica en el desempeño de la gestión de mantenimiento en las operaciones mineras. Se ha identificado que la productividad en los procesos de carguío y acarreo está estrechamente relacionada con variables operacionales como los tiempos de ciclo, las prácticas de mantenimiento, la capacitación del operador y las condiciones del terreno. En este sentido, la presente investigación generará resultados que aportaran al desarrollo de

modelos analíticos y marcos conceptuales que permitan comprender mejor la relación entre los factores operativos y el desempeño mecánico de los equipos.

En el ámbito práctico, esta tesis proporcionará información valiosa para el mejoramiento de la gestión operativa en la minería a cielo abierto del Perú. Con la identificación y precisión de los factores que más influyen en la disponibilidad mecánica, se podrán implementar estrategias correctivas y preventivas más eficaces, reducir los tiempos de inactividad no planificada y optimizar el uso de recursos técnicos y humanos. Los resultados serán útiles tanto para el área de mantenimiento como para operaciones, permitiendo una toma de decisiones basada en datos reales y específicos del entorno minero de Moquegua y Tacna.

La justificación económica redunda en que, lograr un aumento en la disponibilidad de los equipos de carguío y acarreo puede significar una disminución importante en los costos operativos y un incremento en la productividad global de las unidades mineras. Equipos que permanecen operativos por más tiempo permiten aumentar el ritmo de extracción y reducir el costo por tonelada movida. Asimismo, una mejor planificación de mantenimiento evita gastos imprevistos en repuestos, servicios de emergencia y paradas prolongadas. En este sentido, esta investigación aporta a la eficiencia económica del proyecto minero, contribuyendo a su sostenibilidad y competitividad.

Metodológicamente, el estudio permitirá aplicar un enfoque cuantitativo-descriptivo con posible correlación, que se apoya en el análisis de datos operacionales reales de la flota minera. Se utilizarán herramientas estadísticas y datos de los históricos de la gestión de mantenimiento, lo que permitirá un análisis correlacional en contextos reales de operación minera. Además, este estudio puede servir como base metodológica para futuras investigaciones en otras unidades mineras, consolidando un modelo replicable de análisis operativo.

1.6. Limitaciones

En cuanto a las limitaciones, la investigación se limita a analizar los factores operacionales relacionados con las horas de mantenimiento ya sea preventivo y no programado, así como los datos de factor de llenado y las horas de operación para el análisis de la disponibilidad mecánica de los equipos de carguío y acarreo durante el último año de operación. El estudio se llevó a cabo en los equipos de dos mineras a cielo abierto ubicadas en Moquegua y Tacna. Se procesaron datos de aproximadamente un año de operación de los equipos del proceso de carguío y acarreo.

1.7. Viabilidad

La investigación es viable ya que se cuenta con el acceso a información de dos empresas de minera a cielo abierto a través del apoyo de los jefes, técnicos y operarios de las áreas involucradas para la obtención de información relacionada con los mantenimientos de los equipos de carguío y acarreo. Así mismo, no requiere de inversión económica significativa que limite el desarrollo y, por último, es viable a nivel operacional y de gestión al permitir analizar la correlación que pueda existir entre los factores operacionales y la disponibilidad mecánica de los equipos de carguío y acarreo para la toma de decisiones estratégicas en el área de mantenimiento.

1.8. Línea de investigación

Esta investigación se enmarca dentro de la línea de investigación “Ingeniería y Tecnología para el desarrollo regional”, puesto que se trata de un estudio práctico donde se aplican los conocimientos y bases de ingeniería para contribuir con el desarrollo de procesos y productos, con foco en mantener el desarrollo sostenible de la región.

Particularmente, en este estudio se aborda una problemática operativa clave del sector minero, uno de los principales motores económicos y sociales del país, lo cual se sustenta en

la aplicación de principios de ingeniería minera, mecánica y de mantenimiento, orientados a identificar y analizar los factores operacionales que afectan la disponibilidad mecánica de los equipos de carguío y acarreo. Estos equipos son esenciales para la continuidad operativa, la productividad y la seguridad en las operaciones de minería a cielo abierto, por lo que su gestión eficiente resulta determinante para el desempeño técnico y económico de las unidades mineras.

1.9. Formulación hipótesis

1.9.1. Hipótesis general

Existen factores operaciones que influyen en la disponibilidad mecánica de los equipos de carguío y acarreo en la minería a cielo abierto, Perú - 2025.

1.9.2. Hipótesis específicas

- Las horas de mantenimiento preventivo influyen significativamente en la disponibilidad mecánica de los equipos de carguío y acarreo en la minería a cielo abierto, Perú - 2025.
- Las horas de mantenimiento no programado influyen significativamente en la disponibilidad mecánica de los equipos de carguío y acarreo en la minería a cielo abierto, Perú - 2025.
- El factor de llenado en el carguío influye significativamente en la disponibilidad mecánica de los equipos de carguío y acarreo en la minería a cielo abierto, Perú - 2025.

1.10. Variables

➤ Variable independiente: Factores operacionales en el carguío y acarreo

Definición conceptual: Quiñonez y Barreto (2024) señalan que entre los factores operaciones del carguío y acarreo de mineral, se tienen los costos de acarreo,

capacidad efectiva, la granulometría y densidad del material, horas efectivas, tonelaje transportado, otros autores como Ames y Castilla (2021) incluyen el mantenimiento, las reservas y las demoras. Monzón (2021) por su parte, considera el factor de llenado del cucharón del cargador, los mantenimientos de los equipos y la gestión de los tiempos.

Definición operacional: para esta investigación se tomará en cuenta como factores operacionales, el factor de llenado, las horas de mantenimiento preventivo y las horas de mantenimiento no programado.

➤ **Variable dependiente: Disponibilidad mecánica**

Definición conceptual: La disponibilidad de un equipo o sistema representa una métrica que indica el tiempo durante el cual dicho equipo o sistema permanece en funcionamiento, en relación con el tiempo total en que se espera que opere. Generalmente, esta medida se expresa como un porcentaje (Alavedra-Flores et al., 2016).

Definición operacional: la disponibilidad de un equipo se puede medir conociendo el tiempo de operación y el tiempo de mantenimiento.

1.11. Operacionalización de las variables

Tabla 1

Operacionalización de las variables

Variable	Definición operacional	Dimensión	Indicador	Escala
Variable independiente: Factores operacionales en carguío y acarreo	Se consideran los parámetros relacionados con la operación de las palas y camiones de volteo que incluyen tiempos de mantenimiento, factor de llenado, entre otros.	Factor de llenado Mantenimiento	Eficiencia (m ³) • Tiempo de mantenimientos preventivos (horas) • Tiempo de mantenimientos no programados (horas)	De razón
Variable dependiente: Disponibilidad mecánica	Puede ser medida conocimiento los tiempos de operación y los tiempos de mantenimiento (reparación) del equipo.	%Disponibilidad	• Tiempo total de operación (horas) • Tiempo total de reparaciones (horas)	De razón

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del trabajo de investigación

Isnaeni et al. (2022) llevaron a cabo una investigación en la que estudiaron el esfuerzo para alcanzar la meta de disponibilidad mecánica y disponibilidad física del equipo de carga excavadora Doosan 500 LCV en PT XYZ. La metodología fue de tipo observacional y cuantitativa. Recolectaron información sobre los mantenimientos de la maquinaria, horas de operación y las horas de fallas. Con base en los resultados de la investigación realizada en abril de 2022, se concluyó que la disponibilidad mecánica y la disponibilidad física no cumplieron con el plan objetivo, donde el valor de disponibilidad mecánica en abril fue del 74% y el valor de disponibilidad física fue del 79%. Mientras tanto, el valor que se pretende alcanzar en PT XYZ es del 83% para disponibilidad mecánica y del 90% para disponibilidad física. Se concluyó que los resultados se debieron a un alto número de horas de averías no programadas, retrasos en la entrega de repuestos, procesos de reparación lentos, mantenimiento preventivo deficiente, demoras durante el reabastecimiento de combustible y deterioro de las vías.

Kumar et al. (2022) realizaron un estudio en el que analizaron la confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad (RAM) del sistema de pala y volcado en una mina de piedra caliza a cielo abierto. En este estudio, se examinaron de manera gráfica y estadística los datos de fallas y reparaciones de un conjunto conformado por una pala (ME1) y un volquete (ME2) para evaluar su desempeño RAM. Se aplicaron métodos gráficos, incluyendo pruebas de tendencia y pruebas de correlación serial, para validar la independencia y distribución idéntica (IID) de sus tiempos medios entre fallas (MTBF) y tiempos medios de reparación (MTTR). Desde el punto de vista estadístico, la distribución de Weibull fue identificada

como la que mejor se ajusta a los datos, según las pruebas de Kolmogórov-Smirnov (K-S). Los resultados indicaron que la confiabilidad para ME1 y ME2 fue de 0.348 y 0.292, respectivamente, en un MTBF específico. Además, mediante un mantenimiento preventivo adecuado, se puede alcanzar una confiabilidad del 70% y 80% para distintos intervalos de tiempo.

Huillcas y Rojas (2025) efectuaron una investigación en la cual determinaron la influencia de las variables operacionales en la pérdida de tiempo efectivo en equipos de acarreo para la mejora del rendimiento operacional de la empresa MCEISA, 2024. Se empleó un método inductivo-deductivo para examinar las diversas actividades operativas que impactan en la reducción del tiempo efectivo en las actividades de carguío y acarreo. Se analizaron 3 equipos de carguío, con cucharones de capacidad de 4.2 yd³, así como 12 equipos de acarreo Volvo FMX con una capacidad de 12 m³ cada uno. Entre ambos periodos, la disminución del tiempo operativo en las actividades identificadas fue de 444.62 horas. Las principales causas de esta reducción fueron la falta de operadores y el mantenimiento de las vías, problemas que fueron corregidos. En cuanto a las actividades relacionadas directamente con los procesos de acarreo (utilizando volquetes Volvo de 12 m³), se registraron pérdidas de tiempo operativo de 12,450.03 horas en el periodo inicial (julio y agosto), las cuales aumentaron a 16,063.07 horas durante el periodo mejorado (septiembre y octubre).

Monzón (2021) llevó a cabo la investigación donde se identificaron y caracterizaron los factores que afectan la disponibilidad mecánica en los equipos de transporte de material en la E.C.M. CODEJE SAC. La metodología desarrollada fue cuantitativa, no experimental con nivel correlacional. Se consideraron como factores operacionales asociados con la disponibilidad, el factor de llenado de la tolva de los equipos de acarreo, mal estado de las vías, programa de mantenimiento deficiente. Con relación al factor de llenado, los registros durante los turnos de días, mostraron una distribución máxima del 19%, con un rango que

oscila entre el 97% y el 104%. Por su parte, en el turno nocturno, la distribución máxima fue del 18.5%, con un intervalo comprendido entre el 94% y el 103.8%, siendo este último superior al estándar de la empresa. En el análisis del mantenimiento preventivo, la mayoría de los equipos de transporte no alcanzaron las horas establecidas para realizar el mantenimiento. No obstante, los equipos 11 (525), 14 (528), 15 (529) y 16 (530) excedieron las 500 horas máximas de operación permitidas. El estudio concluye que varios factores afectan la disponibilidad mecánica de los equipos de acarreo, lo que resulta en pérdidas de tiempo, una reducción en la productividad y la generación de costos adicionales innecesarios.

2.2. Bases teóricas sobre el trabajo de investigación

2.2.1. La minería a cielo abierto

La minería que se desarrolla a cielo abierto, representa un método extractivo mediante el cual se retiran grandes capas de tierra y roca con el propósito de alcanzar los yacimientos de minerales o metales. Se diferencia de la minería subterránea, la cual accede a los depósitos a través de túneles y galerías, al realizar amplias excavaciones superficiales denominadas tajos o canteras. Este método se emplea con frecuencia para la extracción de recursos como el carbón, el cobre, el oro, el hierro y la bauxita. Asimismo, se aplica de manera extendida en la obtención de materiales de construcción, entre ellos la piedra caliza y el granito (Yanacocha, 2024).

Debido a sus características, la minería a cielo abierto demanda el traslado desde el tajo de grandes o medianas cantidades de mineral y material estéril, normalmente a través de trayectos extensos y con fuertes inclinaciones. El ciclo de minado o de operación se describe a continuación (Seguridad Minera, 2013):

- **Descapote.** Este método se utiliza para retirar la capa superficial estéril del yacimiento y eliminar la ganga presente dentro de los límites del tajo. Las características del material de cobertura o estéril determinan el tipo de operación: si se trata de material no consolidado, como suelo o roca fragmentada, no es necesario el proceso de rompimiento; en cambio, si el material está consolidado (roca in situ), se requiere su fractura previa. Esta operación por lo general abarca: la barrenación, donde se emplean equipos de perforación según el tipo de roca, así, para roca débil se emplea perforadora, para roca promedio se utiliza sistema rotativo y para roca muy dura, se usa sistema percusivo. Luego se tiene la voladura, donde se aplican explosivos según el tipo de roca también, posteriormente se realiza la excavación en la cual se usan equipos cargadores, pala mecánica, dozer, escrepa, draga y cucharón. Por último, se hace el acarreo el cual implica el uso de camión, banda transportadora, dozer y escrepa.
- **Minado.** En una mina a cielo abierto, las etapas de descapote, extracción y el ciclo operativo suelen presentar similitudes, las cuales dependen principalmente de las características y el grado de diferencia entre el mineral y el tepetate. El ciclo de operaciones de minado y equipo, usualmente consiste en lo siguiente: perforación, voladura, excavación y extracción.

2.2.2. Proceso de carguío

El ciclo de carguío se lleva a cabo mediante equipos que emplean como energía el diésel o la electricidad, entre los cuales se encuentran las unidades de carguío discontinuo como los cargadores, las palas y las unidades de flujo continuo como son las excavadoras de valde que efectúan la extracción del material de forma continua. Además, pueden clasificarse según su movilidad: equipos sin acarreo, cuya base permanece fija durante la operación, y equipos con acarreo limitado, que son capaces de trasladarse a cortas distancias. Como equipos que

operan sin acarreo, destacan las retroexcavadoras, las palas hidráulicas, las palas eléctricas de cable y las palas neumáticas, frecuentemente utilizadas en la minería a cielo abierto (Agencia de Sostenibilidad Energética, 2021).

El propósito del proceso de carguío y transporte es retirar el material volado del frente de trabajo y trasladarlo de manera eficiente hasta su destino final, lo que puede resumirse en la siguiente secuencia (Seguridad Minera, 2017): el acondicionamiento del área de trabajo, la distribución espacial de los equipos, el recojo de material volado desde el frente de trabajo, el trasvasado de material al equipo de traslado, el transporte y descarga de material y, el regreso del equipo de transporte al punto de carguío en caso de requerirse.

Este ciclo se repite hasta realizarse por completo extracción del material del frente de trabajo. Este proceso es considerado como uno de los factores que más influencia los costos operativos de la mina, representando entre el 45 % y el 65 % del total. Por ello, resulta esencial asegurar condiciones óptimas de operación que permitan maximizar el rendimiento de los equipos, considerando tanto los aspectos técnicos (materiales, maquinaria, mantenimiento, disponibilidad e insumos) como los aspectos humanos (operadores, técnicos de mantenimiento y supervisores de turno) (Seguridad Minera, 2017).

2.2.3. Factores operacionales en el proceso de carguío y acarreo

Factor de llenado

El factor de llenado se define como el porcentaje que representa la carga promedio en relación con la carga teórica máxima, dependiendo de las condiciones en las que se encuentre el material acumulado (Llallahui Rojas, 2016).

Este factor está determinado por el tipo de material y refleja el grado de dificultad para llenar el balde. De este modo, se ajusta la capacidad nominal del equipo de carguío, estimando la capacidad efectiva que realmente puede ser extraída. Su valor se establece según las

características específicas de cada equipo, representando el porcentaje real de llenado en relación con su capacidad nominal (Monzón, 2021). Se emplea para su cálculo la ecuación 1:

$$\%F = \frac{\text{Cantidad real transportada}}{\text{Capacidad de la maquinaria}} \quad \text{Ec. 1}$$

Ciclo de carguío



Fuente: Elaboración propia

Tiempo de mantenimiento

El tiempo de mantenimiento está referido al número de horas en que la máquina permanece detenida, ya sea por fallas o por intervenciones de mantenimiento programado. El tiempo de mantenimiento planificado incluye todas las tareas necesarias para asegurar que el equipo esté en condiciones óptimas de funcionamiento, como el agregado o cambio de aceite, reemplazo de filtros, limpieza, entre otros. Por otro lado, el tiempo fuera de operación por fallas corresponde al periodo dedicado a reparaciones necesarias para que la máquina pueda volver a operar (Llallahui Rojas, 2016).

2.2.4. Disponibilidad mecánica

La disponibilidad mecánica representa un valor porcentual que refleja la capacidad operativa de un equipo, considerando las pérdidas de tiempo ocasionadas por causas mecánicas, como

labores de mantenimiento o reparación (Isnaeni et al., 2022). Particularmente en los equipos de minas, este indicador se calcula como el tiempo programado menos el tiempo dedicado a mantenimiento, dividido entre el tiempo programado. Este tiempo de mantenimiento comprende tanto el mantenimiento planificado como las fallas del equipo, se puede emplear la ecuación 2.

$$\%DM = \frac{\text{Tiempo de operación}}{\text{Tiempo de operación} + \text{Tiempo de avería}} \quad \text{Ec. 2}$$

2.3. Definición de términos

Tiempo disponible: es el tiempo durante el cual el equipo está disponible para la producción, es decir, se encuentra a disposición del área de Operaciones Mina, como se detalla a continuación (Llallahui Rojas, 2016).

Tiempo operativo: Corresponde al tiempo en el que el equipo se encuentra en funcionamiento realizando trabajo productivo, es decir, generando toneladas, o bien cumpliendo con la función para la cual fue diseñado (Llallahui Rojas, 2016).

Mantenimiento: Sistema integrado por personal, maquinaria, tecnología, información, planificación y recursos, orientado al cumplimiento de objetivos previamente definidos, con el propósito de lograr eficiencia y eficacia según el tipo de mantenimiento aplicado (Andrade y Herrera, 2021).

Mantenimiento preventivo: El objetivo del mantenimiento preventivo es identificar y resolver problemas menores antes de que se conviertan en fallas mayores. También puede definirse como un conjunto integral de actividades llevadas a cabo por usuarios, operadores y personal de mantenimiento, con el propósito de garantizar el funcionamiento óptimo de plantas, edificios, maquinaria, equipos, vehículos, entre otros (Alavedra-Flores et al., 2016).

Mantenimiento no programado: Incluye todas las acciones reactivas realizadas por el equipo de mantenimiento ante fallas imprevistas de un equipo. Este tipo de mantenimiento suele poner en evidencia más las carencias que los recursos disponibles (Traction, 2024).

Disponibilidad: representa una medida del tiempo en que dicho equipo se encuentra en funcionamiento, en relación con el tiempo total en el que se espera que opere. Generalmente, se expresa como un porcentaje y no debe confundirse con la velocidad de respuesta (Alavedra-Flores et al., 2016).

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1. Planteamiento metodológico

De acuerdo con el enfoque, la investigación es cuantitativa ya se fundamenta en la recolección y análisis de datos de naturaleza numérica (Hernández y Mendoza, 2018). En cuanto a la finalidad, la investigación es aplicada, siendo aquella que se centra en dar respuesta a problemática concreta y de carácter práctico.

Su propósito es atender necesidades específicas de sectores como la sociedad, la industria o el ámbito público, mediante la aplicación de conocimientos obtenidos a través de investigaciones anteriores o estudios teóricos (Carrasco, 2017). En tal sentido, se orienta a determinar cuáles factores operaciones influyen significativamente en la disponibilidad mecánica de los equipos de carguío y acarreo que permita dirigir estrategias para mejorar la operación.

El diseño de la investigación es no experimental, el cual hace referencia a investigaciones donde el investigador adopta un rol observador, sin intervenir ni modificar de forma intencional las variables independientes, permitiendo que los fenómenos se desarrollen de manera natural. Este enfoque utiliza métodos y procedimientos para formular problemas o hipótesis, recolectar datos desde una realidad objetiva y verificar su validez, con el propósito de responder a las preguntas de investigación y contribuir al desarrollo de nuevas teorías o leyes (Hernández y Mendoza, 2018).

Con respecto al alcance de este diseño, la investigación es de tipo correlacional, ya que busca determinar el nivel de asociación entre dos variables que no han sido manipuladas ni controladas por el investigador (Hernández y Mendoza, 2018).

3.2. Población y muestra

La población hace referencia al conjunto completo del fenómeno estudiado, cuyas unidades comparten una característica específica que se analiza y que proporciona los datos necesarios para la investigación (Arias y Covinos, 2021). En esta investigación estuvo constituida por los equipos de carguío y acarreo de la minería a cielo abierto en Perú.

Para la muestra se seleccionará de acuerdo con un equipo por tipo, considerando aquel con mayor cantidad de fallas o de baja disponibilidad mecánica dentro del período 2024 en dos mineras diferentes, una ubicada en Tacna y otra en Moquegua, por lo cual, la muestra se convierte del tipo por conveniencia a criterio del investigador. Entre los tipos de equipos se consideraron están los siguientes:

- Una pala
- Una cargadora de ruedas LT
- Un volquete

3.3. Equipos y materiales

- Registros históricos de los equipos
- Fichas recolección de datos
- Cámara fotográfica
- Impresora
- Equipo de computo
- Cronómetro digital
- Radio de comunicación (VHF/UHF)
- Software Ms. Excel y SPSS
- Equipo de protección personal

3.4. Procedimientos

- **Planificación:** solicitud de autorización formal a las gerencias de mantenimiento y operaciones de ambas unidades. Designación de un responsable técnico en cada mina para facilitar el acceso a información.
- **Revisión de registros históricos:** extracción de los datos informáticos sobre mantenimientos de flota del año 2024. Validación de los datos y consolidación de la información en base de datos Excel.
- **Trabajo de campo:** observación durante turnos representativos de los ciclos de carguío y acarreo. Registro manual de tiempos reales de operación, tiempos muertos, y causas de parada. Verificación con supervisores la planificación y ejecución de mantenimientos preventivos y no programados. Medición del factor de llenado directamente o contrastarlo con los reportes automáticos del sistema de flota.
- **Codificación de la información:** codificación de los datos por unidad minera, tipo de equipo y mes. Generación de una matriz de datos con variables dependientes (disponibilidad mecánica) e independientes (horas preventivas, no programadas, factor de llenado).
- **Cálculos y análisis estadístico:** cálculo de la disponibilidad, descriptivos, análisis de regresión o correlación.
- **Etapas final de gabinete:** presentación y discusión de los resultados, conclusiones y recomendaciones, redacción del informe final.

3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Para la recogida de información, se empleó el análisis documental de los registros históricos de los equipos. Como instrumento, se utilizará la ficha de observación (Anexo 2).

3.6. Técnicas para el procesamiento y análisis de los datos

Se emplearon hojas de cálculo de Ms. Excel para el procesamiento de la información, donde los datos fueron agrupados y analizados por técnicas estadísticas descriptivas, utilizando medidas de tendencia central, gráficos y tablas. Para analizar las correlaciones, se empleó el software estadístico SPSS, donde se ejecutó la prueba de normalidad a los datos de las variables, con el propósito de identificar el comportamiento de los datos y decidir qué tipo de prueba utilizar.

3.6.1. Prueba de Hipótesis

3.6.1.1. Prueba de normalidad

Hipótesis de la prueba:

- Hipótesis nula (H_0): los datos analizados (variable) siguen una distribución normal.
- Hipótesis alterna (H_1): los datos analizados (variable) no siguen una distribución normal.

Parámetro de la prueba:

- Nivel de significancia (α) o p-valor: 0.05
- Nivel de probabilidad o confianza: 95%

Regla de decisión:

- Si $p\text{-valor} \geq 0.05$ entonces se acepta H_0 , los datos siguen un comportamiento normal.
- Si $p\text{-valor} < 0.05$, entonces se rechaza H_0 , los datos no siguen un comportamiento normal.
- Si los datos siguen un comportamiento normal, se aplica prueba paramétrica r de Pearson, por el contrario, si no siguen distribución normal, se aplica prueba no paramétrica tau – b de Kendall por tratarse de muestra pequeña.

3.6.1.2. Pruebas de correlación para las horas de mantenimiento preventivo y disponibilidad

Hipótesis de prueba:

- $H_0: (\tau_b = 0)$. Las horas de mantenimiento preventivo no se relacionan significativamente con la disponibilidad mecánica.
- $H_1: (\tau_b \neq 0)$. Las horas de mantenimiento preventivo se relacionan significativamente con la disponibilidad mecánica.

Parámetros de prueba:

- Nivel de significancia (α) o p-valor: 0.05
- Nivel de probabilidad o confianza: 95%
- Coeficiente de correlación: τ_b

Regla de decisión:

- Si $p \geq 0.05$, no se rechaza $H_0 \rightarrow$ no existe correlación significativa entre las horas de mantenimiento preventivo y la disponibilidad mecánica.
- Si $p < 0.05$, se rechaza $H_0 \rightarrow$ existe correlación estadísticamente significativa entre las variables.

3.6.1.3. Prueba de correlación para las horas de mantenimiento no programado y disponibilidad

Hipótesis de prueba:

- $H_0: (\tau_b = 0)$. Las horas de mantenimiento no programado no se relacionan significativamente con la disponibilidad mecánica.
- $H_1: (\tau_b \neq 0)$. Las horas de mantenimiento no programado se relacionan significativamente con la disponibilidad mecánica.

Parámetros de prueba:

- Nivel de significancia (α) o p-valor: 0.05

- Nivel de probabilidad o confianza: 95%
- Coeficiente de correlación: τ_b

Regla de decisión:

- Si $p \geq 0.05$, no se rechaza $H_0 \rightarrow$ no existe correlación significativa entre las horas de mantenimiento no programado y la disponibilidad mecánica.
- Si $p < 0.05$, se rechaza $H_0 \rightarrow$ existe correlación estadísticamente significativa.

3.6.1.4. Prueba de correlación para el factor de llenado y la disponibilidad

Hipótesis de prueba:

- $H_0: (\tau_b = 0)$. El factor de llenado no se relaciona significativamente con la disponibilidad mecánica.
- $H_1: (\tau_b \neq 0)$. El factor de llenado se relaciona significativamente con la disponibilidad mecánica.

Parámetros de prueba:

- Nivel de significancia (α) o p-valor: 0.05
- Nivel de probabilidad o confianza: 95%
- Coeficiente de correlación: τ_b

Regla de decisión:

- Si $p \geq 0.05$, no se rechaza $H_0 \rightarrow$ no existe correlación significativa.
- Si $p < 0.05$, se rechaza $H_0 \rightarrow$ existe correlación estadísticamente significativa.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.1. Presentación y análisis de resultados

4.1.1. Descripción del proceso

4.1.1.1. Determinación del factor de llenado

Se seleccionaron los equipos representativos del frente de operación, incluyendo una pala hidráulica, un cargador frontal y volquetes de acarreo asociados al circuito de producción. Posteriormente, durante los turnos representativos, se observó y registró cada ciclo de carguío y descarga. Se midió la cantidad de baldes o cucharones empleados para completar la carga de cada volquete.

Luego, se verificó visualmente el llenado del balde o tolva, considerando si la carga se encontraba al ras, sobrecargada o con menor volumen al nominal. Cuando fue posible, se emplearon los datos del sistema de despacho o monitoreo de flota (payload) para obtener el volumen o peso real cargado (V_r) por ciclo. Por otro lado, Se anotaron las especificaciones técnicas del fabricante de cada equipo la capacidad nominal del balde o tolva.

Seguidamente, se realizó el cálculo del factor de llenado (FLL) empleando la siguiente ecuación:

$$FLL = \frac{V_r}{V_n}$$

Donde, V_r corresponde al volumen real transportado y V_n a la capacidad nominal del balde o tolva según corresponda. Luego, los datos obtenidos durante el período enero - diciembre de 2024, fueron procesados y promediados por cada mes.

4.1.1.2. Determinación de la disponibilidad mecánica

Se recopilaron los registros diarios de horas de operación, horas de mantenimiento preventivo y horas de reparación correctiva de cada equipo, provenientes del sistema de control de mantenimiento o parte diario de equipos. Las horas se clasificaron de la siguiente manera:

- **Horas operativas (HO):** tiempo en que el equipo estuvo en producción o disponible para operar.
- **Horas de reparación (HR):** tiempo en que el equipo estuvo detenido por fallas mecánicas o mantenimientos no programados.
- **Horas totales programadas (HT):** suma de horas operativas y horas de reparación.

Con los datos anteriores, se determinó la disponibilidad mecánica (DM) mediante la expresión:

$$\%DM = \frac{HO}{HO + HR} \times 100$$

Donde, DM representa la disponibilidad mecánica de los equipos en porcentaje, HO representa las horas operativas y HR corresponden a las horas de reparación o correctivas. Seguidamente, se verificó la coherencia de los registros con los reportes del sistema de despacho o bitácoras del supervisor, descartando tiempos no productivos atribuibles a causas externas (por ejemplo, lluvia o falta de material).

Luego, la DM se estimó en promedio mensual para cada uno de los equipos mencionados en cada unidad minera.

4.1.2. Variable disponibilidad mecánica

4.1.2.1. Disponibilidad mecánica minera Toquepala – Tacna

En la Tabla 2, se muestra la disponibilidad mecánica de los equipos de carguío y acarreo: Volquete Komatsu 930E-4, Pala P&H4100A y Cargador de ruedas LeTernau 2350 en la minera Toquepala, ubicada en Tacna.

Tabla 2

Disponibilidad mecánica equipos carguío y acarreo Toquepala

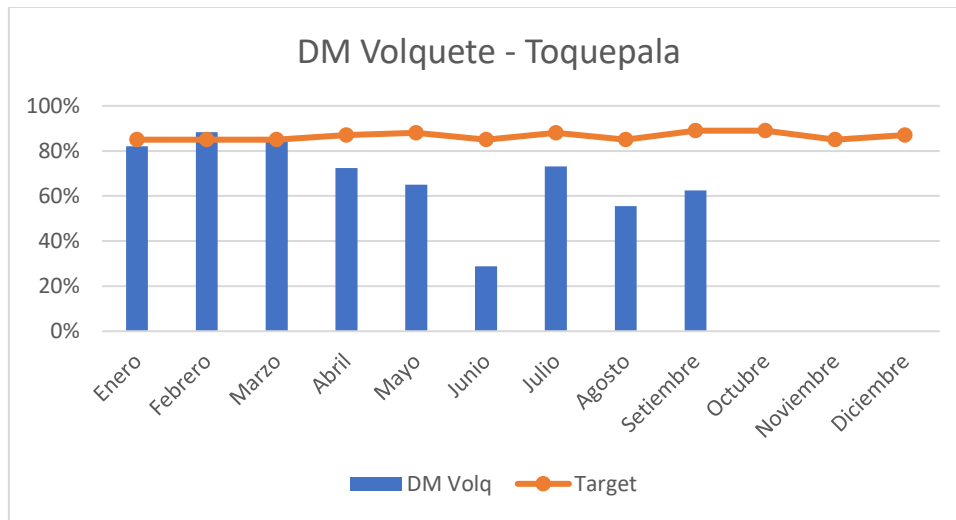
Disponibilidad mecánica (%)						
Mes	Volquete	Target	Pala	Target	Cargador frontal	Target
Enero	82%	85%	91%	87%	59%	82%
Febrero	88%	87%	82%	87%	88%	85%
Marzo	84%	85%	77%	78%	75%	82%
Abril	72%	85%	84%	87%	78%	83%
Mayo	65%	85%	91%	89%	82%	79%
Junio	29%	85%	87%	86%	70%	79%
Julio	73%	87%	87%	88%	78%	67%
Agosto	55%	87%	80%	82%	85%	82%
Setiembre	63%	85%	64%	87%	54%	64%
Octubre	0%	85%	91%	89%	80%	80%
Noviembre	0%	87%	89%	87%	79%	68%
Diciembre	0%	87%	86%	86%	80%	85%

A partir de los resultados mostrados en la Tabla 2, a continuación, se comparan cada uno de los equipos respecto a su DM y su target mensual durante el año analizado.

En la Figura 1, se puede ver una comparación de la disponibilidad mecánica del volquete 31 de la minera Toquepala respecto a su target mensual durante el 2024; donde se puede apreciar que solo los meses de febrero y marzo se alcanzó el target establecido por la empresa para el volquete, en tanto, que el resto de los meses la DM estuvo por debajo de dicho parámetro.

Figura 1

Disponibilidad mecánica volquete 31 Toquepala 2024



Por otro lado, en la Tabla 3, se muestran las causas que influyeron en la DM del volquete en los meses donde no logró alcanzar su target.

Tabla 3

Causas que influyen en la disponibilidad mecánica del volquete 31 Toquepala - 2024

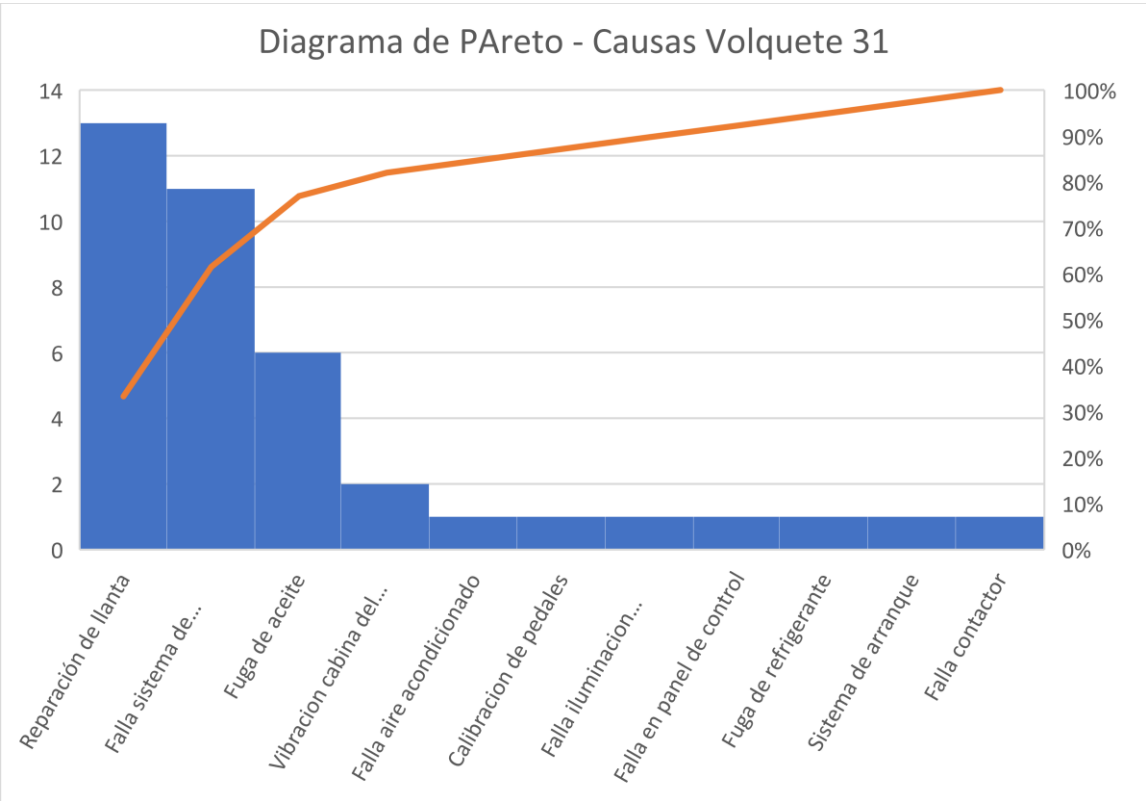
Nº	Causa	Frecuencia
1	Reparación de llanta	13
2	Falla aire acondicionado	1
3	Vibración cabina del operador	2
4	Falla sistema de propulsión	11
5	Calibración de pedales	1
6	Falla iluminación exterior	1
7	Falla en panel de control	1
8	Fuga de aceite	6
9	Fuga de refrigerante	1
11	Sistema de arranque	1
12	Falla contactor	1

En la Figura 2, se muestra una jerarquización de las causas que influyeron en la disponibilidad mecánica del volquete en minera Toquepala, en la cual se puede observar que

las causas con mayor frecuencia fueron la reparación de llanta, fallas en el sistema de propulsión y las fugas de aceites. Cabe destacar que todas estas intervenciones se realizaron como actividades de mantenimiento no programado.

Figura 2

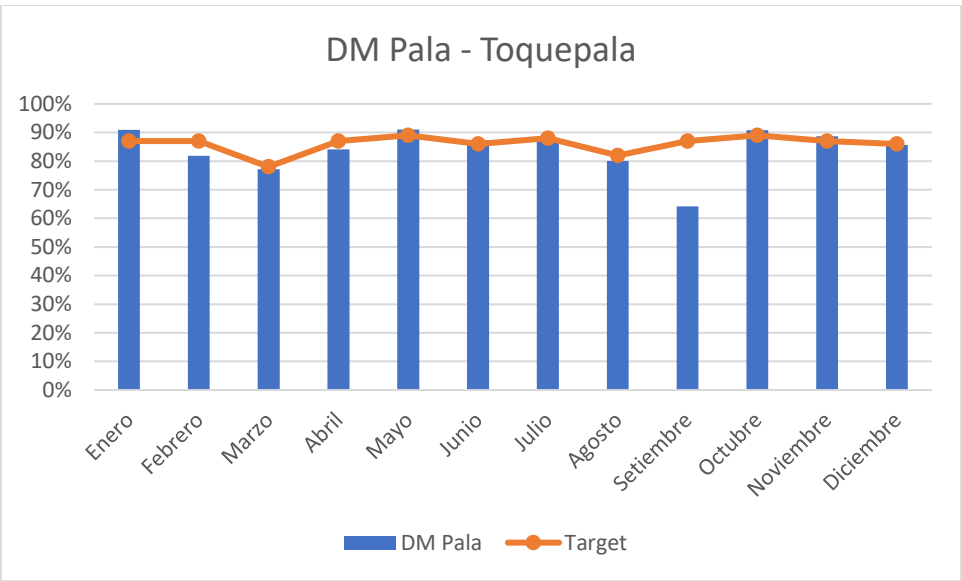
Jerarquización de causas que influyen en la DM del Volquete – Toquepala 2024



De manera similar, en la Figura 3, se muestra la comparación de DM de la Pala - minera Toquepala, versus su target mensual durante el año 2024, donde se puede apreciar que solo los meses de marzo, agosto y septiembre estuvieron muy por debajo de su target esperado del mes.

Figura 3

Disponibilidad mecánica del Pala Toquepala 2024



Así mismo, en la Tabla 4, se describen las causas que generaron este problema en la DM los meses en que no logró su target la Pala en minera Toquepala.

Tabla 4

Causas que influyen en la disponibilidad mecánica de la pala Toquepala – 2024

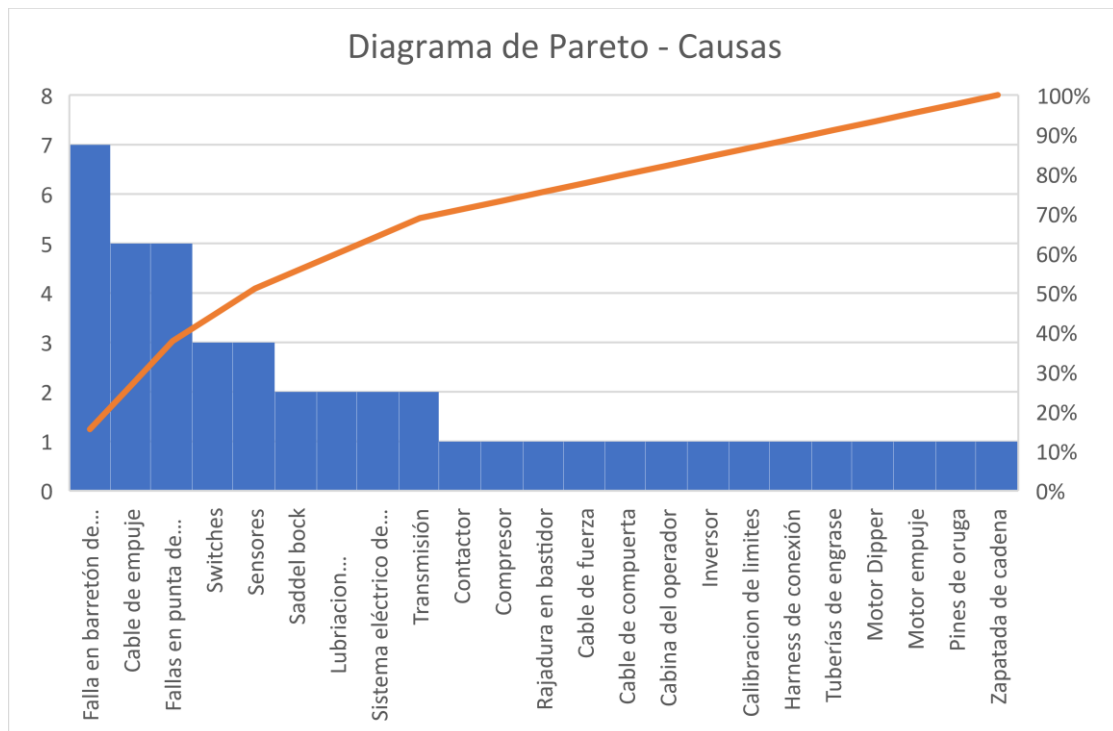
Nº	Causa	Frecuencia
1	Contactor	1
2	Compresor	1
3	Rajadura en bastidor	1
4	Falla en barretón de espada	7
5	Cable de fuerza	1
6	Cable de compuerta	1
7	Cabina del operador	1
8	Cable de empuje	5
9	Fallas en punta de cucharón	5
10	Saddel bock	2
11	Inversor	1
12	Calibración de limites	1
13	Harness de conexión	1

N°	Causa	Frecuencia
14	Tuberías de engrase	1
15	Lubricación automática	2
16	Motor Dipper	1
17	Motor empuje	1
18	Pines de oruga	1
19	Zapata de cadena	1
20	Switches	3
21	Sistema eléctrico de control	2
22	Sensores	3
23	Transmisión	2

En la Figura 4, se jerarquizaron las causas que afectaron la DM de la pala, mediante el diagrama de Pareto.

Figura 4

Jerarquización de causas que influyen en la DM de la pala S-04 Toquepala 2024

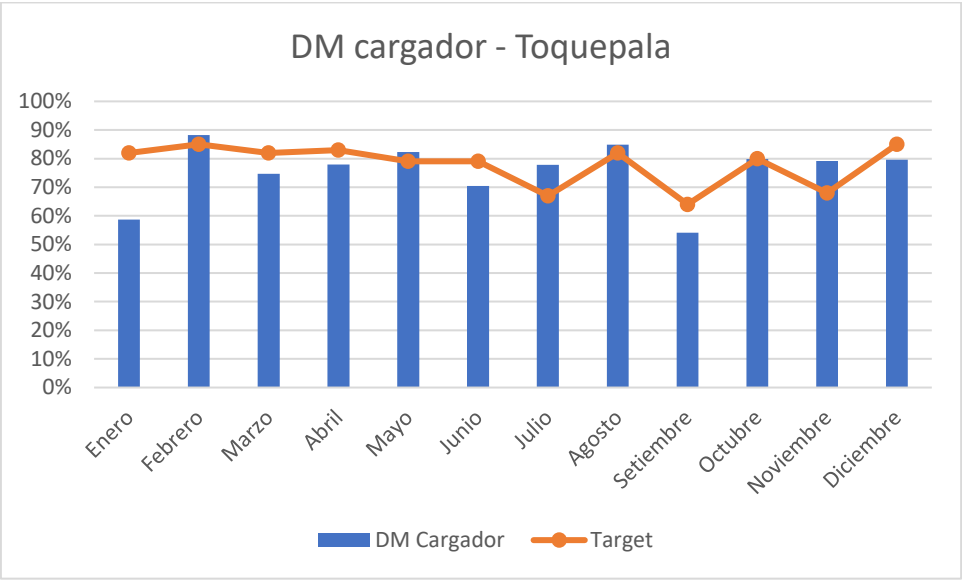


Se puede apreciar en la Figura 4 que, las causas con mayor frecuencia que afectaron la DM de la pala, fueron la falla en barretón de espada, en el cable de empuje, en la punta del cucharón, los switches y sensores.

En la Figura 5, se muestra la comparación gráfica de la DM del cargador y su target.

Figura 5

Disponibilidad mecánica del cargador - Toquepala 2024



Se puede observar en la Figura 5, el cargador frontal se mantuvo por debajo en los meses enero, marzo, abril, junio, septiembre y diciembre, evidenciando que no alcanzo la meta mensual en la mitad del año evaluado. Las causas que influenciaron este comportamiento, se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5

Causas que influyen en la disponibilidad mecánica del cargador Toquepala – 2024

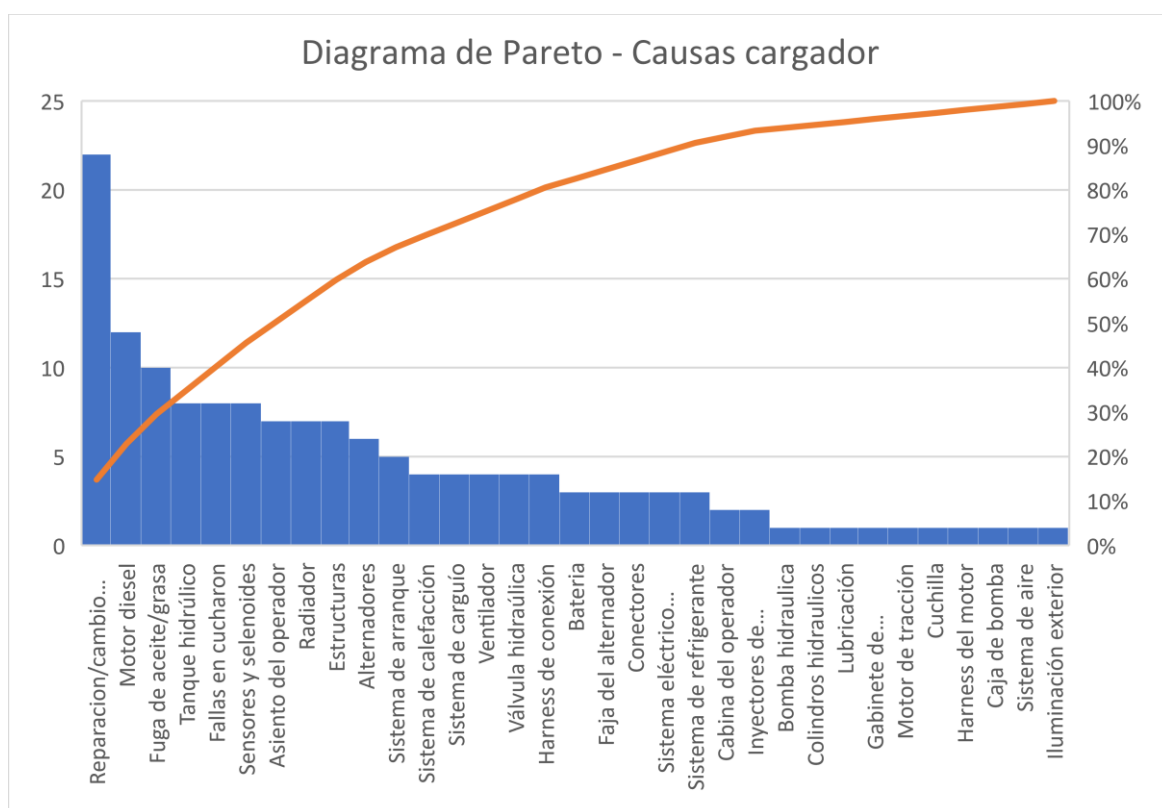
N°	Causa	Frecuencia
1	Sistema de calefacción	4
2	Alternadores	6
3	Asiento del operador	7
4	Batería	3
5	Bomba hidráulica	1
6	Cabina del operador	2
7	Cilindros hidráulicos	1
8	Caja de bomba	1
9	Conectores	3
10	Cuchilla	1
11	Estructuras	7
12	Gabinete de convertidores	1
13	Faja del alternador	3
14	Fallas en cucharón	8
15	Harness de conexión	4
16	Harness del motor	1
17	Iluminación exterior	1
18	Fuga de aceite/grasa	10
19	Sistema de refrigerante	3
20	Inyectores de lubricación	2
21	Lubricación	1
22	Reparación/cambio Llanta	22
23	Motor diésel	12
24	Motor de tracción	1
25	Radiador	7
26	Sensores y solenoides	8
27	Sistema de carguío	4
28	Sistema de arranque	5
29	Sistema eléctrico control	3
30	Sistema de aire	1
31	Ventilador	4
32	Válvula hidráulica	4
33	Tanque hidráulico	8

Las causas mostradas en la Tabla 5 se pueden jerarquizar mediante el diagrama de Pareto de

la Figura 6.

Figura 6

Jerarquización de causas que influyen en la DM del cargador Toquepala 2024



En la Figura 6 se puede apreciar que las causas con mayor frecuencia que afectaron la DM del cargador frontal en los meses donde no alcanzó su target, fueron la reparación / cambio de llantas no programadas, fallas en motor diésel, fugas de aceite/grasas, fallas en tanque hidráulico, cucharón y sensores y selenoides.

4.1.2.2. Disponibilidad mecánica minera Cuajone – Moquegua

En la Tabla 6, se muestra la disponibilidad mecánica registrada por los equipos de carguío y acarreo: Volquete Komatsu 980E-4, la Pala P&H 2800XPB y el Cargador de ruedas Komatsu WE-1850 GIII en la minera Cuajone.

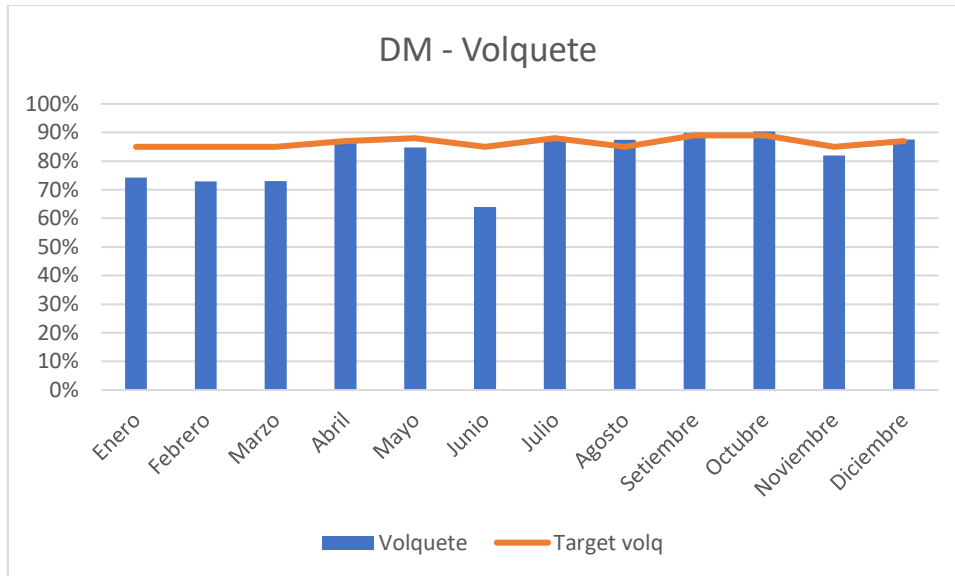
Tabla 6*Disponibilidad mecánica equipos carguío y acarreo Cuajone 2024*

Disponibilidad mecánica						
Mes	Volquete	Target volq.	Pala	Target Pala	Cargador de ruedas	Target carg.
Enero	74%	85%	84%	86%	50%	81%
Febrero	73%	85%	93%	89%	74%	81%
Marzo	73%	85%	94%	87%	89%	86%
Abril	87%	87%	95%	89%	75%	80%
Mayo	85%	88%	92%	87%	90%	86%
Junio	64%	85%	93%	89%	88%	87%
Julio	88%	88%	70%	88%	84%	82%
Agosto	87%	85%	84%	90%	90%	86%
Setiembre	90%	89%	95%	85%	88%	85%
Octubre	90%	89%	95%	89%	88%	81%
Noviembre	82 %	85%	81%	88%	82%	79%
Diciembre	88%	87%	90%	90%	77%	79%

En la Figura 7, se muestra el comportamiento de la disponibilidad mecánica del volquete en la minera Cuajone durante el año 2024.

Figura 7

Disponibilidad mecánica del volquete Cuajone 2024



Se puede apreciar en la Figura 7, en el caso del volque tuvo un mínimo de 64% en junio. Estos resultados se asocian con la alta tasa de horas de reparaciones o mantenimientos correctivos. También se puede apreciar que, respecto al target mensual, el volquete no alcanzó este valor en los meses de enero, febrero, marzo, junio y noviembre, evidenciando problemática de DM en este equipo.

Tabla 7

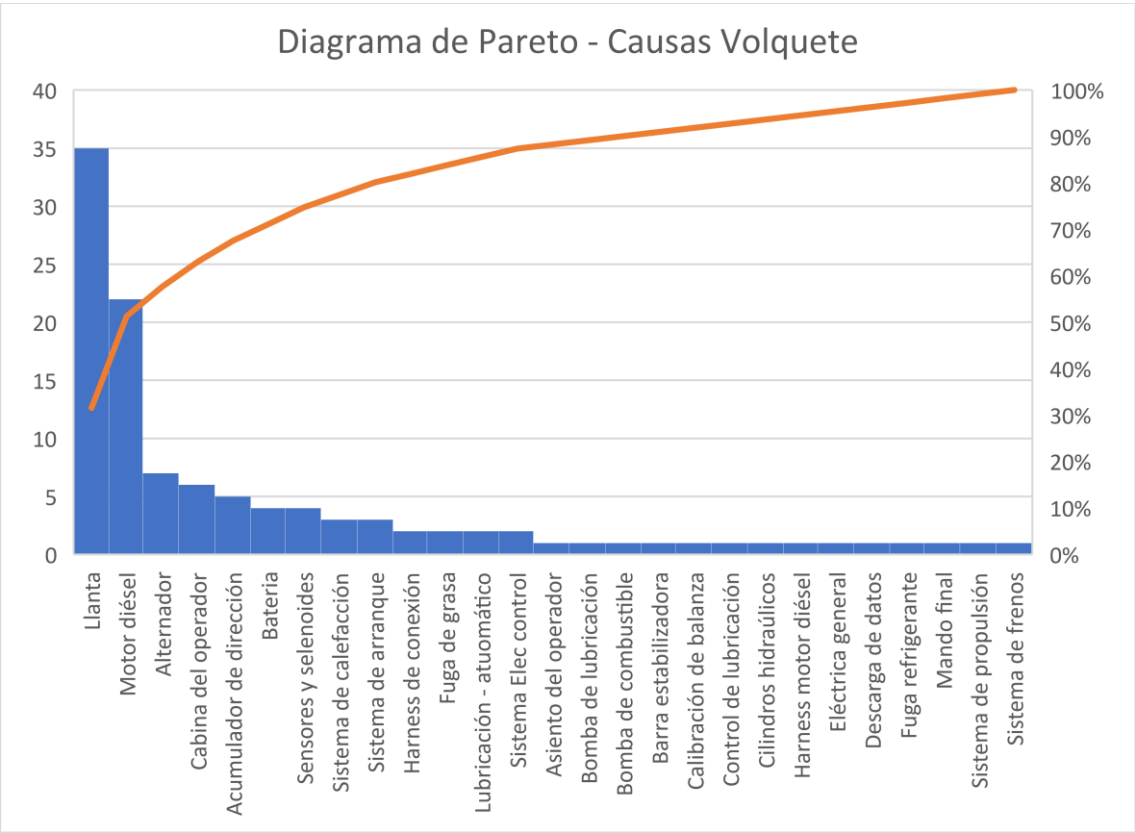
Causas que influyen en la disponibilidad mecánica del volquete 163 Cuajone 2024

Nº	Causa	Frecuencia
1	Acumulador de dirección	5
2	Alternador	7
3	Asiento del operador	1
4	Sistema de calefacción	3
5	Batería	4
6	Bomba de lubricación	1
7	Bomba de combustible	1
8	Barra estabilizadora	1
9	Cabina del operador	6
10	Calibración de balanza	1
11	Control de lubricación	1
12	Cilindros hidráulicos	1
13	Harness de conexión	2
14	Harness motor diésel	1
15	Eléctrica general	1
16	Descarga de datos	1
17	Fuga de grasa	2
18	Fuga refrigerante	1
19	Llanta	35
20	Motor diésel	22
21	Lubricación - automático	2
22	Mando final	1
23	Sensores y selenoides	4
24	Sistema de arranque	3
25	Sistema Elec. control	2
26	Sistema de propulsión	1
27	Sistema de frenos	1

De la Tabla 7, se jerarquizaron las causas en el diagrama de Pareto de la Figura 8, en la cual se observa como causas más frecuentes la reparación de llantas, fallas en motor diésel y en alternador.

Figura 8

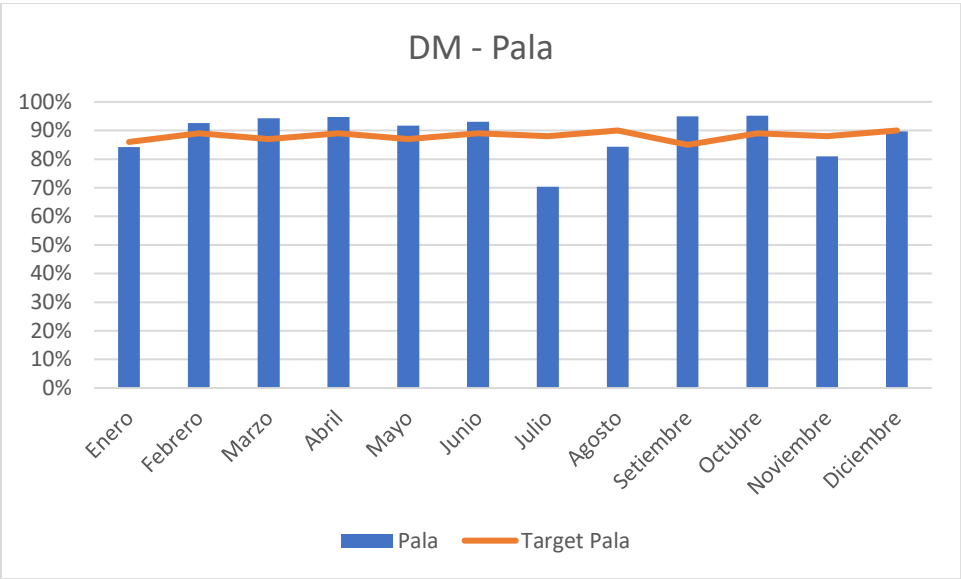
Jerarquización de causas que influyen en la DM del volquete 163 Cuajone 2024



En la Figura 9 se muestra la comparación gráfica de la DM de la pala respecto a su target durante los meses del año 2024, donde se aprecia que en los meses enero, julio, agosto y noviembre este equipo no alcanzó su target mensual.

Figura 9

Disponibilidad mecánica de la pala Cuajone 2024



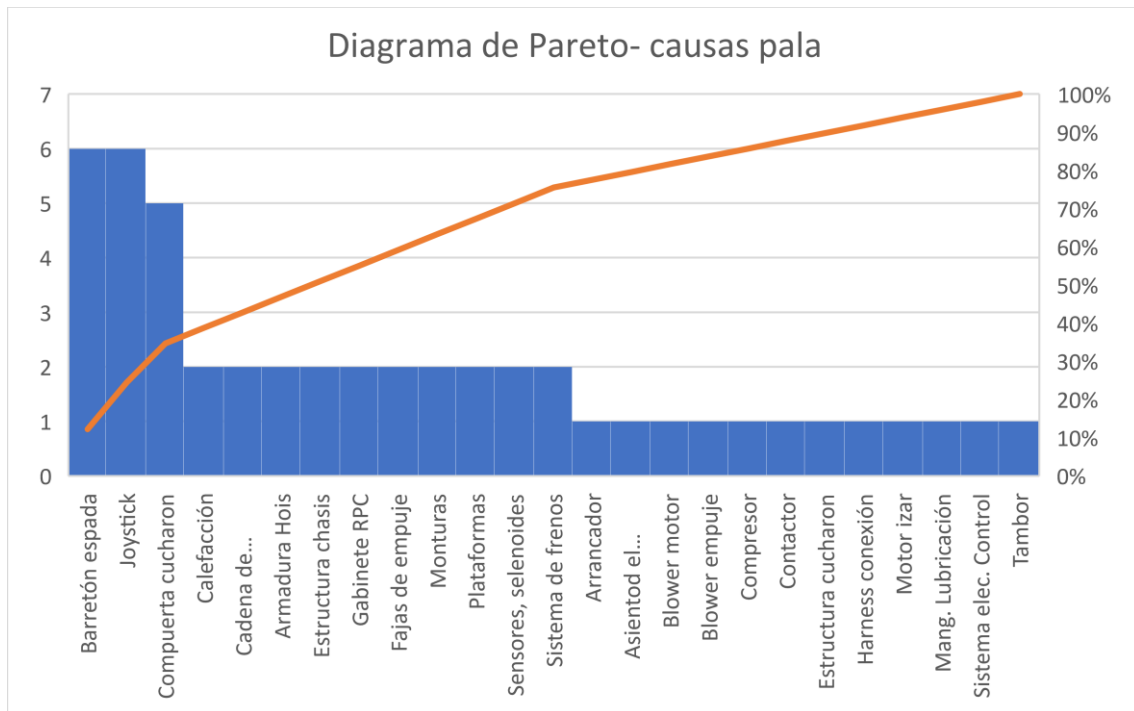
En la Tabla 8, se describen las causas que afectaron la DM de la Pala en la minera Cuajone durante el período 2024, en los meses que no alcanzó su target.

Tabla 8*Causas que influyen en la disponibilidad mecánica de la Pala Cuacone 2024*

Nº	Causa	Frecuencia
1	Arrancador	1
2	Asiento del conductor	1
3	Calefacción	2
4	Barretón espada	6
5	Blower motor	1
6	Cadena de compuerta	2
7	Blower empuje	1
8	Compresor	1
9	Contactador	1
10	Compuerta cucharón	5
11	Armadura Hois	2
12	Estructura chasis	2
13	Estructura cucharón	1
14	Gabinete RPC	2
15	Fajas de empuje	2
16	Joystick	6
17	Harness conexión	1
18	Motor izar	1
19	Monturas	2
20	Mang. Lubricación	1
21	Plataformas	2
22	Sensores, selenoides	2
23	Sistema de frenos	2
24	Sistema elec. Control	1
25	Tambor	1

Figura 10

Jerarquización de causas que influyen en la DM de la pala Cuajone 2024

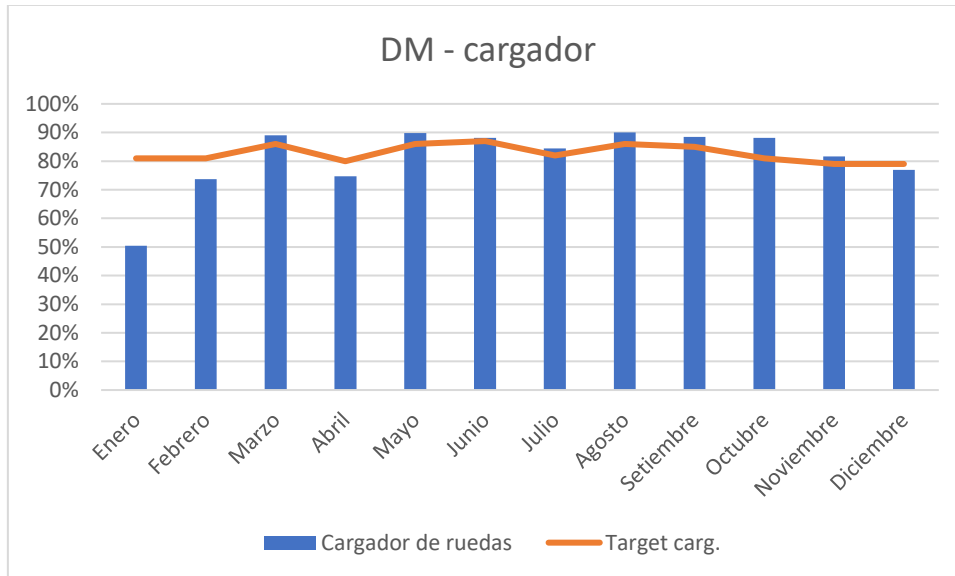


Se puede apreciar en la Figura 10, que las causas que influyeron en la DM mecánica de la pala en los meses que no alcanzó su target fueron las fallas en barretón espada, joystick y en compuerta de cucharon.

En la Figura 11 se detalla la comparación de la DM del cargador de minera Cuajone respecto a su target mensual durante el año 2024.

Figura 11

Disponibilidad mecánica del cargador- Cuajone 2024



Se puede apreciar en la Figura 11 que la DM del cargador estuvo por debajo de su target en los meses de enero, febrero, abril, y diciembre. Este comportamiento fue influenciado por las casas que se describen en la Tabla 9.

Tabla 9

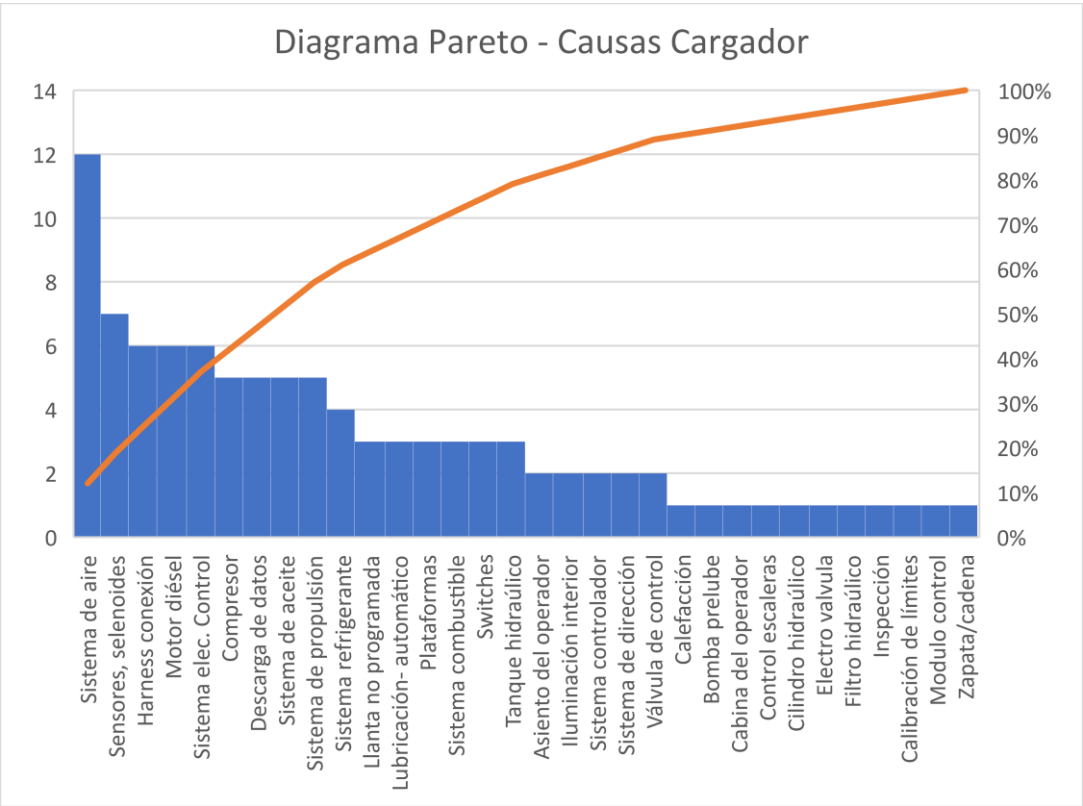
Causas que influyen en la disponibilidad mecánica del cargador Cuajone 2024

Nº	Causa	Frecuencia
1	Calefacción	1
2	Asiento del operador	2
3	Bomba prelube	1
4	Cabina del operador	1
5	Control escaleras	1
6	Compresor	5
7	Descarga de datos	5
8	Cilindro hidráulico	1
9	Electro válvula	1
10	Harness conexión	6
11	Filtro hidráulico	1
12	Inspección	1
13	Sistema de aire	6
14	Iluminación interior	2
15	Calibración de límites	1
16	Sistema refrigerante	4
17	Sistema de aceite	5
18	Llanta no programada	3
19	Lubricación- automático	3
20	Motor diésel	6
21	Modulo control	1
22	Plataformas	3
23	Sistema combustible	3
24	Sensores, solenoides	7
25	Sistema de propulsión	5
26	Sistema controlador	2
27	Sistema elec. Control	6
28	Sistema de aire	6
29	Sistema de dirección	2
30	Switches	3
31	Tanque hidráulico	3
32	Válvula de control	2
33	Zapata/cadena	1

En la Figura 12 se muestra una jerarquización de las causas que influenciaron la DM del cargador.

Figura 12

Jerarquización de causas que influyen en la DM del cargador Cuajone 2024



4.1.3. Variable factores operacionales

4.1.3.1. Horas de mantenimiento preventivo equipos de carguío y acarreo Toquepala

En la Tabla 10 se muestran las horas de mantenimiento preventivo mensuales durante el año 2024 de los equipos de carguío y acarreo de la minera Toquepala.

Tabla 10

Horas de mantenimiento preventivo equipos carguío y acarreo Toquepala 2024

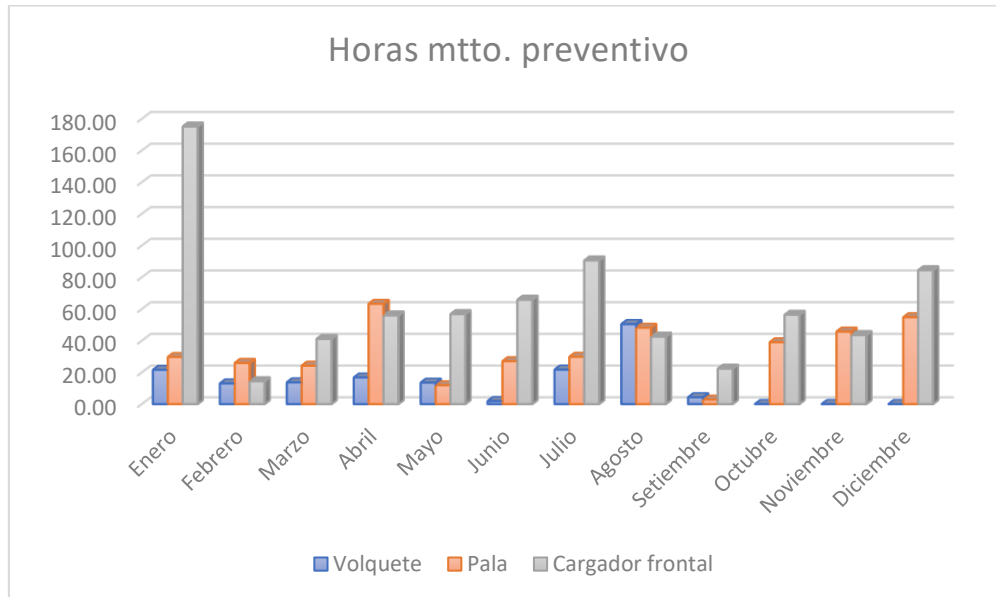
Horas de mantenimiento preventivo			
Mes	Volquete	Pala	Cargador frontal
Enero	21.61	29.70	175.09
Febrero	13.02	25.95	14.37
Marzo	13.68	24.21	41.08
Abril	16.77	63.23	55.91
Mayo	13.51	11.86	56.75
Junio	1.89	27.06	65.83
Julio	21.73	29.82	90.61
Agosto	50.47	48.17	42.53
Setiembre	4.30	2.85	22.33
Octubre	0.00	39.01	56.35
Noviembre	0.00	45.72	43.49
Diciembre	0.00	54.81	84.43

A partir de los resultados expuestos en la Tabla 10, se muestra una comparación gráfica de las horas de mantenimiento preventivo entre los equipos de carguío y acarreo, el volquete, la pala y el cargador de ruedas, mediante la Figura 13.

Figura 13

Horas de mantenimiento preventivo entre los equipos de carguío y acarreo Toquepala

2024



Se puede apreciar en la Figura 13, que el equipo cargador frontal es el que más horas de mantenimiento preventivo presenta en promedio con la tasa más alta en el mes de enero de 175 horas. Por el contrario, el equipo con menos horas de mantenimiento preventivo resultó el volquete, donde los meses de octubre a diciembre tuvo cero (0) horas.

4.1.3.2. Horas de mantenimiento no programado equipos de carguío y acarreo Toquepala

En la Tabla 11, se muestra las horas de mantenimiento no programados mes con mes durante el 2024 que se ocuparon en los equipos carguío y acarreo de la minera Toquepala.

Tabla 11

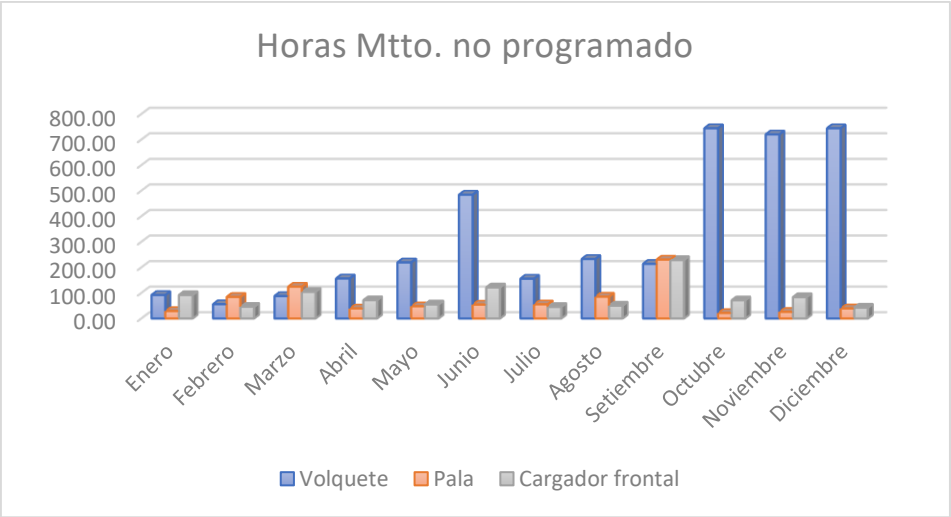
Horas de mantenimiento no programados equipos carguío y acarreo Toquepala 2024

Horas de mantenimiento no programado			
Mes	Volquete	Pala	Cargador frontal
Enero	91.55	28.82	91.52
Febrero	55.65	84.16	45.48
Marzo	87.57	124.18	103.97
Abril	156.34	38.97	71.23
Mayo	219.20	47.38	54.67
Junio	484.08	53.94	121.28
Julio	155.53	54.97	44.96
Agosto	232.61	85.06	50.13
Setiembre	213.42	230.06	228.35
Octubre	744.00	21.12	70.89
Noviembre	719.99	25.60	83.11
Diciembre	744.00	39.15	42.15

Una comparación gráfica de las horas de mantenimiento no programado entre los equipos de carguío y acarreo de la minera Toquepala, se describe en la Figura 14, donde se observa que, el volquete registro la mayor tasa de horas y el cargador frontal, la menor tasa de horas junto con la Pala, reflejando que el volquete es un equipo con mayor intervención en reparaciones.

Figura 14

Horas de mantenimiento no programado entre los equipos de carguío y acarreo Toquepala 2024



4.1.3.3. Factor de llenado equipos de carguío y acarreo Toquepala

En la Tabla 12 se resume el promedio mensual del factor de llenado que presentó cada uno de los equipos de carguío y acarreo en la minera Toquepala durante el año 2024.

Tabla 12

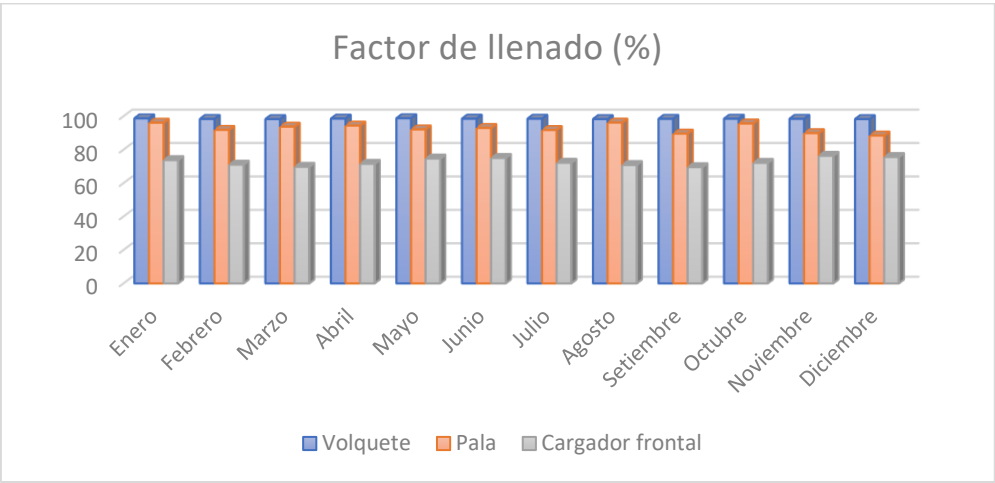
Factor de llenado de los equipos carguío y acarreo Toquepala 2024

Factor de llenado (%)			
Mes	Volquete	Pala	Cargador frontal
Enero	98.74	96.15	73.75
Febrero	98.40	91.85	71.06
Marzo	98.28	93.78	69.71
Abril	98.60	94.41	71.54
Mayo	98.82	92.14	74.69
Junio	98.55	93.00	75.08
Julio	98.52	91.74	72.15
Agosto	98.28	96.19	70.84
Setiembre	98.44	89.60	69.54
Octubre	98.54	95.68	72.10
Noviembre	98.45	89.90	76.33
Diciembre	98.28	88.47	75.63

En la Figura 15, se compara el factor de llenado de los equipos de carguío y acarreo de Toquepala, donde se puede apreciar que el volquete tiene mayor factor de llenado con un máximo de 98.82, seguido de la Pala con un máximo de 96.15 y con menor factor el cargador frontal con un máximo factor de 76.33.

Figura 15

Factor de llenado entre los equipos de carguío y acarreo Toquepala 2024



4.1.3.4. Horas de mantenimiento preventivo equipos de carguío y acarreo Cuajone

En la Tabla 13 se muestran las horas de mantenimiento preventivo mensuales durante el año 2024 de los equipos de carguío y acarreo de la minera Cuajone.

Tabla 13

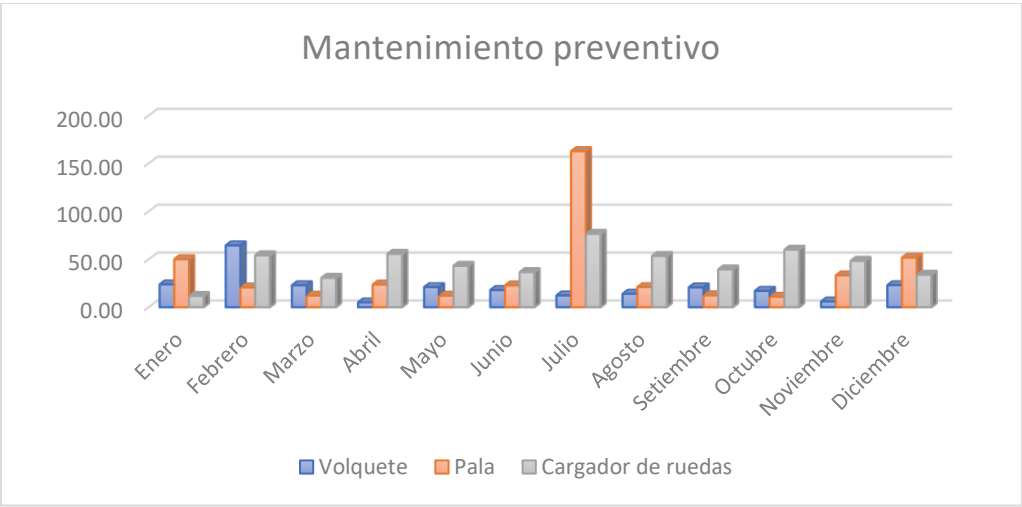
Horas de mantenimiento preventivo de los equipos carguío y acarreo Cuajone 2024

Horas de mantenimiento preventivo			
Mes	Volquete	Pala	Cargador de ruedas
Enero	23.77	50.05	11.79
Febrero	64.45	20.70	54.21
Marzo	22.89	12.07	30.69
Abril	5.06	23.65	55.70
Mayo	20.96	12.03	43.19
Junio	17.89	22.76	36.68
Julio	12.31	162.76	76.56
Agosto	14.02	20.96	53.47
Setiembre	20.64	12.36	39.43
Octubre	17.06	10.90	60.00
Noviembre	6.02	33.23	48.38
Diciembre	22.97	51.74	33.92

En la Figura 16, se comparan las horas de mantenimiento preventivo mensual, durante el año 2024 entre los equipos de carguío y acarreo de la minera Cuajone, apreciándose que la pala registró mayor cantidad de horas de mantenimiento preventivo con mayor énfasis en el mes de julio. Mientras que, el volquete fue el equipo con menos cantidad de horas de mantenimiento preventivo reportadas.

Figura 16

Horas de mantenimiento preventivo entre los equipos de carguío y acarreo Cuajone 2024



4.1.3.5. Horas de mantenimiento no programado equipos de carguío y acarreo Cuajone

En la Tabla 14 se describe las horas de mantenimiento no programado de los equipos de carguío y acarreo de la minera Cuajone con frecuencia mensual, durante el año 2024.

Tabla 14

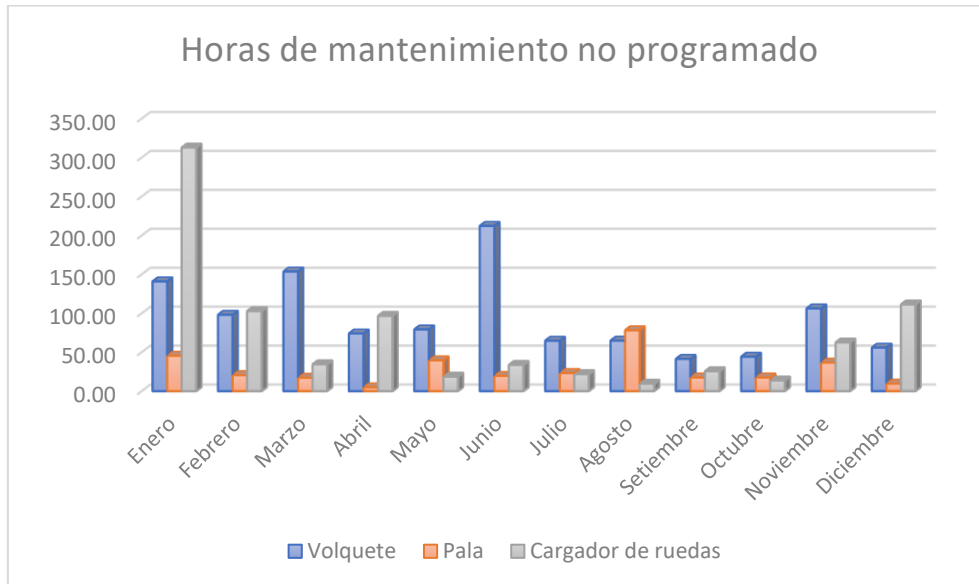
Horas de mantenimiento no programado de los equipos carguío y acarreo Cuajone 2024

Mes	Volquete	Pala	Cargador de ruedas
Enero	140.97	45.44	312.80
Febrero	98.09	20.60	102.74
Marzo	153.59	17.18	34.44
Abril	74.06	4.93	96.72
Mayo	79.26	39.59	18.66
Junio	212.21	19.61	33.70
Julio	64.75	23.19	21.85
Agosto	64.84	78.17	9.50
Setiembre	41.39	17.53	25.57
Octubre	44.24	17.47	13.73
Noviembre	106.24	36.59	62.50
Diciembre	55.85	9.62	111.31

En la Figura 17 se compra las horas promedio mensuales de mantenimiento no programado entre los equipos de carguío y acarreo de la minera Cuajone durante el año 2024.

Figura 17

Horas de mantenimiento no programado entre los equipos de carguío y acarreo Cuajone 2024



En la Figura 17 se puede apreciar que el cargador de ruedas fue el equipo con más horas de mantenimiento no programado seguido del volquete, con un máximo de 312.80 horas y 212.21 horas respectivamente. Por el contrario, la Pala fue el equipo con menos cantidad de horas registradas en cuanto a mantenimiento no programado.

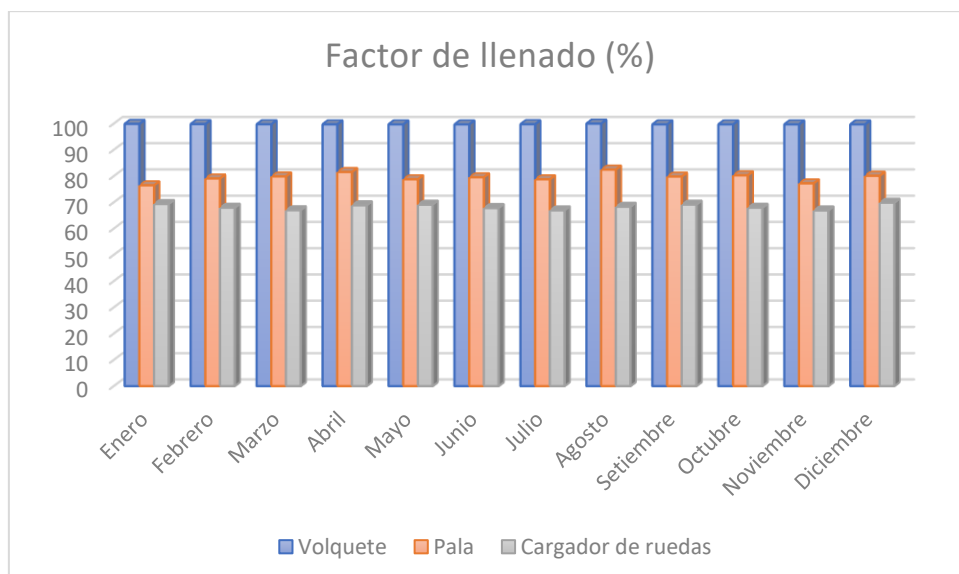
4.1.3.6. Factor de llenado equipos de carguío y acarreo Cuajone

El promedio mensual del factor de llenado durante el período enero – diciembre 2024, se muestra en la Tabla 15, para los equipos de carguío y acarreo de la unidad minera Cuajone.

Tabla 15*Factor de llenado de los equipos carguío y acarreo Cuajone 2024*

Mes	Volquete	Pala	Cargador de ruedas
Enero	99.88	76.49	69.38
Febrero	99.82	79.10	67.94
Marzo	99.75	79.87	67.01
Abril	99.72	81.56	68.89
Mayo	99.71	78.80	69.12
Junio	99.70	79.56	67.84
Julio	99.78	78.77	66.96
Agosto	100.00	82.49	68.32
Setiembre	99.71	79.84	69.14
Octubre	99.70	80.31	67.94
Noviembre	99.71	77.24	66.93
Diciembre	99.70	80.13	69.88

En la Figura 18, se compara el factor de llenado promedio mensual entre los equipos de carguío y acarreo de la minera Cuajone, donde se puede observar que, el factor de llenado es mayor para el volquete, seguido para la pala y menor para el cargador de ruedas manteniéndose con el tiempo.

Figura 18*Factor de llenado entre los equipos de carguío y acarreo Cuajone 2024*

4.2. Contrastación de las hipótesis

4.2.1. Prueba de normalidad

Los resultados de la comprobación de supuesto de normalidad mediante la prueba de Shapiro – Wilk, se resume en la Tabla 16, para las variables estudiadas, es decir, disponibilidad mecánica, horas de mantenimiento preventivo, horas de mantenimiento no programado y factor de llenado de los equipos de carguío y acarreo correspondiente a la minera Toquepala.

Tabla 16

Prueba de normalidad variables de minera Toquepala

Variable	Shapiro -Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.
DM Volquete	0.832	12	0.022
DM Pala	0.829	12	0.020
DM Cargador	0.864	12	0.054
HMNP Volquete	0.799	12	0.009
HMNP Pala	0.754	12	0.003
HMNP Cargador	0.758	12	0.003
FLL Volquete	0.932	12	0.406
FLL Pala	0.946	12	0.574
FLL Cargador	0.935	12	0.435
HMP Volquete	0.819	12	0.016
HMP Pala	0.976	12	0.962
HMP Cargador	0.823	12	0.017

Nota. DM: disponibilidad mecánica, HMNP: horas de mantenimiento no programado, FLL: factor de llenado, HMP: horas de mantenimiento preventivo.

De acuerdo a la información reflejada en la Tabla 16, se muestra que para las variables disponibilidad mecánicas de volquete y pala no siguen una distribución normal al tener un p – valor (significancia) < 0.05 , al igual que las variables de horas de mantenimiento no programado (HMNP) en todos los equipos, las horas de mantenimiento preventivo para volquete y cargador. Para el factor de llenado (FLL) en todos los equipos, hay una distribución normal de los datos al obtener un p-valor > 0.05 ya que esto significa la usencia de diferencias estadísticamente significativas entre los valores.

Sin embargo, como se busca relacionar la variable disponibilidad mecánica con las otras variables, se empleará la técnica no paramétrica de correlación tau – b de Kendall para todas a excepción del factor de llenado y la disponibilidad mecánica del cargador que al presentar ambas distribuciones normales, se empleó la correlación paramétrica de Pearson.

Para las variables de la unidad minera Cuajone, la prueba de normalidad se muestra en la Tabla 17.

Tabla 17

Prueba de normalidad variables de minera Cuajone

Variable	Estadístico	gl	Sig.
HMP Volquete	0.882	12	0.092
HMP Pala	0.845	12	0.032
HMP Cargador	0.692	12	0.001
HMNP Volquete	0.723	12	0.001
HMNP Pala	0.604	12	0.000
HMNP Cargador	0.980	12	0.984
FLL Volquete	0.747	12	0.002
FLL Pala	0.968	12	0.884
FLL Cargador	0.928	12	0.355
DM Volquete	0.846	12	0.033
DM Pala	0.801	12	0.010
DM Cargador	0.751	12	0.003

Nota. HMP: horas de mantenimiento preventivo, HMNP: horas de mantenimiento no programado, FLL: factor de llenado, DM: disponibilidad mecánica.

Los resultados en la Tabla 17, indican que las variables HMP del volquete, la HMNP del cargador, el FLL de pala y cargador tiene un p – valor > 0.05 lo cual indica que existen diferencias estadísticamente significativas, por lo cual estas variables siguen un comportamiento normal. El resto de las variables presentaron un p – valor < 0.05, lo cual sugiere que presentan diferencias estadísticamente significativas en sus valores, por lo cual, no cumple con el supuesto de normalidad.

Para estos casos, se escogió una prueba de correlación no paramétrica dado que, la variable de disponibilidad mecánica (DM) se va a correlacionar con todas las demás y esta, no cumple con la distribución normal. En estos términos, se aplicó la prueba de correlación tau – b de Kendall.

4.2.2. Influencia de las horas de mantenimiento preventivo en la disponibilidad mecánica de los equipos de carguío y acarreo en la minería a cielo abierto

A continuación, se presentan los resultados de la influencia de las horas de mantenimiento preventivo en la disponibilidad mecánica de los equipos de carguío y acarreo.

Tabla 18

Prueba Tau-b de Kendall para la disponibilidad mecánica y horas de mantenimiento preventivo Volquete Toquepala

			DM volquete	HMP volquete
Tau - b de Kendall	DM_VOLQ	Coefficiente de correlación	1.000	,492*
		Sig. (bilateral)		0.031
		N	12	12
	HMP_VOLQ	Coefficiente de correlación	,492*	1.000
		Sig. (bilateral)	0.031	
		N	12	12

Nota. DM: disponibilidad mecánica, HMP: horas de mantenimiento preventivo.

En la Tabla 18, los resultados reflejan un coeficiente de relación $\text{Tau} = 0.492$ entre la disponibilidad mecánica y las horas de mantenimiento preventivo del volquete, lo cual indica una relación moderada y positiva, que, además, es estadísticamente significativa dado el p – valor (significancia) < 0.05 . Estos resultados sugieren que, a mayor cantidad de horas de mantenimiento preventivo, mayor (positiva) es la disponibilidad mecánica del volquete.

Tabla 19

Prueba Tau-b de Kendall para la disponibilidad mecánica y horas de mantenimiento preventivo Pala Toquepala

			DM_PALA	HMP_PALA
Tau - b de Kendall	DM_PALA	Coeficiente de correlación	1.000	0.094
		Sig. (bilateral)		0.677
		N	12	12
	HMP_PALA	Coeficiente de correlación	0.094	1.000
		Sig. (bilateral)	0.677	
		N	12	12

Nota. DM: disponibilidad mecánica, HMP: horas de mantenimiento preventivo.

En la Tabla 19, se puede ver los resultados respecto al coeficiente de correlación muy bajo (0.094) y no significativo ($p - \text{valor} > 0.05$), lo cual indica que no existe influencia de las horas de mantenimiento preventivo sobre la disponibilidad mecánica de la pala.

En la Tabla 20, se muestran los resultados de la prueba de correlación entre la disponibilidad mecánica y las horas de mantenimiento preventivo del cargador de ruedas de minera Toquepala.

Tabla 20

Prueba Tau-b de Kendall para la disponibilidad mecánica y horas de mantenimiento preventivo cargador Toquepala

			DM cargador	HMP cargador
Tau - b de Kendall	DM cargador	Coeficiente de correlación	1.000	-0.185
		Sig. (bilateral)		0.408
		N	12	12
	HMP cargador	Coeficiente de correlación	-0.185	1.000
		Sig. (bilateral)	0.408	
		N	12	12

Nota. DM: disponibilidad mecánica, HMP: horas de mantenimiento preventivo.

De acuerdo con lo mostrado en la Tabla 20, siendo un coeficiente de correlación $\text{Tau} = -0.185$ con un $p\text{-valor} > 0.05$, se infiere que existe una correlación muy baja y negativa entre la disponibilidad mecánica y las horas de mantenimiento preventivo del cargador de ruedas en minera Toquepala.

En la Tabla 21, se presentan los resultados obtenidos en la prueba de correlación entre la disponibilidad mecánica y las horas de mantenimiento preventivo del volquete unidad minera Cuajone.

Tabla 21

Prueba Tau-b de Kendall para la disponibilidad mecánica y horas de mantenimiento preventivo volquete Cuajone

			HMP Volquete	DM Volquete
Tau - b de Kendall	HMP volquete	Coeficiente de correlación	1.000	-0.219
		Sig. (bilateral)		0.332
		N	12	12
	DM volquete	Coeficiente de correlación	-0.219	1.000
		Sig. (bilateral)	0.332	
		N	12	12

Nota. DM: disponibilidad mecánica, HMP: horas de mantenimiento preventivo.

En la Tabla 21, los resultados arrojaron un $\text{Tau} = -0.219$ con un $p\text{-valor} > 0.05$, lo cual indica que existe una relación muy baja, negativa y no significativa entre la disponibilidad mecánica y las horas de mantenimiento preventivo del volquete en minera Cuajone.

Tabla 22

Prueba Tau-b de Kendall para la disponibilidad mecánica y horas de mantenimiento preventivo Pala Cuajone

			HMP_PALA	DM_PALA
Tau - b de Kendall	HMP_PALA	Coeficiente de correlación	1.000	-,489*
		Sig. (bilateral)		0.031
		N	12	12
	DM_PALA	Coeficiente de correlación	-,489*	1.000
		Sig. (bilateral)	0.031	
		N	12	12

Nota. DM: disponibilidad mecánica, HMP: horas de mantenimiento preventivo.

Los resultados de la prueba de correlación (Tabla 22), muestran un coeficiente de correlación Tau = -0.489 y un p – valor < 0.05, lo cual indica que existe una correlación moderada, negativa y estadísticamente significativa entre la disponibilidad mecánica y las horas de mantenimiento preventivo de la pala en minera Cuajone, lo que sugiere que a medida que se invierten más horas de tareas preventivas, la disponibilidad mecánica del equipo disminuye.

En la Tabla 23, se muestran los resultados de correlación entre la disponibilidad mecánica y las horas de mantenimiento preventivo del cargador en minera Cuajone.

Tabla 23

Prueba Tau-b de Kendall para la disponibilidad mecánica y horas de mantenimiento preventivo cargador Cuajone

			HMP cargador	DM cargador
Tau - b de Kendall	HMP cargador	Coeficiente de correlación	1.000	0.031
		Sig. (bilateral)		0.890
		N	12	12
	DM cargador	Coeficiente de correlación	0.031	1.000
		Sig. (bilateral)	0.890	
		N	12	12

Nota. DM: disponibilidad mecánica, HMP: horas de mantenimiento preventivo.

Se evidenció, mediante la Tabla 23, un coeficiente de correlación muy bajo ($\tau = 0.031$) y estadísticamente no significativo ($p > 0.05$), lo que sugiere que no existe una relación significativa entre la disponibilidad mecánica y las horas de mantenimiento preventivo del cargador en la unidad minera Cuajone.

Los resultados anteriores, indican que al menos en uno de los equipos de carguío y acarreo en ambas unidades mineras, Toquepala y Cuajone, las horas de mantenimiento tienen una influencia en la disponibilidad mecánica, por lo cual se acepta la hipótesis específica 1 de esta investigación.

4.2.3. Influencia de las horas de mantenimiento no programado en la disponibilidad mecánica de los equipos de carguío y acarreo en la minería a cielo abierto

Tabla 24

Prueba Tau-b de Kendall para la disponibilidad mecánica y horas de mantenimiento no programado volquete Toquepala

			DM Volquete	HMNP Volquete
Tau - b de Kendall	DM Volquete	Coeficiente de correlación	1.000	-,953**
		Sig. (bilateral)		0.000
		N	12	12
	HMNP Volquete	Coeficiente de correlación	-,953**	1.000
		Sig. (bilateral)	0.000	
		N	12	12

Nota. DM: disponibilidad mecánica, HMNP: horas de mantenimiento no programado.

Se interpreta mediante los resultados de la Tabla 24, un coeficiente de correlación $\tau = -0.953$ con un p – valor <0.01 , lo cual indica que existe una relación fuerte, negativa y significativa entre la disponibilidad mecánica y las horas de mantenimiento no programado. Esto quiere decir, que a más horas de tareas de mantenimiento no programadas, menor es la disponibilidad mecánica.

Tabla 25

Prueba Tau-b de Kendall para la disponibilidad mecánica y horas de mantenimiento no programado pala Toquepala

			DM_PALA	HMNOP_PALA
Tau - b de Kendall	DM_PALA	Coefficiente de correlación	1.000	-,688**
		Sig. (bilateral)		0.002
		N	12	12
	HMNOP_PALA	Coefficiente de correlación	-,688**	1.000
		Sig. (bilateral)	0.002	
		N	12	12

Nota. DM: disponibilidad mecánica, HMNP: horas de mantenimiento no programado.

Se refleja mediante la Tabla 25, un coeficiente de correlación Tau = -0.688 con un p – valor <0.05, lo cual indica que existe una relación moderada, negativa y significativa estadísticamente entre la disponibilidad mecánica y las horas de mantenimiento no programado de la pala en minera Toquepala. Esto quiere decir, que a medida que se invierten más horas en tareas de mantenimiento no programado, como las reparaciones no planificadas, disminuye la disponibilidad mecánica.

Tabla 26

Prueba Tau-b de Kendall para la disponibilidad mecánica y horas de mantenimiento no programado cargador Toquepala

			DM cargador	HMNOP cargador
Tau - b de Kendall	DM cargador	Coefficiente de correlación	1.000	-,646**
		Sig. (bilateral)		0.004
		N	12	12
	HMNOP cargador	Coefficiente de correlación	-,646**	1.000
		Sig. (bilateral)	0.004	
		N	12	12

Nota. DM: disponibilidad mecánica, HMNP: horas de mantenimiento no programado.

Según lo mostrado en la Tabla 26, un coeficiente de correlación Tau= -0.646 con un p-valor < 0.05, que indica una moderada correlación, negativa y significativa estadísticamente entre

la disponibilidad mecánica y las horas de mantenimiento no programadas del cargador en minera Toquepala. Eso quiere decir que, a más horas en tareas de mantenimiento no programado, el equipo esta menos disponible para operar.

Tabla 27

Prueba Tau-b de Kendall para la disponibilidad mecánica y horas de mantenimiento no programado volquete Cuajone

			HMNP volquete	DM volquete
Tau - b de Kendall	HMNP volquete	Coeficiente de correlación	1.000	-,907**
		Sig. (bilateral)		0.000
		N	12	12
	DM volquete	Coeficiente de correlación	-,907**	1.000
		Sig. (bilateral)	0.000	
		N	12	12

Nota. DM: disponibilidad mecánica, HMNP: horas de mantenimiento no programado.

Según lo mostrado en la Tabla 27, un coeficiente de correlación Tau = -0.907 con un p – valor < 0.01, lo cual indica que existe una relación fuerte, negativa y estadísticamente muy significativa entre la disponibilidad mecánica y las horas de mantenimiento no programado en el volquete de la minera Cuajone. Esto indica, que a más cantidad de horas invertidas en tareas de mantenimiento no programadas, la disponibilidad mecánica del equipo disminuye.

Tabla 28

Prueba Tau-b de Kendall para la disponibilidad mecánica y horas de mantenimiento no programado pala Cuajone

			HMNP_PALA	DM_PALA
Tau - b de Kendall	HMNP_PALA	Coeficiente de correlación	1.000	-,489*
		Sig. (bilateral)		0.031
		N	12	12
	DM_PALA	Coeficiente de correlación	-,489*	1.000
		Sig. (bilateral)	0.031	
		N	12	12

Nota. DM: disponibilidad mecánica, HMNP: horas de mantenimiento no programado.

Según lo mostrado en la Tabla 28, un coeficiente de correlación Tau= -0.489 con un p-valor < 0.05 , que sugiere una correlación moderada, negativa y significativa estadísticamente entre la disponibilidad mecánica y las horas de mantenimiento no programadas de la pala en minera Cuajone. Eso quiere decir que, a más horas en tareas de mantenimiento no programado, el equipo esta menos disponible para operar.

Tabla 29

Prueba Tau-b de Kendall para la disponibilidad mecánica y horas de mantenimiento no programado cargador Cuajone

			HMNP cargador	DM cargador
Tau - b de Kendall	HMNP cargador	Coeficiente de correlación	1.000	-,688**
		Sig. (bilateral)		0.002
		N	12	12
	DM cargador	Coeficiente de correlación	-,688**	1.000
		Sig. (bilateral)	0.002	
		N	12	12

En la Tabla 29, se muestra un coeficiente de correlación Tau= -0.688 con un p-valor < 0.05 , que indican una moderada correlación, negativa y significativa estadísticamente entre la

disponibilidad mecánica y las horas de mantenimiento no programadas de el cargador de minera Cuajone. Eso quiere decir que, a más horas en tareas de mantenimiento no programado, el equipo esta menos disponible para operar.

Tomando en cuenta los resultados obtenidos, las horas de mantenimiento tienen una influencia significativa en la disponibilidad mecánica de los equipos de carguío y acarreo, particularmente, a mayor cantidad de horas en tareas de mantenimiento no programadas, afecta negativamente, ya que disminuye la disponibilidad para que el equipo pueda realizar sus funciones operativas. Por tanto, se acepta la hipótesis específica 2 de esta investigación.

4.2.4. Influencia del factor de llenado en la disponibilidad mecánica de los equipos de carguío y acarreo en la minería a cielo abierto

Tabla 30

Prueba Tau-b de Kendall para la disponibilidad mecánica y el factor de llenado volquete Toquepala

			DM volquete	FLL volquete
Tau - b de Kendall	DM volquete	Coefficiente de correlación	1.000	0.063
		Sig. (bilateral)		0.780
		N	12	12
	FLL volquete	Coefficiente de correlación	0.063	1.000
		Sig. (bilateral)	0.780	
		N	12	12

Nota. DM: disponibilidad mecánica, FLL: factor de llenado.

Según lo mostrado en la Tabla 30, un coeficiente de relación $Tau=0.063$ con un p- valor > 0.05 , lo cual indican que no existe una relación significativa entre la disponibilidad mecánica y el factor de llenado del volquete.

Tabla 31

Prueba Tau-b de Kendall para la disponibilidad mecánica y el factor de llenado pala Toquepala

			DM_PALA	FLL_PALA
Tau - b de Kendall	DM_PALA	Coefficiente de correlación	1.000	0.125
		Sig. (bilateral)		0.579
		N	12	12
	FLL_PALA	Coefficiente de correlación	0.125	1.000
		Sig. (bilateral)	0.579	
		N	12	12

Nota. DM: disponibilidad mecánica, FLL: factor de llenado.

Se muestra mediante la Tabla 31, un coeficiente de relación $\text{Tau}=0.125$ con un p- valor > 0.05 , lo cual indican que no existe una relación significativa entre la disponibilidad mecánica y el factor de llenado de la pala.

Tabla 32

Prueba r Pearson para la disponibilidad mecánica y el factor de llenado cargador Toquepala

	DM_CARG	FLL_CARG
Correlación de Pearson	1	0.127
Sig. (bilateral)		0.695
N	12	12
Correlación de Pearson	0.127	1
Sig. (bilateral)	0.695	
N	12	12

Nota. DM: disponibilidad mecánica, FLL: factor de llenado.

Según lo obtenido en la Tabla 32, un coeficiente de relación $\text{Tau}=0.127$ con un p- valor > 0.05 , lo cual indica que no existe una relación significativa entre la disponibilidad mecánica y el factor de llenado del cargador.

Tabla 33*Prueba Tau-b de Kendall para la disponibilidad mecánica y el factor de llenado volquete**Cuajone*

			FLL volquete	DM volquete
Tau - b de Kendall	FLL volquete	Coeficiente de correlación	1.000	-0.164
		Sig. (bilateral)		0.481
		N	12	12
	DM volquete	Coeficiente de correlación	-0.164	1.000
		Sig. (bilateral)	0.481	
		N	12	12

Nota. DM: disponibilidad mecánica, FLL: factor de llenado.

En la Tabla 33, los resultados reflejan un coeficiente de correlación muy bajo y negativo, pero no significativo estadísticamente ($p\text{-valor} > 0.05$) lo cual indica que no existe una relación significativa entre la disponibilidad mecánica y el factor de llenado del volquete en minera Cuajone.

Tabla 34*Prueba Tau-b de Kendall para la disponibilidad mecánica y el factor de llenado pala**Cuajone*

			FLL_PALA	DM_PALA
Tau -b de Kendall	FLL_PALA	Coeficiente de correlación	1,000	,426
		Sig. (bilateral)	.	,061
		N	12	12
	DM_PALA	Coeficiente de correlación	,426	1,000
		Sig. (bilateral)	,061	.
		N	12	12

Nota. DM: disponibilidad mecánica, FLL: factor de llenado.

En la Tabla 34, los resultados ilustran un coeficiente de correlación moderado (0.426) y positivo y un p -valor > 0.05 , lo cual indica que no hay una correlación significativa estadísticamente entre la disponibilidad mecánica y el factor de llenado de la pala en minera Cuajone.

Tabla 35

Prueba Tau-b de Kendall para la disponibilidad mecánica y el factor de llenado cargador Cuajone

			FLL cargador	DM cargador
Tau - b de Kendall	FLL cargador	Coeficiente de correlación	1.000	-0.079
		Sig. (bilateral)		0.728
		N	12	12
	DM cargador	Coeficiente de correlación	-0.079	1.000
		Sig. (bilateral)	0.728	
		N	12	12

Nota. DM: disponibilidad mecánica, FLL: factor de llenado.

En la Tabla 35, los resultados obtenidos presentan un coeficiente de correlación muy bajo y negativo con un p – valor > 0.05 lo cual indica que, no existe una correlación significativa entre la disponibilidad mecánica y el factor de llenado del equipo cargador en minera Cuajone.

De acuerdo a los resultados encontrados en ambas unidades mineras, se evidencia que el factor de llenado no influye en la disponibilidad mecánica de los equipos de carguío y acarreo, por lo tanto, hay evidencia estadística para rechazar la hipótesis específica 3 de la investigación.

CAPÍTULO V

DISCUSIÓN

5.1. Discusión de resultados obtenidos

De acuerdo a los hallazgos logrados en esta investigación, se ha identificado que los factores operacionales más influyentes en la disponibilidad mecánica de los equipos de carguío y acarreo son las horas de mantenimiento preventivo y las horas de mantenimiento no programado, con efectos positivos y negativos, respectivamente.

Este comportamiento evidencia que la gestión del mantenimiento constituye un elemento determinante en la eficiencia operativa del sistema minero. La ejecución oportuna de tareas preventivas permite anticiparse a potenciales fallas para evitar que lleguen a transformarse en críticas, garantizando la continuidad de los ciclos de carguío y acarreo y evitando pérdidas de tiempo productivo. En contraste, un alto número de mantenimientos no programados refleja la ocurrencia de fallas imprevistas y una planificación deficiente, generando paradas no planificadas, reducción de la disponibilidad mecánica y aumento de los costos de reparación.

5.2. Contraste con trabajos de investigación similares

Los resultados obtenidos coinciden con los hallazgos de Isnaeni et al. (2022), quienes reportaron que la baja disponibilidad mecánica y física del equipo de carga excavadora Doosan 500 LCV (74% y 79%, respectivamente) estuvo asociada principalmente a un alto número de horas de averías no programadas, retrasos en la entrega de repuestos y deficiencias en el mantenimiento preventivo. En concordancia, en la mina Toquepala, los volquetes mostraron menor disponibilidad mecánica precisamente en los meses con ausencia de mantenimiento preventivo y mayor tasa de horas de reparación no programada,

confirmando que una gestión preventiva insuficiente repercute directamente en la disminución de la disponibilidad mecánica.

Por otro lado, los resultados obtenidos también guardan relación con el estudio de Kumar et al. (2022), quienes demostraron que la confiabilidad y disponibilidad del sistema de pala y volquete puede incrementarse significativamente mediante un mantenimiento preventivo adecuado, alcanzando niveles de confiabilidad del 70% al 80% en distintos intervalos de tiempo. De manera similar, en las minas Toquepala y Cuajone se observó que los equipos con mayor frecuencia de mantenimiento preventivo, como las palas, presentaron niveles más altos de disponibilidad mecánica, con valores máximos de 91% y 88%, respectivamente. En contraste, los equipos con mayor carga de mantenimiento no programado, como los volquetes y cargadores frontales, registraron las disponibilidades más bajas (50–64%), evidenciando que la ejecución sistemática de mantenimiento preventivo es determinante para conservar altos niveles de operatividad.

Asimismo, los resultados de esta investigación se relacionan parcialmente con los hallazgos de Huilcas y Rojas (2025), quienes identificaron que la pérdida de tiempo efectivo en los equipos de acarreo se debía a mantenimientos frecuentes y a la falta de operadores, lo cual afectaba la productividad. En el caso de Toquepala y Cuajone, el incremento de horas de mantenimiento no programado tuvo un efecto negativo en el ciclo de minado y la disponibilidad, lo que coincide con el impacto operativo reportado por estos autores. No obstante, a diferencia de su estudio, en el presente trabajo no se evidenció influencia significativa de las variables operativas asociadas al factor de llenado, lo que indica que su efecto puede ser secundario frente a las variables de mantenimiento.

Finalmente, los resultados concuerdan con las conclusiones de Monzón (2021), quien determinó que la disponibilidad mecánica de los equipos de acarreo se ve afectada por la ineficiencia del mantenimiento preventivo y el mal estado de las vías, más que por el factor

de llenado. En el presente estudio, se comprobó estadísticamente (con un nivel de confianza del 95%) que el factor de llenado no influye significativamente en la disponibilidad mecánica, corroborando los hallazgos de Monzón. En consecuencia, se puede afirmar que la planificación y ejecución oportuna del mantenimiento preventivo constituye el principal determinante de la disponibilidad mecánica en los equipos de carguío y acarreo, mientras que los mantenimientos no programados representan la principal causa de disminución de disponibilidad y productividad en las operaciones de minería a cielo abierto.

CONCLUSIONES

1. En la presente investigación, se logró determinar los factores operacionales que influyen en la disponibilidad mecánica de los equipos de carguío y acarreo en la minería a cielo abierto, Perú - 2025. Estos factores fueron las horas de mantenimiento preventivo, de forma positiva y las horas de mantenimiento no programadas, con influencia negativa.
2. Respecto al primer objetivo específico, se determinó con un nivel de confianza de 95%, que las horas de mantenimiento preventivo influyen en la disponibilidad mecánica de los equipos de carguío y acarreo de la minería a cielo abierto en Perú. Por lo general, el impacto fue positivo, es decir, que mientras más tareas de mantenimiento preventivo se realicen, mayor disponibilidad mecánica tendrán los equipos para realizar sus funciones operativas.
3. Respecto al segundo objetivo específico, se determinó con un nivel de confianza de 95%, que las horas de mantenimiento no programado influyen en la disponibilidad mecánica de los equipos de carguío y acarreo de la minería a cielo abierto en Perú. Particularmente, el impacto es negativo, es decir, mientras más tareas de mantenimiento no programado se realicen, los equipos estarán menos disponible para realizar sus funciones operativas, lo cual afecta el ciclo de minado y la productividad general del proceso.
4. Respecto al tercer objetivo específico, se determinó que el factor de llenado no influye en la disponibilidad mecánica de los equipos de carguío y acarreo en la minería a cielo abierto, Perú; por lo que su efecto operativo resulta marginal frente a las variables de mantenimiento.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda incrementar la frecuencia y alcance de las actividades de mantenimiento preventivo, priorizando la inspección sistemática de los componentes críticos de los equipos de carguío y acarreo. Asimismo, debe implementarse una programación preventiva basada en la condición real de los equipos, apoyada en sistemas de monitoreo y diagnóstico predictivo, con el fin de maximizar la disponibilidad mecánica y reducir fallas inesperadas.
2. Es necesario analizar las causas raíz de los mantenimientos no programados y establecer planes de acción correctiva que minimicen su recurrencia. La adopción de herramientas como el Análisis de Modo y Efecto de Fallas (AMEF) y la Gestión de Mantenimiento Centrada en la Confiabilidad (RCM) permitirá reducir paradas imprevistas, mejorar la eficiencia del taller mecánico y asegurar la continuidad del ciclo de minado.
3. Se sugiere establecer indicadores clave (KPI) como *MTBF* (tiempo medio entre fallas), *MTTR* (tiempo medio de reparación) y porcentaje de cumplimiento del mantenimiento preventivo, los cuales faciliten el seguimiento continuo de la disponibilidad mecánica y permitan una toma de decisiones basada en datos.
4. La formación continua en buenas prácticas de mantenimiento, diagnóstico de fallas, operación eficiente y uso adecuado de los equipos es fundamental para mantener altos niveles de disponibilidad mecánica. Se recomienda incorporar programas de entrenamiento periódico y certificaciones técnicas orientadas al mantenimiento predictivo.
5. Dado que el factor de llenado no mostró influencia significativa en la disponibilidad mecánica, se sugiere ampliar futuras investigaciones incluyendo otras variables

operativas como la edad del equipo, la capacitación del operador, las condiciones del terreno y el tipo de mineral, para obtener un panorama más integral del comportamiento mecánico del sistema de carguío y acarreo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agencia de Sostenibilidad Energética. (2021). *Energía en Minería | Carguío* [Institucional].
<https://www.energiaenmineria.cl/procesos/carguio/>
- Alavedra-Flores, C., Gastelu-Pinedo, Y., Méndez-Orellana, G., Minaya-Luna, C., Pineda-Ocas, B., Prieto-Gilio, K., Ríos-Mejía, K., y Moreno-Rojó, C. (2016). Gestión de mantenimiento preventivo y su relación con la disponibilidad de la flota de camiones 730e Komatsu-2013. *Ingeniería Industrial*, 034, Article 034.
<https://doi.org/10.26439/ing.ind2016.n034.529>
- Ames Puellas, R. H., y Castilla Solorzano, A. B. (2021). *Análisis de factores operacionales para el incremento de la productividad en el sistema de carguío y acarreo en minera Chinalco Perú S. A. - 2021* [Tesis, Universidad Continental].
<https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/12395>
- Andrade-Solórzano, C. L., y Herrera-Suárez, M. (2021). Análisis de la situación actual del mantenimiento centrado en la confiabilidad RCM. *Revista Científica INGENIAR: Ingeniería, Tecnología e Investigación*. ISSN: 2737-6249., 4(8), Article 8.
<https://doi.org/10.46296/ig.v4i8.0021>
- Arias, J., y Covinos, M. (2021). *Diseño y Metodología de la Investigación* (1º Edición). Enfoque Consulting EIRL.
https://gc.scalahed.com/recursos/files/r161r/w26022w/Arias_S2.pdf
- Cardemil, M. (2023). *Impactos socioeconómicos de la minería en Chile* (Serie Informes N° 04-23) [Departamento de Estudios, Extensión y Publicaciones - Biblioteca del Congreso Nacional].
https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/34140/1/Informe_N_04_23_Impactos_socioeconomicos_de_la_mineria_en_Chile.pdf

- Carrasco, S. (2017). *Metodología de la investigación*. San Marcos.
- Cipriano, A., Huete, A., Ninaquispe, M., Castro, S., y Bardales, L. (2024). *Optimización y Control de la Medición de Tiempos en el Ciclo de Transporte Minero: Mejores Prácticas y Estrategias*. 289-295. <https://doi.org/10.54808/CICIC2024.01.289>
- Enkhchuluun, B., Batgerel, B.-O., y Ping, C. (2023). Cycle Time Analysis of Open Pit Mining Dump Trucks. *International Journal of Geosciences*, 14(8), Article 8. <https://doi.org/10.4236/ijg.2023.148037>
- Hernández Sampieri, R., y Mendoza Torres, C. P. (2018). *Metodología de la investigación: Las rutas: cuantitativa, cualitativa y mixta*. Mc Graw Hill educación. <http://repositorio.uasb.edu.bo/handle/54000/1292>
- Huillcas Juño, A., y Rojas Flores, R. D. (2025). *Influencia de las variables operacionales en la pérdida de tiempo efectivo en equipos de acarreo para la mejora del rendimiento operacional en la empresa MCEISA, 2024* [Tesis, Universidad Continental]. <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/17385>
- Isnaeni, K. M. A., Iskandar, I., y Sibarani, Y. P. (2022). THE TARGET ACHIEVEMENT EFFORT OF MECHANICAL AVAILABILITY AND PHYSICAL AVAILABILITY OF DOOSAN 500 LCV EXCAVATOR LOADING EQUIPMENT AT PT XYZ. *International Journal of Social Science*, 2(4), Article 4. <https://doi.org/10.53625/ijss.v2i4.4240>
- Kumar, N. S. H., Manjunath, C., John, R. P., Chand, R. P., Madhusudhana, S., y Venkatesha, B. K. (2022). Reliability, availability and maintainability study of 6.5 cubic meters shovel and 60 tone dumper in a surface limestone mine. *Materials Today: Proceedings*, 54, 199-204. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.08.292>

- Llallahui Rojas, E. (2016). *Mejoramiento de carguío y acarreo de mineral en la U.E.A mina Breapampa—Cia Minera Buenaventura S.A.A.*
<http://repositorio.unsch.edu.pe/handle/UNSCH/2188>
- López, J. (2024). *Mantenimiento Industrial para Optimización del Sector Minero* [Empresarial]. INSPENET. <https://inspenet.com/articulo/mantenimiento-industrial-en-el-sector-minero/>
- Monzón, W. (2021). *Factores operacionales que afectan la disponibilidad mecánica en los equipos de transporte de material de la E.C.M Cordeje S.A.C. – Huamachuco – La Libertad* [Tesis, Universidad Nacional de Trujillo].
<https://dspace.unitru.edu.pe/items/7fd0900e-0956-481f-928e-48c5aa3731fc>
- Quiñonez Huayhua, P., y Barreto Noa, F. D. (2024). *Análisis de las variables operacionales en equipos de acarreo para la reducción de costos de transporte de mineral en la Unidad Minera Chungar—Mina Animón, 2023* [Tesis, Universidad Continental].
<https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/14206>
- Rojas, C., y Zúñiga, C. (2022). Análisis de la actividad de carguío y transporte en minería artesanal en “El Guayabo”, Ecuador. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 14(2), 1-12.
- Seguridad Minera. (2013, octubre 10). *Minado a cielo abierto: Método de extracción mecánica*. <https://revistaseguridadminera.com/operaciones-mineras/minado-a-cielo-abierto-metodo-de-extraccion-mecanica/>
- Seguridad Minera. (2017, marzo 20). *El carguío y transporte y su relación con otras etapas de la explotación*. <https://revistaseguridadminera.com/operaciones-mineras/el-carguio-y-transporte-y-su-relacion-con-otras-etapas-de-la-explotacion/>

Tractian. (2024). *Mantenimiento no planificado: Causas y estrategias de prevención.*

TRACTIAN. <https://traction.com/es/blog/mantenimiento-no-planificado-causas-y-estrategias-de-prevencion>

Yanacocha. (2024, febrero 4). Minería a cielo abierto: Fundamentos, ventajas y desafíos.

Yanacocha: Minería en Cajamarca que respeta el medio ambiente.

<https://www.yanacocha.com.pe/mineria-a-cielo-abierto/>

ANEXOS

Anexo 1. Matriz de consistencia

Problemas	Objetivos	Hipótesis	Variables	Metodología
General	General			
¿Cuáles son los factores operacionales que influyen en la disponibilidad mecánica de los equipos de carguío y acarreo en la minería a cielo abierto, Perú - 2025?	Determinar los factores operacionales que influyen en la disponibilidad mecánica de los equipos de carguío y acarreo en la minería a cielo abierto, Perú - 2025.	Existen factores operaciones que influyen en la disponibilidad mecánica de los equipos de carguío y acarreo en la minería a cielo abierto, Perú - 2025	Variable independiente: Factores operacionales Indicador: <i>horas de mantenimiento preventivo</i> <i>Horas de mantenimiento no programado</i> <i>Factor de llenado</i> Variable dependiente: Disponibilidad mecánica Indicador: <i>Horas de operación</i> <i>Horas de mantenimiento</i>	Tipo de investigación: Aplicada - cuantitativa Diseño: No experimental - correlacional Población y muestra: Equipos de carguío y acarreo Técnica e instrumento de recolección: observación directa Análisis documental Guías de observación Técnicas de análisis: Estadística descriptiva Técnicas de correlación
Específicos	Específicos	Específicas		
¿Las horas de mantenimiento preventivo influyen en la disponibilidad mecánica de los equipos de carguío y acarreo en la minería a cielo abierto, Perú - 2025	Determinar si las horas de mantenimiento preventivo influyen en la disponibilidad mecánica de los equipos de carguío y acarreo en una unidad minera ubicada en Moquegua - 2025	Las horas de mantenimiento preventivo influyen significativamente en la disponibilidad mecánica de los equipos de carguío y acarreo en la minería a cielo abierto, Perú - 2025		
¿Las horas de mantenimiento no programado influyen en la disponibilidad mecánica de los equipos de carguío y acarreo en la minería a cielo abierto, Perú - 2025	Determinar si las horas de mantenimiento no programado influyen en la disponibilidad mecánica de los equipos de carguío y acarreo en una unidad minera ubicada en Moquegua - 2025	Las horas de mantenimiento no programado influyen significativamente en la disponibilidad mecánica de los equipos de carguío y acarreo en la minería a cielo abierto, Perú - 2025		
¿El factor de llenado en el carguío influye en la disponibilidad mecánica de los equipos de carguío y acarreo en la minería a cielo abierto, Perú - 2025	Determinar si el factor de llenado en el carguío influye en la disponibilidad mecánica de los equipos de carguío y acarreo en la minería a cielo abierto, Perú - 2025	El factor de llenado en el carguío influye significativamente en la disponibilidad mecánica de los equipos de carguío y acarreo en la minería a cielo abierto, Perú - 2025		

Anexo 2. Instrumentos de recolección de datos

Ficha de datos para el factor de llenado de volquetes							
$\text{Factor de llenado (\%)} = \frac{\text{Volumen real cargado}}{\text{Capacidad del volquete}} \times 100$							
Unidad minera:							
Fecha	Código Volquete	Modelo	Ciclo (ida y vuelta)	Tonelaje transportado	Capacidad del volquete (m³)	Volumen transporta (m³)	Factor de llenado (%)

Ficha de datos para el factor de llenado palas cargadoras y cargadores frontales

$$\text{Factor de llenado (\%)} = \frac{\text{Volumen real cargado}}{\text{Volumen nomina del balde}} \times 100$$
[illegible]

Ficha de disponibilidad mecánica de los equipos				
Unidad minera:				
$DM(\%) = \frac{\text{tiempo de operación}}{\text{Tiempo de operación} + \text{tiempo de avería}} \times 100$				
Equipo:			Período (año):	
Modelo:			Código:	
Mes	Horas	Tiempo de operación (h)	Tiempo de reparación o averiado (h)	%DM

Ficha de datos de mantenimientos				
Unidad minera:				
Equipo:			Período:	
Modelo:		Código:		
Mes	Horas de mantenimiento preventivo		Horas de mantenimiento programado	

Anexo 3. Base de datos

Ficha de datos de mantenimiento - Toquepala			
Equipo	VOLQUETE	Periodo (Año)	2024
Modelo	Komatsu 930E-4	Código	VQT31
MES	Horas de mantenimiento no programado	Horas de mantenimiento Preventivo	
ENERO	92	22	
FEBRERO	56	13	
MARZO	88	14	
ABRIL	156	17	
MAYO	219	14	
JUNIO	484	2	
JULIO	156	22	
AGOSTO	233	50	
SEPTIEMBRE	213	4	
OCTUBRE	744	0	
NOVIEMBRE	720	0	
DICIEMBRE	744	0	

Ficha de datos de mantenimiento - Toquepala			
Equipo	PALA	Periodo (Año)	2024
Modelo	Pala P&H 4100A	Código	S04
MES	Horas de mantenimiento no programado	Horas de mantenimiento Preventivo	
ENERO	29	30	
FEBRERO	84	26	
MARZO	124	24	
ABRIL	39	63	
MAYO	47	12	
JUNIO	54	27	
JULIO	55	30	
AGOSTO	85	48	
SEPTIEMBRE	230	3	
OCTUBRE	21	39	
NOVIEMBRE	26	46	
DICIEMBRE	39	55	

Ficha de datos de mantenimiento - Toquepala			
Equipo	CARGADOR DE RUEDAS	Periodo (Año)	2024
Modelo	LeTernau 2350	Código	S96
MES	Horas de mantenimiento no programado	Horas de mantenimiento Preventivo	
ENERO	92	175	
FEBRERO	45	14	
MARZO	104	41	
ABRIL	71	56	
MAYO	55	57	
JUNIO	121	66	
JULIO	45	91	
AGOSTO	50	43	
SEPTIEMBRE	228	22	
OCTUBRE	71	56	
NOVIEMBRE	83	43	
DICIEMBRE	42	84	

Ficha de datos de mantenimiento - Cuajone			
Equipo	VOLQUETE	Periodo (Año)	2024
Modelo	Komatsu 980E-4	Código	V163
MES	Horas de mantenimiento no programado	Horas de mantenimiento preventivo	
ENERO	141	24	
FEBRERO	98	64	
MARZO	154	23	
ABRIL	74	5	
MAYO	79	21	
JUNIO	212	18	
JULIO	65	12	
AGOSTO	65	14	
SEPTIEMBRE	41	21	
OCTUBRE	44	17	
NOVIEMBRE	106	6	
DICIEMBRE	56	23	

Ficha de datos de mantenimiento - Cuajone			
Equipo	PALA	Periodo (Año)	2024
Modelo	Pala P&H 2800XPB	Código	P01
MES	Horas de mantenimiento no programado	Horas de mantenimiento preventivo	
ENERO	45	50	
FEBRERO	21	21	
MARZO	17	12	
ABRIL	5	24	
MAYO	40	12	
JUNIO	20	23	
JULIO	23	163	
AGOSTO	78	21	
SEPTIEMBRE	18	12	
OCTUBRE	17	11	
NOVIEMBRE	37	33	
DICIEMBRE	10	52	

Ficha de datos de mantenimiento - Cuajone			
Equipo	CARGADOR DE RUEDAS LT	Periodo (Año)	2024
Modelo	Komatsu WE-1850 GIII	Código	LT03
MES	Horas de mantenimiento no programado	Horas de mantenimiento preventivo	
ENERO	313	12	
FEBRERO	103	54	
MARZO	34	31	
ABRIL	97	56	
MAYO	19	43	
JUNIO	34	37	
JULIO	22	77	
AGOSTO	9	53	
SEPTIEMBRE	26	39	
OCTUBRE	14	60	
NOVIEMBRE	62	48	
DICIEMBRE	111	34	

Ficha de disponibilidad mecánica de equipo - Toquepala			
Equipo	VOLQUETE	Periodo (Año)	2024
Modelo	Komatsu 930E-4	Código	VQT31
MES	Tiempo de operación (h)	Tiempo de reparación (h)	% DM
ENERO	520	113	82%
FEBRERO	521	69	88%
MARZO	537	101	84%
ABRIL	454	173	72%
MAYO	433	233	65%
JUNIO	197	486	29%
JULIO	483	177	73%
AGOSTO	352	283	55%
SEPTIEMBRE	363	218	63%
OCTUBRE	0	744	0%
NOVIEMBRE	0	720	0%
DICIEMBRE	0	744	0%

Ficha de disponibilidad mecánica de equipo - Toquepala			
Equipo	PALA	Periodo (Año)	2024
Modelo	Pala P&H 4100A	Código	S04
MES	Tiempo de operación (h)	Tiempo de reparación (h)	% DM
ENERO	588	59	91%
FEBRERO	496	110	82%
MARZO	501	148	77%
ABRIL	539	102	84%
MAYO	599	59	91%
JUNIO	560	81	87%
JULIO	570	85	87%
AGOSTO	534	133	80%
SEPTIEMBRE	417	233	64%
OCTUBRE	591	60	91%
NOVIEMBRE	558	71	89%
DICIEMBRE	562	94	86%

Ficha de disponibilidad mecánica de equipo - Toquepala			
Equipo	CARGADOR DE RUEDAS	Periodo (Año)	2024
Modelo	LeTernau 2350	Código	S96
MES	Tiempo de operación (h)	Tiempo de reparación (h)	% DM
ENERO	379	267	59%
FEBRERO	447	60	88%
MARZO	428	145	75%
ABRIL	448	127	78%
MAYO	516	111	82%
JUNIO	446	187	70%
JULIO	474	136	78%
AGOSTO	521	93	85%
SEPTIEMBRE	295	251	54%
OCTUBRE	502	127	80%
NOVIEMBRE	480	127	79%
DICIEMBRE	493	127	80%

Ficha de disponibilidad mecánica de equipo - Cuajone			
Equipo	VOLQUETE	Periodo (Año)	2024
Modelo	Komatsu 980E-4	Código	V163
MES	Tiempo de operación (h)	Tiempo de reparación (h)	% DM
ENERO	476	165	74%
FEBRERO	437	163	73%
MARZO	477	176	73%
ABRIL	538	79	87%
MAYO	556	100	85%
JUNIO	409	230	64%
JULIO	566	77	88%
AGOSTO	547	79	87%
SEPTIEMBRE	551	62	90%
OCTUBRE	576	61	90%
NOVIEMBRE	510	112	82%
DICIEMBRE	552	79	88%

Ficha de disponibilidad mecánica de equipo - Cuajone			
Equipo	PALA	Periodo (Año)	2024
Modelo	Pala P&H 2800XPB	Código	P01
MES	Tiempo de operación (h)	Tiempo de reparación (h)	% DM
ENERO	507	95	84%
FEBRERO	515	41	93%
MARZO	477	29	94%
ABRIL	511	29	95%
MAYO	569	52	92%
JUNIO	569	42	93%
JULIO	440	186	70%
AGOSTO	533	99	84%
SEPTIEMBRE	565	30	95%
OCTUBRE	553	28	95%
NOVIEMBRE	298	70	81%
DICIEMBRE	532	61	90%

Ficha de disponibilidad mecánica de equipo - Cuajone			
Equipo	CARGADOR DE RUEDAS LT	Periodo (Año)	2024
Modelo	Komatsu WE-1850 GIII	Código	LT03
MES	Tiempo de operación (h)	Tiempo de reparación (h)	% DM
ENERO	330	325	50%
FEBRERO	440	157	74%
MARZO	527	65	89%
ABRIL	449	152	75%
MAYO	543	62	90%
JUNIO	522	70	88%
JULIO	534	98	84%
AGOSTO	565	63	90%
SEPTIEMBRE	497	65	88%
OCTUBRE	549	74	88%
NOVIEMBRE	494	111	82%
DICIEMBRE	483	145	77%

Base de datos del factor de llenado promedio mensual en el período enero – diciembre de 2024

Toquepala

Mes	Volquete	Pala	Cargador frontal
Enero	98.74	96.15	73.75
Febrero	98.40	91.85	71.06
Marzo	98.28	93.78	69.71
Abril	98.60	94.41	71.54
Mayo	98.82	92.14	74.69
Junio	98.55	93.00	75.08
Julio	98.52	91.74	72.15
Agosto	98.28	96.19	70.84
Setiembre	98.44	89.60	69.54
Octubre	98.54	95.68	72.10
Noviembre	98.45	89.90	76.33
Diciembre	98.28	88.47	75.63

Cuajone

Factor de llenado (%)			
Mes	Volquete	Pala	Cargador de ruedas
Enero	99.88	76.49	69.38
Febrero	99.82	79.10	67.94
Marzo	99.75	79.87	67.01
Abril	99.72	81.56	68.89
Mayo	99.71	78.80	69.12
Junio	99.70	79.56	67.84
Julio	99.78	78.77	66.96
Agosto	100.00	82.49	68.32
Setiembre	99.71	79.84	69.14
Octubre	99.70	80.31	67.94
Noviembre	99.71	77.24	66.93
Diciembre	99.70	80.13	69.88

Anexo 4. Reemplazamiento de equipo

Ítem	Descripción
Equipo evaluado	Volquete Komatsu 930 E-4
Disponibilidad mecánica	Baja, por debajo del nivel esperado
Frecuencia de fallas	Alta incidencia de fallas no programadas
Tipo de fallas	Llantas, motor diésel, sistema hidráulico
Mantenimiento	Alto mantenimiento correctivo
Impacto operativo	Paradas frecuentes y pérdida de productividad
Costo mantenimiento anual (estimado)	Alto (reparaciones + paradas)
Costo por pérdida de producción	Elevado por tiempos de inactividad
Costo de reemplazo	Alto (inversión inicial en miles de dólares)
Evaluación técnica	Baja confiabilidad y alto desgaste del equipo
Evaluación económica	Costos acumulados de mantenimiento + pérdidas operativas elevados

Indicador Económico	Descripción
Ahorro estimado anual	Reducción de costos por menor mantenimiento y menor tiempo de parada
Retorno de inversión	Positivo a mediano plazo debido a reducción de costos operativos
Periodo de recuperación	Mediano plazo (dependiendo del costo del equipo)
Costo total de propiedad	Menor en el nuevo equipo frente al actual a largo plazo

Tal como se describe en la tabla anterior, a pesar del alto costo inicial de reemplazo, los indicadores económicos muestran que la inversión se justifica debido a la reducción de fallas, disminución de costos de mantenimiento y mejora en la disponibilidad mecánica, lo que impacta positivamente en la productividad.