



Universidad Católica de Santa María

Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales

Escuela Profesional de Ingeniería de Minas

**Reducción de los tiempos de demoras de los equipos de carguío y acarreo
para aumentar la producción por guardia y generar una disminución en el
costo de sus procesos en una unidad minera de Cajamarca**

Tesis presentada por:

Ramos Diaz, Jaime Enrique

ORCID: 0009-0009-9792-3074

para optar el Título Profesional de Ingeniero de Minas

Asesor:

Mg. Ticona Corrales, Sergio

ORCID: 0000-0002-7221-6172

Arequipa - Perú

2026

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

INGENIERIA DE MINAS

TITULACIÓN CON TESIS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 30 de Junio del 2026

Dictamen: 017989-C-EPIM-2026

Visto el borrador del expediente 017989, presentado por:

2019200341 - RAMOS DIAZ JAIME ENRIQUE

Titulado:

**REDUCCIÓN DE LOS TIEMPOS DE DEMORAS DE LOS EQUIPOS DE CARGUÍO Y ACARREO PARA
AUMENTAR LA PRODUCCIÓN POR GUARDIA Y GENERAR UNA DISMINUCIÓN EN EL COSTO DE
SUS PROCESOS EN UNA UNIDAD MINERA DE CAJAMARCA.**

Nuestro dictamen es:

APROBADO

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

INGENIERO DE MINAS

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



**40379481 - PAREDES SALAS OMAR WILLY
DICTAMINADOR**



**29635304 - MORALES VALDIVIA JAVIER ANTONIO
DICTAMINADOR**



REDUCCIÓN DE LOS TIEMPOS DE DEMORAS DE LOS EQUIPOS DE CARGUÍO Y ACARREO PARA AUMENTAR LA PRODUCCIÓN POR GUARDIA Y GENERAR UNA DISMINUCIÓN EN EL COSTO DE SUS PROCESOS EN UNA UNIDAD MINERA DE CAJAMARCA

INFORME DE ORIGINALIDAD

13%

INDICE DE SIMILITUD

12%

FUENTES DE INTERNET

3%

PUBLICACIONES

7%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	Submitted to Universidad Católica de Santa María Trabajo del estudiante	2%
2	repositorio.ucsm.edu.pe Fuente de Internet	2%
3	plakauto.fr Fuente de Internet	1%
4	Submitted to Organisation et Développement Trabajo del estudiante	1%
5	hdl.handle.net Fuente de Internet	1%
6	www.projectasgard.com Fuente de Internet	<1%
7	repositorioacademico.upc.edu.pe Fuente de Internet	<1%
8	ciatec.repositorioinstitucional.mx Fuente de Internet	<1%
9	repositorio.unc.edu.pe Fuente de Internet	<1%
10	dspace-uh-tmp.igniteonline.la Fuente de Internet	<1%
11	Submitted to Pontificia Universidad Catolica del Peru Trabajo del estudiante	<1%
12	repositorio.uflo.edu.ar Fuente de Internet	<1%
13	dokumen.pub Fuente de Internet	<1%
14	www.coursehero.com Fuente de Internet	<1%

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mis padres, Ruth y Jesús, por su amor, sacrificio, esfuerzo constante y apoyo incondicional a lo largo de mi vida. Gracias por brindarme las herramientas, valores y oportunidades necesarias para alcanzar cada una de mis metas y por acompañarme en cada paso de mi formación personal y profesional.

A mis abuelitos maternos, Miguel y Ruth, por sus enseñanzas, consejos y por ser un ejemplo de trabajo, perseverancia y amor familiar. Su guía y apoyo han sido fundamentales en mi crecimiento y en la persona que soy hoy.

Este logro es el resultado del cariño, confianza y dedicación que siempre me han brindado. Con profundo agradecimiento, les dedico este trabajo, porque sin ustedes este sueño no habría sido posible.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a mis abuelitos maternos, Miguel y Ruth, por haber estado siempre a mi lado brindándome su apoyo incondicional, sus consejos y su cariño en cada etapa de mi vida. Gracias por guiarme con sus enseñanzas, motivarme a seguir adelante y pautarme siempre por el mejor camino. Este logro también es parte de ustedes, por todo el esfuerzo, confianza y amor que me han dado a lo largo de mi formación personal y profesional.

Asimismo, expreso mi más sincero agradecimiento a mi familia en general, especialmente a mis padres, Ruth y Jesús, por su sacrificio, comprensión y apoyo constante durante toda mi carrera universitaria. Gracias por confiar siempre en mí y por impulsarme a alcanzar cada una de mis metas. De igual manera, agradezco a mis hermanos, Miguel y Gianela, por acompañarme, motivarme y ser parte importante de este camino. Sin el apoyo de cada uno de ustedes, este logro no habría sido posible.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación se desarrolló con el propósito fundamental de optimizar las operaciones unitarias de carguío y acarreo en la Unidad Minera de Cajamarca. La investigación aborda la problemática estructural de los elevados tiempos de demoras operativas y no operativas. El objetivo central consistió en incrementar la producción de mineral por guardia en un margen proyectado del 3% al 5% y, consecuentemente, lograr una disminución tangible en el costo operativo de los procesos, expresado en dólares por tonelada (\$/t), mediante la mitigación sistemática de las interrupciones en el ciclo de trabajo de la flota pesada.

Para lograr esta meta, se utilizó un método cuantitativo explicativo-correlacional basado en un diseño experimental longitudinal. La investigación se fundamentó en el empleo de la filosofía Lean Six Sigma, que se organiza a través de su ciclo DMAIC (Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar). En la etapa de diagnóstico estadístico, se concluyó que el 63% del total de las ineficiencias en el sistema eran retrasos no operativos.

Con base en el análisis causal, se implementaron controles operacionales estrictos, destacando la estandarización del reporte de demoras, la reestructuración logística para relevos en caliente y el monitoreo dinámico mediante paneles de Business Intelligence (Power BI). La contrastación de la hipótesis y la validación del modelo experimental evidenciaron una reducción estadísticamente significativa de los tiempos muertos, maximizando la utilización efectiva de los volquetes y excavadoras. Se concluye que la integración de estrategias de mejora continua en el despacho minero no solo maximiza los volúmenes de extracción diaria, sino que resulta imperativa para salvaguardar la rentabilidad y viabilidad económica del yacimiento.

Palabras clave: Reducción, producción, optimización.

ABSTRACT

This research project was developed with the fundamental purpose of optimizing the unit operations of loading and hauling at the Shahuindo Mining Unit. The research addresses the structural problem of high operational and non-operational downtime. The central objective was to increase ore production per shift by a projected 3% to 5% and, consequently, achieve a tangible reduction in the operating cost of the processes, expressed in dollars per ton (\$/t), through the systematic mitigation of interruptions in the heavy equipment fleet's work cycle.

To achieve this objective, a quantitative methodological approach of an explanatory-correlational level was adopted, supported by a longitudinal experimental design. The core of the research was based on the application of the Lean Six Sigma philosophy, structured through its DMAIC cycle (Define, Measure, Analyze, Improve, and Control). During the statistical diagnostic phase, it was determined that non-operational delays constituted 63% of the total system inefficiencies. The most critical variables identified were the traditional shift change, temporary operator shortages, and travel times, which resulted in a highly deficient initial Sigma level of 0.12.

Based on the causal analysis, strict operational controls were implemented, including standardized delay reporting, logistical restructuring for live shift changes, and dynamic monitoring using Business Intelligence dashboards (Power BI). Hypothesis testing and validation of the experimental model demonstrated a statistically significant reduction in downtime, maximizing the effective utilization of dump trucks and excavators. It is concluded that integrating continuous improvement strategies into mine dispatch not only maximizes daily extraction volumes but is also imperative to safeguard the profitability and economic viability of the mine.

Keywords: Reduction, production, optimization.

ÍNDICE

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I.....	2
1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN	2
1.1. Planteamiento del Problema.....	2
1.2. Objetivos de la Investigación.....	3
1.2.1 General.....	3
1.2.2 Específicos.....	3
1.3. Preguntas de Investigación.....	3
1.3.1 General.....	3
1.3.2 Específicos.....	4
1.4. Línea de Investigación	4
1.5. Solución Propuesta.....	5
1.5.1 Justificación e Importancia.....	5
CAPÍTULO II	8
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	8
2.1. Estado del arte.....	8
2.1.1 A Nivel Internacional.....	8
2.1.2 A Nivel Nacional.	8
2.1.3 A Nivel Local.....	9
2.2. Bases Teóricas de la Investigación.....	9

2.2.1	Fragmentación del mineral	9
2.2.2	Voladura.....	10
2.2.3	Sistema ROM (Run of Mine)	10
2.2.4	Pad de lixiviación	10
2.2.5	Eficiencia operativa y Sistema de Despacho	11
2.2.6	Integración de los factores operacionales en el ciclo de carguío y acarreo	11
2.3.	Hipótesis de investigación	12
2.3.1	Hipótesis general de investigación	12
2.3.2	Hipótesis específica	13
2.4.	Variable	13
2.4.1	Variable independiente:	13
2.4.2	Variable dependiente:	13
2.4.3	Operacionalización de variables	14
CAPÍTULO III		15
3.	MARCO METODOLÓGICO	15
3.1.	Alcances y Limitaciones	15
3.1.1	Alcances del Proyecto	15
3.1.2	Limitaciones	15
3.2.	Tipo y nivel de la Investigación	16
3.2.1	Tipo de Investigación	16
3.2.2	Nivel de Investigación	16
3.2.3	Diseño de investigación.....	16
3.3.	Población y Muestra o Universo	17
3.3.1	Población	17
3.3.2	Muestra	17

3.3.3 Criterio.....	17
3.4. Métodos, Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos	17
3.4.1 Métodos	17
3.4.2 Técnicas de Recolección de Datos	17
3.5. Plan de análisis de datos.....	18
3.5.1 Técnicas de análisis de datos.	18
3.6. Dimensiones de Lean Six Sigma	18
3.7. Procedimiento de la investigación	19
CAPÍTULO IV	21
4. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	21
4.1. Análisis de las variables operacionales	21
4.2. Estudio de factibilidad	21
4.2.1 Análisis PESTEL	21
4.2.2 Análisis FODA	23
4.3. Preparación.....	24
4.3.1 Estructura organizacional	24
4.3.2 Mapa de procesos	24
4.3.3 Diagrama de flujo	26
4.3.4 Diagrama de pareto.....	27
4.4. Aplicación de Lean Six Sigma.....	28
4.4.1 Definir.....	28
4.4.2 Medir	29
4.4.3 Analizar	44
4.4.4 Mejorar	49
4.4.5 Controlar.....	84

CONCLUSIONES	92
RECOMENDACIONES	94
REFERENCIAS	95

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Variables operacionales	14
Tabla 2. Demoras en horas/guardia para cada volquete	34
Tabla 3. Tabla de demoras central mina	37
Tabla 4. Tabla de demoras por tipo	38
Tabla 5. Análisis de demoras fijas	42
Tabla 6. Whys de cambio de turno	47
Tabla 7. Whys de falta de operador	47
Tabla 8. Whys de cambio de guardia	48
Tabla 9. Whys de condiciones climáticas.....	48
Tabla 10. Whys de equipo no programado	49
Tabla 11. Whys de otras demoras	49
Tabla 12. DNO & Kpis's de central mina	51
Tabla 13. DNO & Kpis's de central mina	53
Tabla 14. Inicio y fin de guardia.....	56
Tabla 15. Escenario con mejora en cambio de turno (reducción 30 min)	57
Tabla 16. Horas disminuidas al contar con 3 operadores a retén por guardia.....	61
Tabla 17. Escenario con 1 Operador a retén por guardia	62
Tabla 18. Escenario con 2 Operadores a retén por guardia	63
Tabla 19. Escenario con 3 Operadores a retén por guardia	64
Tabla 20. Escenario con mejora por cambio de guardia.....	69
Tabla 21. Escenario con mejora por cambio de guardia.....	74
Tabla 22. Resumen del nivel sigma y capacidad del proceso	76
Tabla 23. Data para el cálculo de nivel sigma después de las mejoras	76
Tabla 24. Resumen de demoras para volquetes.....	83

Tabla 25. Tabla de demoras por tipo	86
Tabla 26. Tabla de demoras por tipo	88
Tabla 27. Tabla de demoras por tipo	89
Tabla 28. Tabla de demoras por tipo	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructura organizacional.....	24
Figura 2. Mapa de procesos.....	25
Figura 3. Diagrama de Flujo – Proceso explotación mina a tajo abierto	26
Figura 4. Diagrama de pareto de los costos de mina.....	27
Figura 5. Matriz QFD.....	28
Figura 6. Mapa de sub proceso explotación mina a tajo abierto – carguío, acarreo y descarga	30
Figura 7. Diagrama de Flujo – Sub Procesos Explotación de mina a tajo abierto - Carguío, Acarreo y Descarga.....	31
Figura 8. Diagrama de Ishikawa	32
Figura 9. Dashboard de demoras de volquetes.....	33
Figura 10. Pareto de Demoras de Volquetes.....	34
Figura 11. Distribución de Demoras Totales	35
Figura 12. Demoras por turno: operativas y no operativas.....	39
Figura 13. Demoras operativas y no operativas de los CV	39
Figura 14. Teste de Normalidad Anderson - Darling	40
Figura 15. Transformación de Jhonson	41
Figura 16. Capacidad del proceso del caso base	43
Figura 17. Nivel sigma del caso base.....	44
Figura 18. Clasificación de demoras	45
Figura 19. Diagrama de pareto de demoras no operativas	46
Figura 20. Tonelaje programado vs ejecutado por mes.....	52
Figura 21. Demoras por cambio de turno por mes y por guardia.....	54
Figura 22. Demoras por cambio de turno, guardia y por equipo	55

Figura 23. Demoras por cambio de turno, por guardia y por equipo	55
Figura 24. Nivel sigma después de la mejora por cambio de turno	58
Figura 25. Capacidad del proceso después de las tres mejoras	58
Figura 26. Demoras por falta de operador.....	59
Figura 27. Operadores faltantes por día	60
Figura 28. Promedio mensual de operadores faltantes por día	60
Figura 29. Nivel sigma después de la mejora por falta de operador	65
Figura 30. Capacidad de proceso después de la mejora por falta de operador	66
Figura 31. Demoras por cambio de guardia	67
Figura 32. Demoras por cambio de guardia	67
Figura 33. Demora promedio por volquete por cambio de guardia	68
Figura 34. Nivel sigma después de la mejora por cambio de guardia.....	70
Figura 35. Capacidad del proceso después de la mejora.....	70
Figura 36. DNOP por condiciones climáticas	71
Figura 37. Demora por equipo no programado	72
Figura 38. Nivel sigma después de las tres mejoras.....	75
Figura 39. Capacidad de proceso después de las tres mejoras	75
Figura 40. Budget 2025 – Caso Base	80
Figura 41. Budget 2025 con las mejoras e incremento de 4% en las tmh.....	81
Figura 42. Resumen de variaciones del escenario propuesto vs el caso base	82
Figura 43. Plan de Control	84
Figura 44. Árbol de decisión para gráfico de control.....	85
Figura 45. Gráfico XmR para control diario de DNOP	88
Figura 46. Gráfico $\bar{X}$ and s para control semanal de DNOP	91

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Encuesta de Kano	98
Anexo 2. Encuesta sobre disponibilidad de operadores en días libres.....	99

INTRODUCCIÓN

La actual inestabilidad económica obliga a una optimización extrema de la eficiencia minera a cielo abierto, donde acarreo y carguío pueden llegar a significar hasta el 50% de los costos operativos (OPEX). La presente investigación se basa en la siguiente premisa, la misma que se centra en la ineficiencia logística identificada en una unidad minera de Cajamarca. El sistema Dispatch se estudia y se llega a la conclusión de que existe un alto índice de retrasos no operativos (traslados, relevos largos y ausencia de operadores).

Para contrarrestar esta inestabilidad, el estudio aplica la metodología Lean Six Sigma. Mediante el rigor estadístico del ciclo DMAIC, donde se busca erradicar el desperdicio operativo (Muda) e identificar las causas raíz de las interrupciones, sustituyendo la intuición por evidencia empírica. El objetivo central es implementar mejoras sistémicas que incrementen la producción diaria entre un 3% y 5%, diluyendo costos fijos y consolidando un modelo analítico extrapolable para la optimización minera en el Perú.

CAPÍTULO I

1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Planteamiento del Problema

La viabilidad económica de la minería a cielo abierto está directamente relacionada con la eficiencia del subsistema de acarreo y carguío. Las operaciones de este subsistema concentran entre el 40% y el 50% de los costos operativos y controlan el ritmo productivo del yacimiento. Por lo tanto, cualquier desvío logístico que afecte el ciclo de la flota pesada, puede afectar en gran medida la rentabilidad corporativa.

Sobre esta base, el estudio empírico de los indicadores clave de desempeño en una unidad minera de Cajamarca, obtenidos del sistema Dispatch, dio cuenta de un problema estructural: el uso insuficiente del tiempo nominal por interrupciones continuas. El análisis de los informes muestra una crítica severa y constante sobre las paradas no operativas. Algunas actividades rutinarias, como los relevos prolongados, la logística de movimientos en la mina, las pausas para comer y el déficit puntual de operadores se combinan de manera sistemática y restan un promedio de tres horas de trabajo efectivo por guardia.

Esta reducción del tiempo operativo tiene un efecto directo y proporcional en el tonelaje total movilizado. La disminución de la productividad por hora en los equipos primarios como las excavadoras y los volquetes, comparada con la inflexibilidad de los costos fijos relacionados con la operación, provoca un aumento ineludible en el costo unitario de producción (\$/t). Si no se actúa y se normaliza esta variabilidad, la organización afronta el peligro de que sus márgenes de utilidad se vayan erosionando de manera progresiva, así como el riesgo concreto de poner en práctica sus planes mineros a corto y medio plazo.

1.2. Objetivos de la Investigación

1.2.1 General

- Incrementar la producción de mineral y desmonte por guardia en un margen proyectado del 3% al 5%, logrando una reducción fehaciente en el costo operativo de los procesos de carguío y acarreo (\$/t) en la Unidad Minera de Cajamarca, a través de la mitigación analítica e implementación de controles sobre los tiempos de demoras operativas y no operativas.

1.2.2 Específicos

- Determinar exactamente cuánto se están retrasando las cosas, analizando con estadística los datos históricos que se han recogido del sistema de control de la flota, para poder diagnosticar cómo están actualmente los tiempos del ciclo de acarreo y carguío.
- Creación y ejecución de soluciones de ingeniería operacional con la metodología Lean Six Sigma, orientadas a estandarizar los procesos, por ejemplo estableciendo relevos en caliente o mejorando los informes de retrasos.
- Para comprobar que el modelo es sostenible, se debe examinar técnica y económicamente el efecto de las mejoras puestas en marcha, comparando la capacidad del proceso y el nivel Sigma antes y después de la intervención.

1.3. Preguntas de Investigación

1.3.1 General

- ¿De qué manera la optimización y reducción sistemática de los tiempos de demora en los equipos de carguío y acarreo influye en el incremento del tonelaje producido por guardia y en la consecuente disminución de los costos operativos (\$/t) dentro de la Unidad Minera de Cajamarca?

1.3.2 Específicos

- ¿Cuáles son las deficiencias organizacionales y logísticas de mayor incidencia que configuran los tiempos muertos y las demoras no operativas actuales en el frente de minado?
- ¿Cómo impacta la variabilidad temporal de los ciclos de trabajo en la disponibilidad física y en la utilización efectiva de la maquinaria pesada?
- ¿En qué medida la adopción de los principios estructurales de Lean Six Sigma permite establecer un control sostenido sobre los parámetros de productividad de la flota?

1.4. Línea de Investigación

El presente estudio se inscribe rigurosamente en la línea de "Optimización y Gestión de Operaciones Mineras". La disciplina aborda la ingeniería de métodos, la aplicación de modelos estadísticos para la mejora continua y la administración estratégica de activos físicos en yacimientos a cielo abierto.

Palabras clave en español:

- Reducción
- Producción
- Optimización

Keywords in English:

- Reducción
- Production
- Optimization

1.5. Solución Propuesta

La investigación plantea la incorporación de la metodología Lean Six Sigma como elemento clave para resolver la ineficiencia identificada, ya que esta metodología, a diferencia de las intervenciones empíricas convencionales, ofrece una estructura para resolver problemas que está gobernada por datos empíricos, para lo cual se utilizará el ciclo DMAIC para trazar el flujo de valor del procedimiento de movimiento de tierras, concretándose la propuesta mediante la reestructuración logística de los cambios de guardia en donde se aplican estrategias de despacho dinámico, optimización de las rutas de traslado del personal y una rigurosa parametrización de las horas para refrigerio.

1.5.1 Justificación e Importancia

La presente investigación se justifica por la necesidad de optimizar los procesos de carguío y acarreo en operaciones mineras a cielo abierto, debido a que estos constituyen actividades críticas dentro de la cadena productiva minera y tienen una influencia directa sobre la productividad, los costos operativos y el cumplimiento del planeamiento de producción. En un contexto donde la industria minera enfrenta mayores exigencias en términos de eficiencia operacional, sostenibilidad y competitividad, resulta fundamental desarrollar estrategias orientadas a la reducción de pérdidas operativas y al aprovechamiento eficiente de los recursos disponibles.

En la minería a cielo abierto, los sistemas de carguío y acarreo representan los principales componentes del proceso de movimiento de materiales, determinando la continuidad y eficiencia del ciclo productivo. Según Hustrulid y Kuchta (2013), las variaciones en los tiempos asociados a estos procesos pueden generar impactos significativos en las etapas posteriores de la operación minera, como el abastecimiento a planta concentradora o a instalaciones de lixiviación. En este sentido, la reducción de tiempos improductivos y la mejora

de la coordinación entre equipos de carguío y transporte permiten incrementar la estabilidad operacional mediante una adecuada relación entre la capacidad de carga y la flota de acarreo, conocida como *Match Factor*. De esta manera, es posible alcanzar una operación más eficiente y alineada con los objetivos establecidos en el planeamiento minero de corto plazo (Burt & Caccetta, 2014).

Desde una perspectiva económica, la importancia de esta investigación radica en que las actividades de carguío y acarreo representan una proporción significativa de los costos operativos en minería superficial. Diversos estudios señalan que estos procesos pueden concentrar aproximadamente entre el 45 % y el 60 % de los costos totales de operación minera (Darling, 2011; Erçelebi & Başçetin, 2009). Por ello, la identificación y reducción de tiempos improductivos permite incrementar las horas efectivas de operación sin requerir necesariamente inversiones adicionales en adquisición de equipos. Esta mejora en la utilización de la capacidad instalada contribuye a disminuir los costos unitarios de producción, expresados en términos de costo por tonelada (\$/t), favoreciendo la eficiencia económica y la sostenibilidad financiera de la operación.

Asimismo, la investigación adquiere relevancia metodológica debido a la aplicación de la filosofía Lean Six Sigma como herramienta para la identificación, análisis y reducción de pérdidas operacionales. Si bien este enfoque ha sido ampliamente utilizado en sectores industriales orientados a la mejora continua, su aplicación sistemática en operaciones mineras representa una oportunidad para fortalecer la gestión basada en datos. Mediante la metodología DMAIC (*Define, Measure, Analyze, Improve, Control*) y el uso de herramientas estadísticas para el control y mejora de procesos, es posible transformar la información generada por los sistemas de despacho minero en conocimiento útil para la toma de decisiones operacionales (Pyzdek & Keller, 2014).

En consecuencia, la presente investigación posee importancia práctica, económica y metodológica, debido a que proporciona un modelo de análisis orientado a mejorar la eficiencia del sistema de carguío y acarreo mediante la reducción de demoras no operativas y la optimización del uso de los equipos disponibles. Además, sus resultados pueden constituir un referente para futuras investigaciones relacionadas con la aplicación de herramientas de mejora continua en operaciones mineras, contribuyendo al desarrollo de prácticas operacionales más eficientes y sostenibles en el sector extractivo.

CAPÍTULO II

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. Estado del arte

La investigación sobre las ineficiencias en los sistemas de carguío y acarreo minero ha evolucionado desde análisis descriptivos hacia modelos orientados a la optimización operacional, simulación y aplicación de metodologías de mejora continua. En este contexto, herramientas como Lean Six Sigma han adquirido importancia debido a su capacidad para identificar pérdidas, reducir variabilidad y mejorar la productividad de los procesos mineros.

2.1.1 A Nivel Internacional.

En la vanguardia de la minería global, la optimización de flotas mediante sistemas de gestión de equipos constituye un campo de estudio relevante en minería. Investigaciones desarrolladas en operaciones mineras de países como Australia y Canadá evidencian que la aplicación de metodologías basadas en Lean Six Sigma permite mejorar la estabilidad de los procesos de carguío y transporte. Burt y Caccetta (2014) destacan que el control de la variabilidad en actividades como posicionamiento, espera y asignación de equipos contribuye a incrementar la utilización efectiva de la maquinaria. Asimismo, Dindarloo et al. (2015) señalan que la metodología DMAIC facilita la identificación y reducción de factores que afectan la productividad, permitiendo establecer procesos más controlados y eficientes.

2.1.2 A Nivel Nacional.

En el Perú, los estudios relacionados con carguío y acarreo se han enfocado en mejorar la utilización de equipos, reducir tiempos improductivos y optimizar la coordinación entre unidades de carga y transporte. Investigaciones recientes muestran que las demoras operativas y no operativas afectan directamente la productividad de las flotas mineras y el cumplimiento de los planes de producción. En este sentido, Tupac Yupanqui Rivera (2025) y Cueva Terrones

(2025) concluyen que la reducción de tiempos improductivos y la mejora de los ciclos operacionales permiten incrementar la eficiencia de los equipos y disminuir los costos asociados al movimiento de material.

2.1.3 A Nivel Local

En las operaciones mineras del norte del Perú, especialmente en la región Cajamarca, las condiciones climáticas y el deterioro de las vías de acarreo representan factores que afectan el rendimiento de los equipos de transporte. La presencia de lluvias incrementa la resistencia al desplazamiento, genera mayores tiempos de ciclo y ocasiona interrupciones operativas (MINEM, 2023; SNMPE, 2022; Caterpillar Inc., 2021). No obstante, existe una limitada cantidad de estudios locales que aborden esta problemática mediante metodologías estructuradas de mejora continua. Por ello, la presente investigación busca contribuir mediante la aplicación de Lean Six Sigma y la metodología DMAIC para identificar causas de ineficiencia y optimizar el desempeño del sistema de carguío y acarreo (George et al., 2005).

2.2. Bases Teóricas de la Investigación

El desempeño de los sistemas de carguío y acarreo en minería depende de diversos factores operacionales, entre ellos la calidad de la fragmentación del material producto de la voladura y la eficiencia del control logístico de la operación. Estos elementos influyen directamente en los tiempos de ciclo, productividad de los equipos y costos asociados al movimiento de material.

2.2.1 Fragmentación del mineral

La fragmentación del mineral corresponde al proceso de ruptura de la roca generado por la energía liberada durante la voladura. Su adecuada distribución granulométrica es fundamental para garantizar un eficiente proceso de carguío, debido a que una fragmentación inadecuada puede incrementar la resistencia al corte durante la excavación, aumentar los

tiempos de carga y generar mayores esfuerzos sobre los componentes de los equipos (Hustrulid, 1999).

2.2.2 Voladura

La voladura es una operación unitaria destinada a fragmentar el macizo rocoso mediante el uso controlado de explosivos. Su objetivo no solo consiste en generar la ruptura del material, sino también en producir una fragmentación y disposición de la pila adecuadas para facilitar las actividades posteriores de carguío y transporte. Una voladura eficiente contribuye a mejorar el rendimiento de los equipos, reducir tiempos operativos y optimizar los costos de producción (Lilly, 1986).

2.2.3 Sistema ROM (Run of Mine)

El sistema ROM (*Run of Mine*) denomina al flujo de material extraído directamente del frente de trabajo, previo a cualquier etapa de trituración mecánica. En operaciones que manejan rocas altamente friables, garantizar una granulometría adecuada del mineral ROM permite optimizar las etapas posteriores del procesamiento, reduciendo requerimientos energéticos asociados a la conminución y mejorando la eficiencia operacional de la planta (Wills & Finch, 2016).

2.2.4 Pad de lixiviación

El pad de lixiviación es una estructura diseñada para contener el mineral apilado y permitir su irrigación mediante soluciones químicas que favorecen la disolución y recuperación de metales valiosos. La eficiencia del proceso está condicionada por factores como la granulometría del mineral, la permeabilidad del lecho y la distribución del flujo de solución dentro de la pila. Una distribución inadecuada de tamaños puede generar zonas de baja irrigación, reduciendo la recuperación metalúrgica (Wills & Finch, 2016).

2.2.5 Eficiencia operativa y Sistema de Despacho

La eficiencia operativa se define como la capacidad de un sistema minero para maximizar el tiempo productivo de los equipos respecto al tiempo disponible, reduciendo pérdidas asociadas a demoras operacionales, tiempos improductivos y periodos de espera. En este contexto, los sistemas de despacho minero permiten optimizar la asignación dinámica de equipos, controlar los ciclos de acarreo y mejorar la utilización de la flota mediante el monitoreo continuo de variables operacionales (Mina, 2014).

2.2.6 Integración de los factores operacionales en el ciclo de carguío y acarreo

Los procesos unitarios que intervienen en una operación minera a cielo abierto mantienen una relación secuencial y dependiente, donde el desempeño de cada etapa condiciona la eficiencia global del sistema productivo. La fragmentación obtenida mediante la voladura constituye el punto inicial de esta cadena, debido a que determina las características físicas del material ROM, influyendo directamente en la facilidad de excavación, el rendimiento del equipo de carguío y la continuidad del proceso de acarreo.

Una fragmentación inadecuada puede generar sobre tamaños, dificultades de penetración del balde, incremento de tiempos de carga y mayor consumo energético, afectando los indicadores operacionales de la flota. Asimismo, las características granulométricas del mineral ROM influyen en las etapas posteriores de procesamiento, particularmente en los sistemas de chancado y lixiviación, donde la distribución de tamaños y la permeabilidad del material son variables determinantes para alcanzar una recuperación metalúrgica eficiente (Wills & Finch, 2016).

En este contexto, el ciclo de carguío y acarreo representa un sistema dinámico donde interactúan variables técnicas, humanas y de gestión. La eficiencia del transporte depende no solo de la

capacidad nominal de los equipos, sino también de la correcta asignación de unidades, la reducción de tiempos improductivos, la eliminación de esperas y la toma de decisiones basada en información operacional en tiempo real. Por ello, los sistemas de despacho minero cumplen una función estratégica al permitir el monitoreo continuo del desempeño de la flota y la optimización de los recursos disponibles (Mina, 2014).

Desde la perspectiva de mejora continua, la metodología Lean Six Sigma proporciona un enfoque estructurado para identificar, medir, analizar, mejorar y controlar las causas que generan variabilidad dentro del proceso operativo. La aplicación del ciclo DMAIC (*Define, Measure, Analyze, Improve, Control*) permite evaluar las pérdidas asociadas al ciclo de carguío y acarreo, tales como tiempos de espera, demoras operativas, baja utilización de equipos y desviaciones en los tiempos de ciclo, orientando la gestión hacia una operación más estable y eficiente (George et al., 2005).

Por lo tanto, la presente investigación establece que el rendimiento del ciclo de carguío y acarreo no depende exclusivamente de las características del mineral o de la capacidad mecánica de los equipos, sino de la interacción entre la calidad de la fragmentación, las condiciones del material ROM, la planificación logística y la gestión del sistema de despacho. Bajo este enfoque integral, Lean Six Sigma se plantea como una herramienta metodológica para reducir la variabilidad operacional y mejorar la productividad de la flota minera mediante el control sistemático de los factores críticos del proceso.

2.3. Hipótesis de investigación

2.3.1 Hipótesis general de investigación

La aplicación integral de la metodología Lean Six Sigma para el control algorítmico y logístico reduce de forma estadísticamente significativa los tiempos de demoras operativas y

no operativas en la flota de carguío y acarreo, induciendo un incremento medible en la producción por guardia y una contracción contundente en el costo unitario operativo (\$/t).

2.3.2 Hipótesis específica

- La estandarización de los protocolos de entrega de guardia y la optimización de las ventanas de refrigerio guiadas por el área de control, reducen en más del 15% las demoras no operativas de las excavadoras y volquetes.
- El aumento en la disponibilidad y tiempo efectivo de la maquinaria incrementa el factor de acoplamiento del circuito, maximizando el volumen de mineral acarreado hacia el pad.
- La dilución de los costos fijos inherente al incremento de la productividad horaria impacta favorablemente la curva de costos (\$/t), demostrando viabilidad financiera sin necesidad de inyección de CAPEX.

2.4. Variable

2.4.1 Variable independiente:

Tiempos de Demoras en el Ciclo de Operación.

2.4.2 Variable dependiente:

Productividad Operativa y Costo de Proceso (\$/t).

2.4.3 Operacionalización de variables

Tabla 1 Variables operacionales

Variable	Definición Conceptual	Indicador	Medición	Unidad
Variable Independiente: Tiempo de demoras en el ciclo de operación	Interrupciones cronológicas y sistemáticas que fragmentan la continuidad del flujo de trabajo de la maquinaria pesada en la mina, impidiendo que los activos cumplan con su función principal de diseño durante el ciclo de minado.	Demoras Operativas	• Tiempo de abastecimiento de combustible, reubicación de excavadoras, limpieza de frente	Horas/guardia
		Demoras No Operativas	• Tiempo de cambio de guardia, destinado al refrigerio, de espera en standby por falta de operador asignado.	Horas/guardia
		Demoras Programadas	• Tiempo de paralización por horarios de voladura, de mantenimiento preventivo planificado (PM)	Horas/guardia
		Demoras No Programadas	• Tiempo perdido por fallas mecánicas imprevistas, de parada por condiciones climáticas	Horas/guardia
Variable Dependiente: Productividad Operativa y Costo de Proceso (\$/t)	Resultado bidimensional del esfuerzo de extracción del macizo rocoso, el cual relaciona el volumen físico de material desplazado con los recursos financieros consumidos para ejecutar dicho movimiento logístico.	Tonelaje procesado diario	• Tonelaje total movido por guardia, tiempo efectivo de trabajo, Utilización operativa de la flota	t/g, %
		Tiempo promedio de ciclo de acarreo	• Costo unitario del subproceso de carguío, costo unitario del subproceso de acarreo	US\$/t, %

Nota. Elaboración propia

CAPÍTULO III

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1. Alcances y Limitaciones

En esta sección se cimenta la arquitectura procedimental del estudio. Detalla el diseño experimental, la categorización de las variables y la ruta algorítmica empleada para diagnosticar y mitigar las ineficiencias en los ciclos operativos. La metodología se basa sobre la captura y el procesamiento masivo de datos provenientes de la gestión en tiempo real de la maquinaria móvil.

3.1.1 Alcances del Proyecto

La presente investigación se enfoca en educación de los tiempos de demoras de los equipos de carguío y acarreo para aumentar la producción por guardia y generar una disminución en el costo de sus procesos en una unidad minera de Cajamarca centrándonos en el área de Operaciones Mina, abarcando de forma exclusiva a la flota pesada de producción. El alcance logístico y analítico se dirige desde el centro de control, recayendo la ejecución del monitoreo y la asignación dinámica de equipos en la ingeniera de dispatch. Desde esta posición estratégica, se intervendrán directamente los protocolos de asignación, las ventanas de refrigerio y los esquemas de relevo ejecutados por los operadores de la flota, con el fin de establecer un control riguroso sobre las demoras no operativas. El estudio se realiza en la Unidad Minera Shahuindo, ubicada en la región Cajamarca, Perú, durante el primer y segundo trimestre del año 2025, donde el cual se muestra las demoras en horas por guardia para cada volquete.

3.1.2 Limitaciones

Las restricciones del estudio se vinculan a la estocasticidad propia de la minería a cielo abierto. Una limitación primaria es el sesgo de registro inicial; dado que parte de las demoras

dependían de la notificación manual por parte de los operadores de los volquetes, existía un margen de error antes de la automatización del proceso. Asimismo, la pluviometría característica de la sierra norte peruana y la ocurrencia de tormentas eléctricas constituyen variables ambientales exógenas que obligan a paralizar las operaciones, introduciendo tiempos muertos incontrolables que debieron ser depurados de la base de datos analítica.

3.2. Tipo y nivel de la Investigación

3.2.1 Tipo de Investigación

El tipo de investigación que se usará para la presente investigación será una investigación aplicada y cuantitativa, debido a que se fundamenta en la utilización de modelos estadísticos probabilísticos para resolver una problemática empírica y latente. Los datos recolectados se traducen en métricas de rendimiento que permiten la toma de decisiones objetivas.

3.2.2 Nivel de Investigación

El nivel de investigación que se usará para esta investigación será explicativo - correlacional, debido a que el diseño metodológico no se detiene en la mera descripción de los tiempos muertos, sino que establece y demuestra matemáticamente la relación de causalidad entre la reestructuración logística de los turnos y el incremento del tonelaje movido junto a la reducción del costo unitario.

3.2.3 Diseño de investigación

El diseño del estudio fue **cuasi-experimental** de tipo longitudinal, con mediciones de preprueba y postprueba sobre un único grupo de estudio. Esta tipología permite establecer una línea base y compararla métricamente tras la implementación de las acciones correctivas delineadas por la metodología Lean Six Sigma.

3.3. Población y Muestra o Universo

3.3.1 Población

Para este proyecto la población estadística está constituida por la totalidad de los ciclos de carguío y acarreo ejecutados en la mina durante el primer y segundo trimestre del año 2025, incluyendo la interacción continua de todos los operadores, supervisores de turno e ingenieros de control de flota.

3.3.2 Muestra

Como muestra se analizarán los datos recopilados 6 meses:

Del 01-01-2025 al 31-03-2025 (Previo al análisis)

Del 01-04-2025 al 30-06-2025 (Posterior al análisis)

3.3.3 Criterio

Se analizaron aquellos equipos cuya disponibilidad mecánica, superara el 85%. Se excluyeron del análisis los equipos en etapa de overhaul o que sufrieron fallas catastróficas.

3.4. Métodos, Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

3.4.1 Métodos

El método de investigación usado es el analítico-sintético, mediante la metodología Lean Six Sigma – DMAIC. Para el control operativo se aplicaron algoritmos de asignación lineal que permiten evaluar el grado de saturación del circuito de acarreo.

3.4.2 Técnicas de Recolección de Datos

La captura de la información se materializó a través de las siguientes técnicas:

- Monitoreo Telemétrico: Extracción automatizada de los tiempos de ciclo y geoposicionamiento mediante el Fleet Management System (FMS), bajo la vigilancia continua de los ingenieros de dispatch.

- Estudios de Tiempos y Movimientos: Evaluaciones cronometradas en campo ejecutadas en colaboración con los supervisores de operaciones para validar las demoras declaradas por los operadores.

Instrumentos de Recolección de Datos

Para la recolección de datos en este estudio, se utilizarán los siguientes instrumentos:

- Radio de comunicación
- Hojas de cálculo
- Libretas de campo
- Laptop
- Sistema de control de flota
- Lapiceros, etc

3.5. Plan de análisis de datos

3.5.1 Técnicas de análisis de datos.

- La información fue sometida a un riguroso proceso de limpieza algorítmica. Posteriormente, se utilizó el software Minitab para realizar las pruebas de normalidad y calcular la capacidad del proceso y el Nivel Sigma inicial.
- Para la estratificación de las causas, se construyeron Diagramas de Pareto, mientras que la estabilidad de las variables tras la mejora se evaluó a través de Gráficos de Control (X-R). Adicionalmente, se modelaron cuadros de mando integrales en Power BI para democratizar la visualización de los KPIs.

3.6. Dimensiones de Lean Six Sigma

Una de las metas fundamentales de Lean Six Sigma es reducir la variabilidad inherente de los procesos mediante la identificación y eliminación de las causas que generan desperdicios, defectos y pérdidas operacionales. En este sentido, Socconini y Reato (2019) señalan que la

variabilidad constituye uno de los principales obstáculos para alcanzar niveles superiores de productividad y desempeño, debido a que puede originarse por factores asociados a los métodos de trabajo, la intervención humana, la capacidad de los equipos, los materiales utilizados y otros elementos externos que afectan la estabilidad del proceso.

Desde este enfoque, Lean Six Sigma integra los principios de Lean Manufacturing, orientados a la eliminación de actividades que no agregan valor, con la metodología Six Sigma, enfocada en la reducción de la dispersión y el control estadístico de los procesos. Esta integración permite establecer un sistema de mejora continua basado en la identificación de problemas, análisis de causas raíz y aplicación de soluciones sostenibles mediante la metodología DMAIC (*Define, Measure, Analyze, Improve, Control*) (George et al., 2005).

En el contexto de las operaciones mineras, la aplicación de Lean Six Sigma permite analizar la variabilidad presente en los ciclos de carguío y acarreo, considerando factores como tiempos de espera, demoras operativas, utilización de equipos, disponibilidad mecánica y cumplimiento de los planes de producción. Por ello, sus dimensiones se orientan al control del proceso, la reducción de pérdidas y la mejora sistemática del desempeño operacional de la flota minera.

3.7. Procedimiento de la investigación

El despliegue se basó en cinco fases correlativas:

- Definir: Elaboración del Project Charter y mapeo del flujo de valor (Value Stream Mapping), delimitando la intervención de los supervisores y los operadores de la flota
- Medir: Consolidación de los tiempos perdidos desde la consola de dispatch y cálculo estadístico de la línea base, evidenciando el desvío estándar respecto al plan minero.

- Analizar: Ejecución de sesiones de "Tormenta de Ideas" y diagramas de Ishikawa, involucrando activamente a los trabajadores de campo para descubrir que los cambios de guardia inefficientes constituían la causa raíz predominante.
- Mejorar: Rediseño logístico de los frentes de trabajo, implementación de "relevos en caliente" gestionados por los ingenieros de planeamiento y dispatch.
- Controlar: Estandarización de las nuevas directrices operativas mediante la emisión de procedimientos escritos y el monitoreo sostenido a través de tableros de control de despacho en tiempo real.

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Análisis de las variables operacionales

La auditoría inicial de los datos telemétricos, capturados y depurados desde la consola de dispatch, evidenció una severa fragmentación en la continuidad del ciclo de acarreo. Al estratificar la variable independiente mediante un diagrama de Pareto, se determinó que las demoras no operativas concentraban el 63% del tiempo perdido total, mientras que las operativas representaban el 23%.

Al profundizar en las DNOP, se identificaron las variables de mayor criticidad que afectaban la utilización de los volquetes. Excluyendo los tiempos fijos de alimentación, los eventos de mayor impacto, validados por los jefes de guardia en campo, fueron: el "Cambio de Turno", la "Falta de Operador" y el "Cambio de Guardia". Esta variabilidad sistémica limitaba el uso de la disponibilidad, generando un estrangulamiento en la capacidad de extracción diaria y mermando la productividad horaria (t/h).

4.2. Estudio de factibilidad

La minería al ser una de las actividades más relevantes en Perú, genera ingresos económicos y empleo, así como oportunidades de progreso. Por lo tanto, es fundamental entender cómo el entorno del país influye en este sector. Al hacerlo, se puede llevar a cabo un análisis empresarial para identificar fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas y formular estrategias que se adapten a la cultura organizacional. A continuación, se presentan los puntos de este análisis.

4.2.1 Análisis PESTEL

El análisis PESTEL tiene como objetivo examinar los factores políticos, económicos, sociales, tecnológicos, ecológicos y legales y su impacto en la industria minera.

El resumen del análisis que se llevó a cabo se presenta de la siguiente forma:

Político:

- Inestabilidad política.
- Perú bajó en ranking con mayor atracción minera y de buenas prácticas de potencial minero.
- Posiciones anti-mineras de ciertos partidos políticos.
- Falta de decisiones políticas favorables al sector minero.

Económico:

- Desaceleración de la actividad económica mundial.
- Subida del precio del oro en los últimos años.
- El sector minero representa entre 9% y 10% del PBI peruano.
- Tasa de inflación baja en rango meta.

Social:

- Existencia de conflictos sociales
- Falta de ejecución de presupuestos de los gobiernos locales y regionales
- Tasas de pobreza y desempleo considerable
- Brecha del índice de desarrollo humano en las zonas andinas y amazónicas

Tecnológico:

- Nuevas tecnologías para reducir costos.
- Reingeniería de procesos, lean six sigma y automatización
- Transformación digital para minería remota
- Las minas de Perú comienzan poco a poco a adoptar tecnologías autónomas e inteligentes.

Ecológico:

- La industria minera afecta el impacto ambiental y consumo de energía.
- Puesta en marcha de iniciativas ecológicas en beneficio de las comunidades
- Potencial daño y/o interrupción en las operaciones debido a fenómenos naturales, lluvias torrenciales, entre otros.

Legal:

- Falta de claridad en las regulaciones.
- Tramitología engorrosa y lenta
- Elevada carga tributaria
- Estabilidad tributaria

4.2.2 Análisis FODA

Se examinó la situación de la Unidad Minera de Cajamarca - Shahuindo, en primer lugar con un análisis interno (fortalezas y debilidades) y posteriormente con uno externo. A partir de este análisis, se puede afirmar que a pesar de que se han implementado medidas para dar a las comunidades locales una mayor participación en la aprobación o no de proyectos mineros, las protestas sociales y ambientales siguen representando retos importantes para la industria minera peruana. En función de estos desafíos y oportunidades, se propusieron estrategias para abordar ambos contextos.

Fortalezas:

- Apertura a la innovación
- Imagen corporativa sobresaliente
- Buenas relaciones con los stakeholders
- Prácticas ambientales destacadas
- Sólidas políticas de seguridad

Oportunidades:

- Reingeniería de procesos, lean six sigma y automatización
- Transformación digital a minería 4.0
- Perú en ranking de países con mayor atracción y potencial minero
- Subida del precio de los metales

Debilidades:

- Bajo nivel tecnológico
- Altos costos operacionales
- Base de datos limitadas
- Planificación de personal
- Limitado control operacional

Amenazas:

- Inestabilidad política
- Minería informal
- Tramitología engorrosa y lenta
- Conflictos sociales

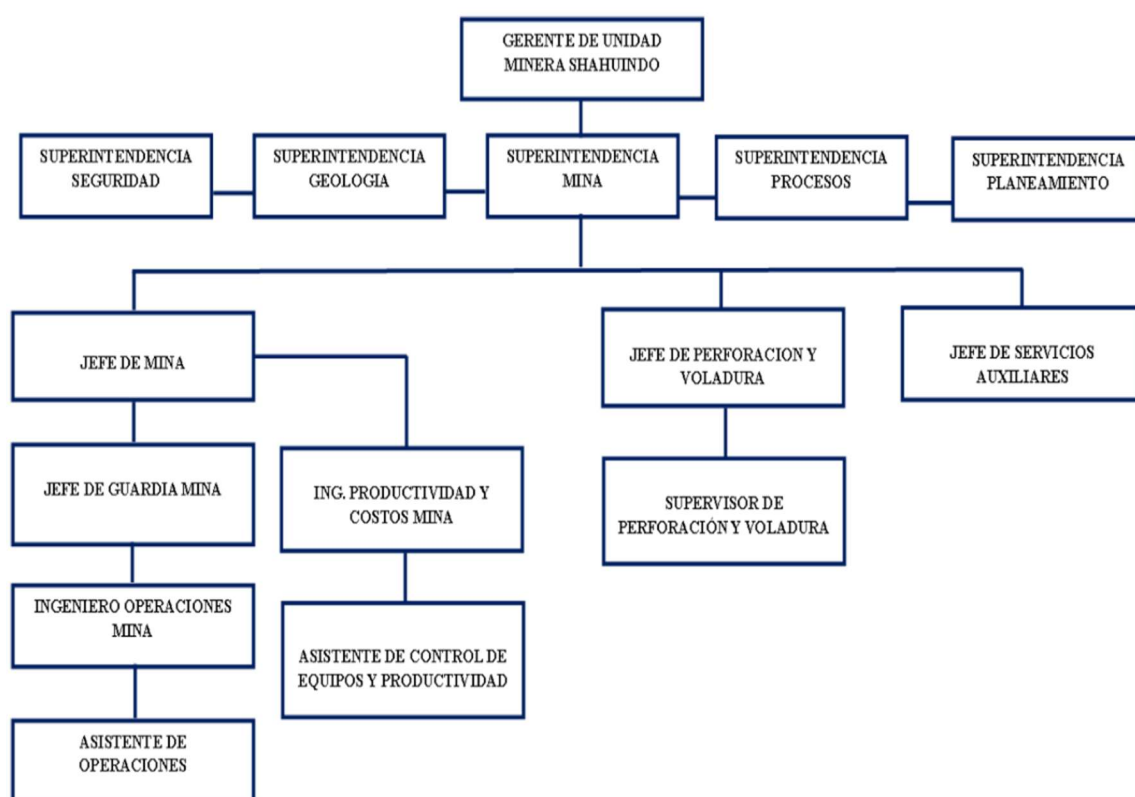
4.3. Preparación

4.3.1 Estructura organizacional

A continuación, se presenta el organigrama de la Unidad Minera de Cajamarca - Shahuindo la cual se define teniendo en cuenta la jerarquía y la clasificación de las unidades organizativas, estas características tienen un impacto importante en la actividad de la empresa.

Figura 1.

Estructura organizacional



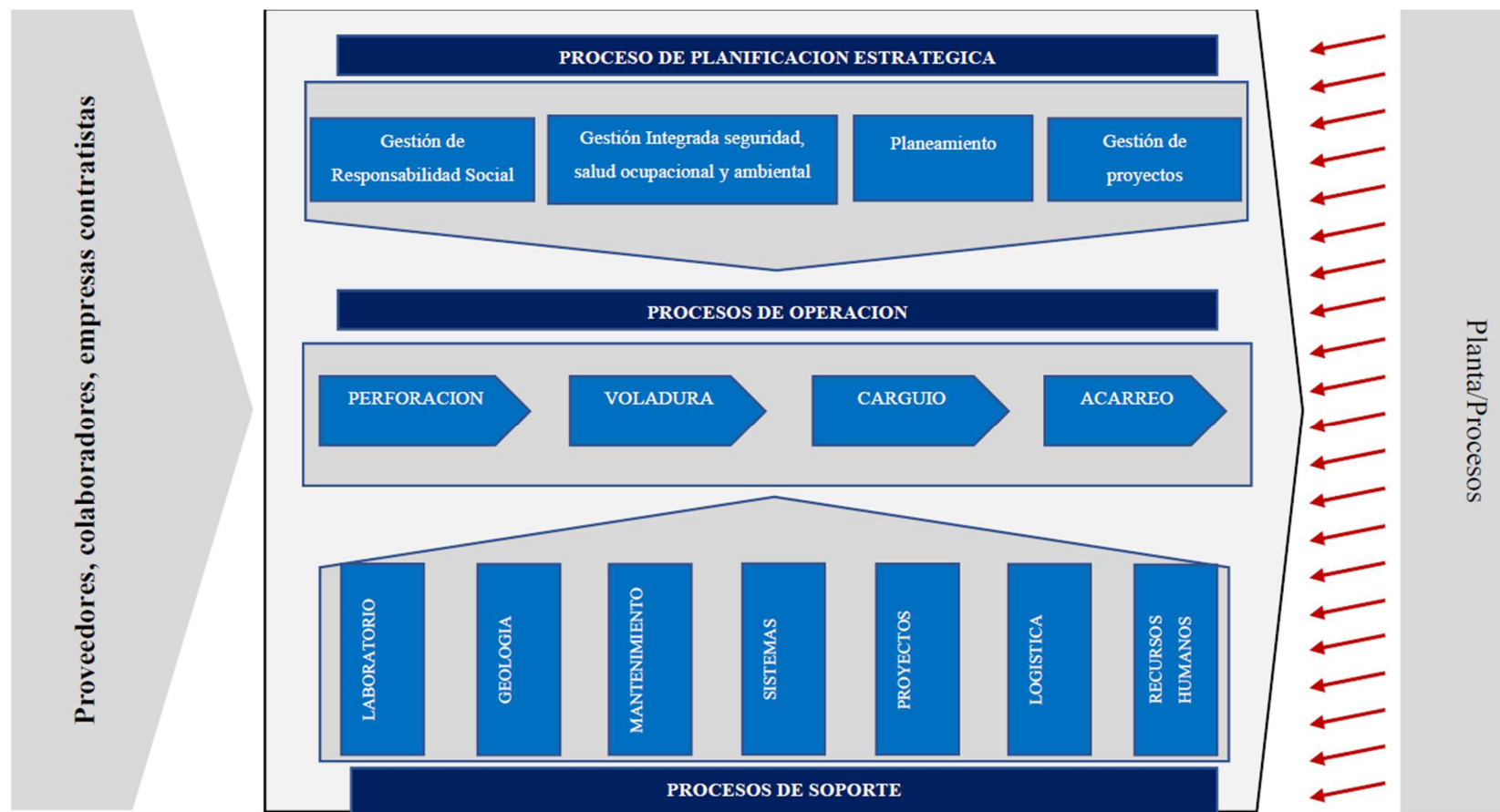
Nota. Elaboración propia

4.3.2 Mapa de procesos

A continuación, se presenta el mapa de procesos para las operaciones mineras en la U.M., considerando tanto a los clientes como a los procesos estratégicos, operativos y de soporte. Los cuatro procesos operativos pueden ser visualizados: Perforación, voladura, carguío y acarreo.

Figura 2.

Mapa de procesos



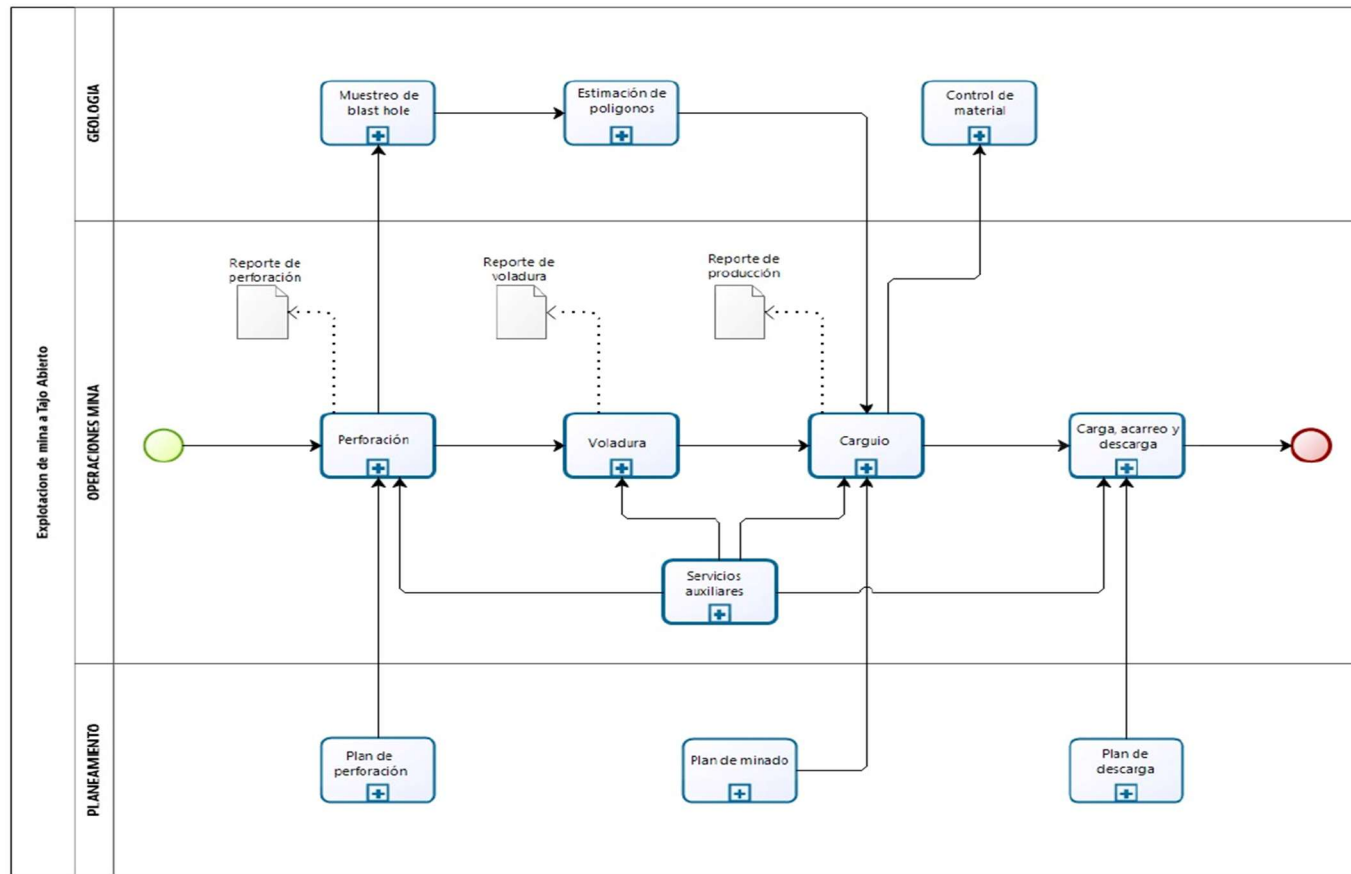
Nota. Elaboración propia

4.3.3 Diagrama de flujo

A continuación, se muestra el diagrama de flujo del proceso de explotación de la U.M

Figura 3.

Diagrama de Flujo – Proceso explotación mina a tajo abierto



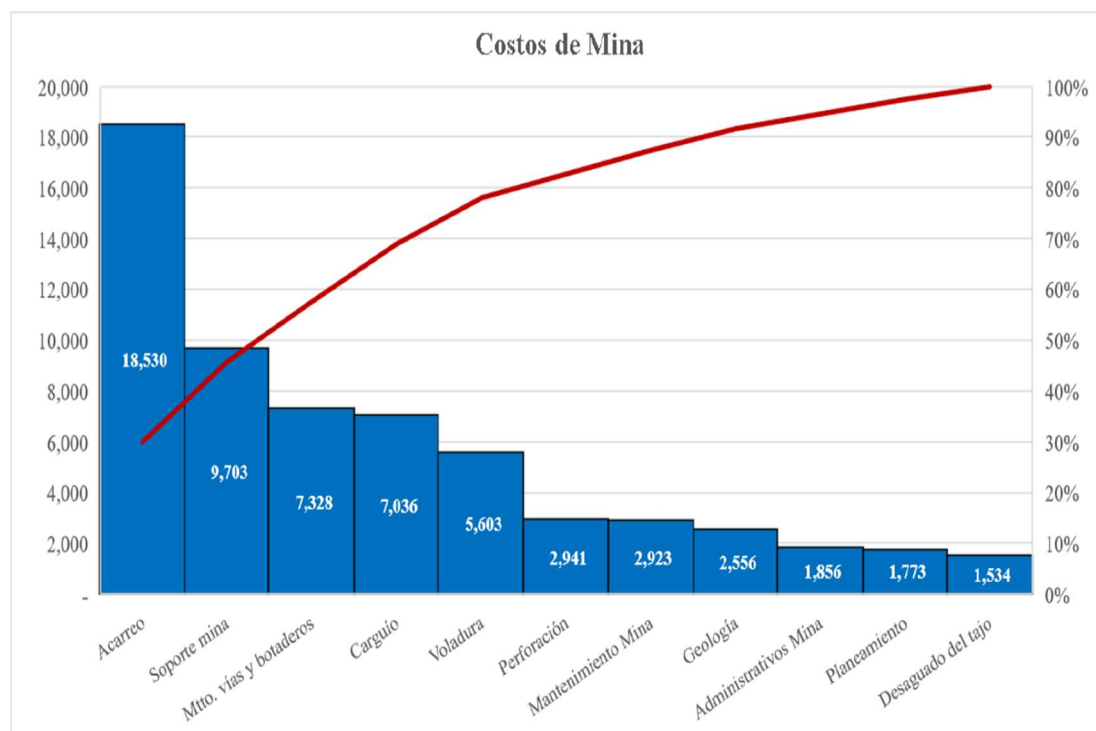
Nota. Operaciones Mina U.M Shahuindo

4.3.4 Diagrama de pareto

Se realizó el diagrama de Pareto para ver la influencia de los costos de las operaciones unitarias en el costo de mina.

Figura 4.

Diagrama de pareto de los costos de mina



Nota. Elaboración propia

Análisis

El gráfico de la figura anterior presenta los costos mineros acumulados hasta noviembre del 2025. Se puede ver que el acarreo tiene el costo más alto, y que, junto con el carguío, representa un 41% del costo total en mina; estos dos son subprocesos de explotación en los

4.4. Aplicación de Lean Six Sigma

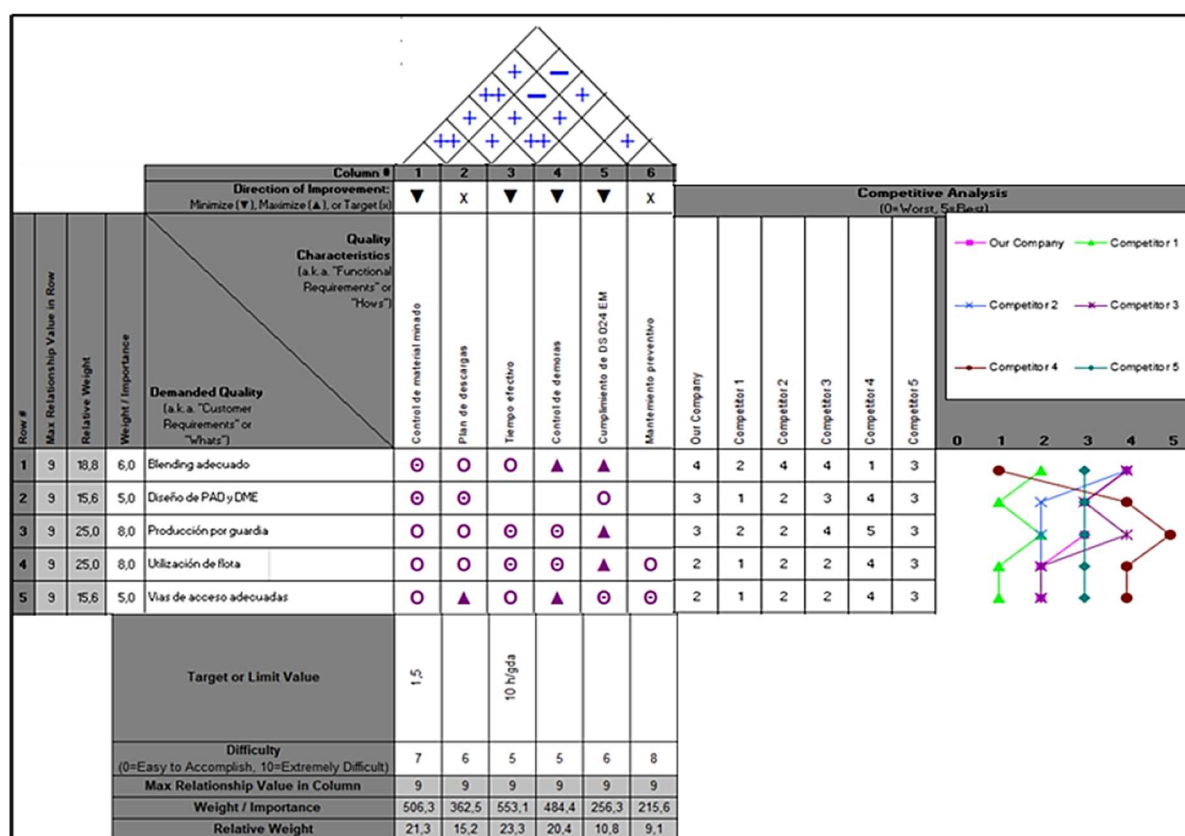
4.4.1 Definir

4.4.1.1 QFD

Para cada uno de los procesos identificados con la minería de datos, minería de texto y el resultado se creó una matriz QFD. Con QFD se pudo obtener un conjunto de requerimientos y su mapeo a requerimientos de diseño a ser implementados.

Figura 5.

Matriz QFD



Nota. Elaboración propia

4.4.1.2 Project charter

En la siguiente figura se muestra el Project Charter, el cual muestra el caso y problema identificado, el objetivo a alcanzar, el alcance del proyecto, los meses para el desarrollo de las fases y los miembros del equipo.

Caso:

Disminuyendo los tiempos de demoras operativas y no operativas de los equipos de carguío y acarreo se obtiene un aumento en su tiempo efectivo, un incremento en la producción por guardia y una disminución en el costo de carguío y acarreo.

Problema:

Se tienen altos índices de demoras operativas y no operativas en los equipos del proceso de carguío y acarreo. Consecuencia de esto, el tiempo efectivo se reduce aproximadamente en 3 horas por guardia, afectando a la producción

Objetivo:

Aumentar la producción por guardia en un rango de 3 a 5 %

$Y = \text{Producción (t/gda)}$

Alcance del proyecto:

El proyecto involucra un análisis a profundidad sobre los tiempos de demoras operativas y no operativas de los equipos de carguío y acarreo por turno/guardia, la toma de acciones para la reducción de las demoras y su posterior control.

Fases del proyecto:

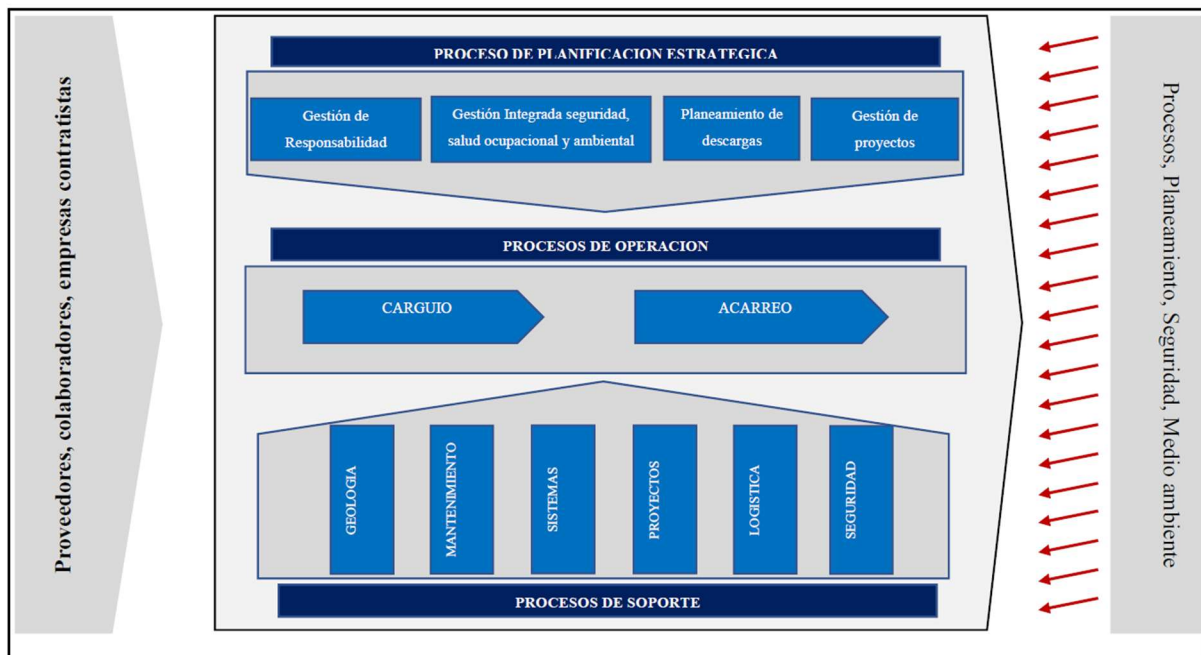
Definir (junio), Medir (julio), Analizar (agosto), Implementar (agosto), Controlar (agosto)

4.4.2 Medir**4.4.2.1 Mapa de Subproceso**

Se muestra el mapa del subproceso de carguío y acarreo en las operaciones de minado en la U.M Shahuindo.

Figura 6.

Mapa de sub proceso explotación mina a tajo abierto – carguío, acarreo y descarga



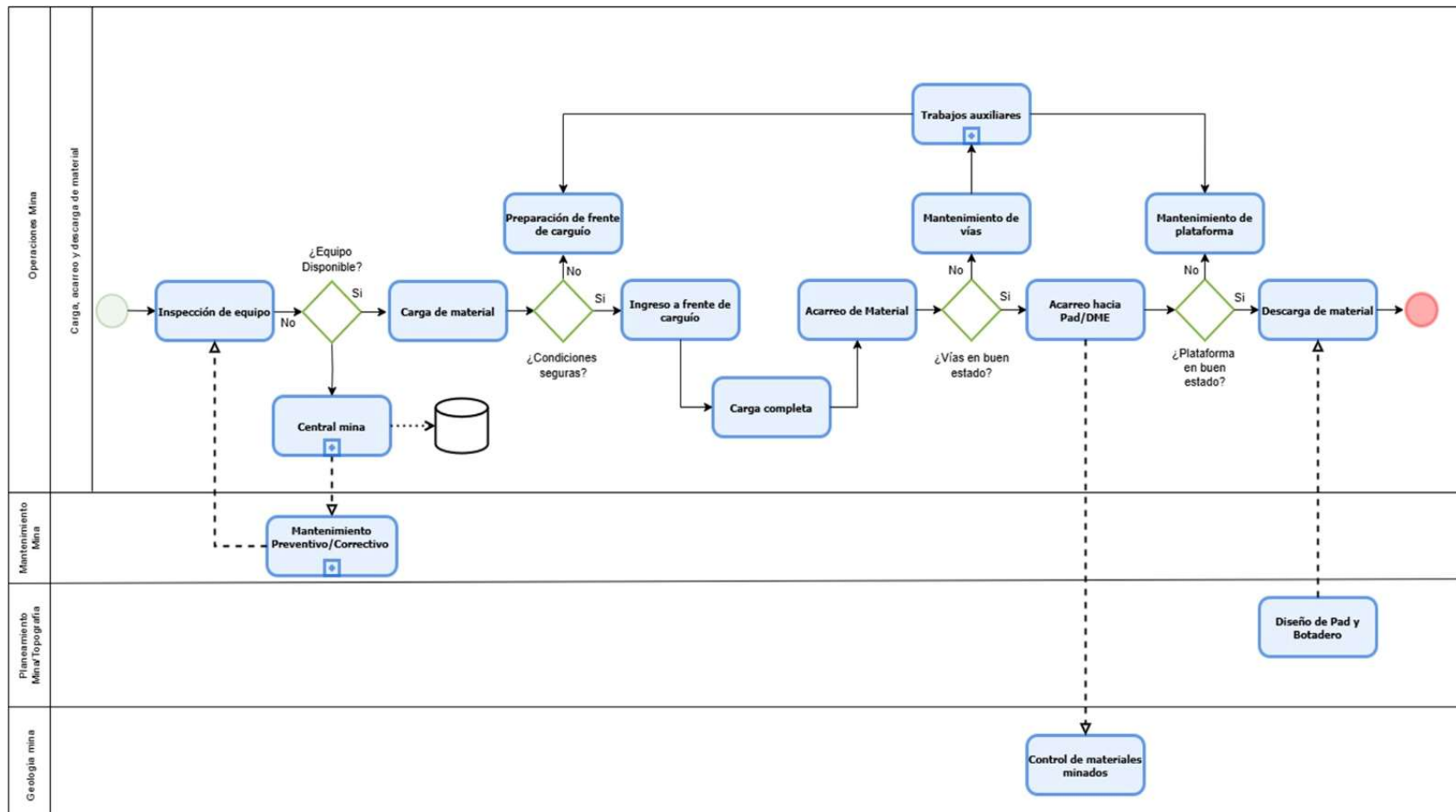
Nota. Elaboración propia

4.4.2.2 Diagrama de flujo

Se analiza el subproceso de carguío, acarreo y descarga para controlar el ciclo de los equipos de carguío y acarreo y poder identificar las causas principales de demoras operativas y no operativas.

Figura 7.

Diagrama de Flujo – Sub Procesos Explotación de mina a tajo abierto - Carguío, Acarreo y Descarga



Nota. Elaboración propia

4.4.2.3 Identificación de variables

En el siguiente diagrama se pueden observar las 4 principales causas de demoras en el proceso de carguío y acarreo, siguiendo el mapeo de demoras realizado por Central Operaciones Mina Shahuindo.

Figura 8.

Diagrama de Ishikawa



Nota. Elaboración propia

Con lo cual se tiene lo siguiente:

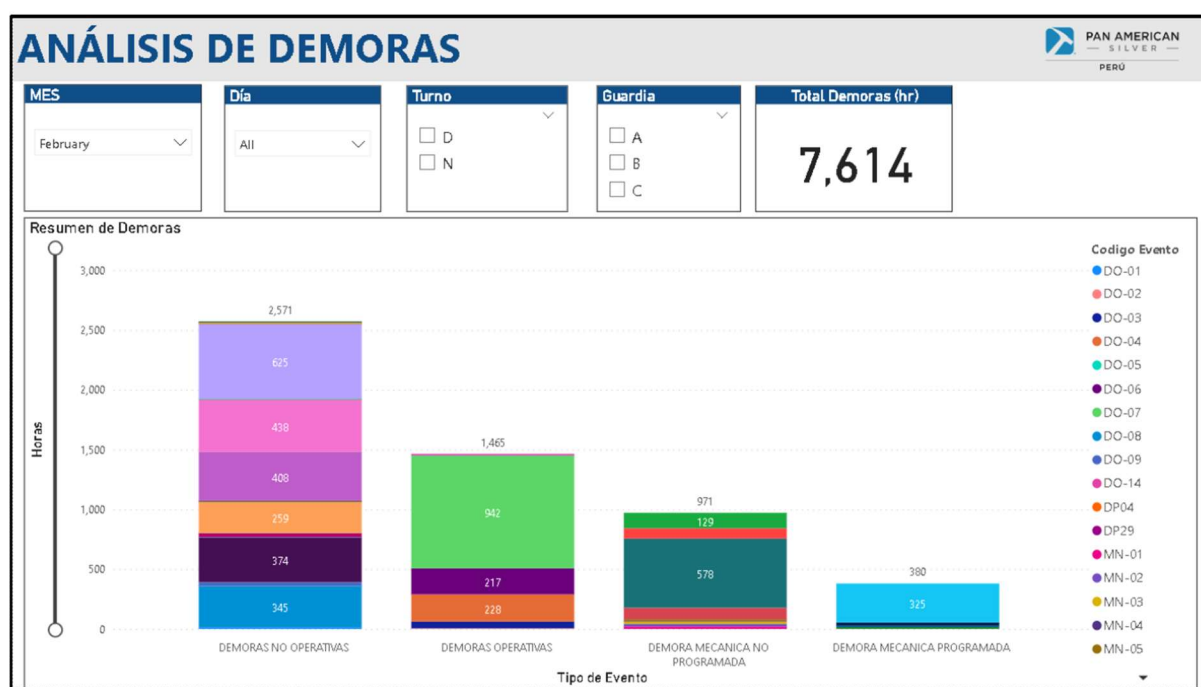
- X1: Demoras operativas
- X2: Demoras no operativas
- X3: Demoras programadas
- X4: Demoras no programadas

4.4.2.4 Definición de variable a estudiar

Con la data obtenida de Central Mina se construyó un dashboard de Demoras de Volquetes mostrado a continuación:

Figura 9.

Dashboard de demoras de volquetes



Nota. Elaboración propia

Análisis

Con la información que se puede extraer del gráfico previo, se elaboró un resumen de las horas totales de retrasos mensuales y los porcentajes que corresponden a cada clase de demora. A partir de estos datos, se creó la tabla subsiguiente, donde se presentan las demoras por guardia en horas para cada volquete.

Tabla 2.*Demoras en horas/guardia para cada volquete*

Año	Mes	Demoras Totales (h/gd)	Demoras Operativas (h/gd)	Demoras No Operativas (h/gd)	Demoras Mecánicas No Programadas (h/gd)	Demoras Mecánicas Programadas (h/gd)
2025	Enero	6.1	1.2	4.5	0.2	0.2
2025	Febrero	4.2	1.2	2.4	0.4	0.2
2025	Marzo	4.8	1.1	3.1	0.6	0.1
2025	Abril	5.6	1.1	3.3	1.0	0.2
2025	Mayo	5.0	1.3	2.8	0.7	0.1
2025	Junio	5.0	1.0	3.2	0.7	0.3

Nota. Elaboración propia

Con la tabla anterior se analizó las horas de demoras por tipo, con información de los meses desde enero del 2025 hasta junio del 2025, obteniendo lo siguiente:

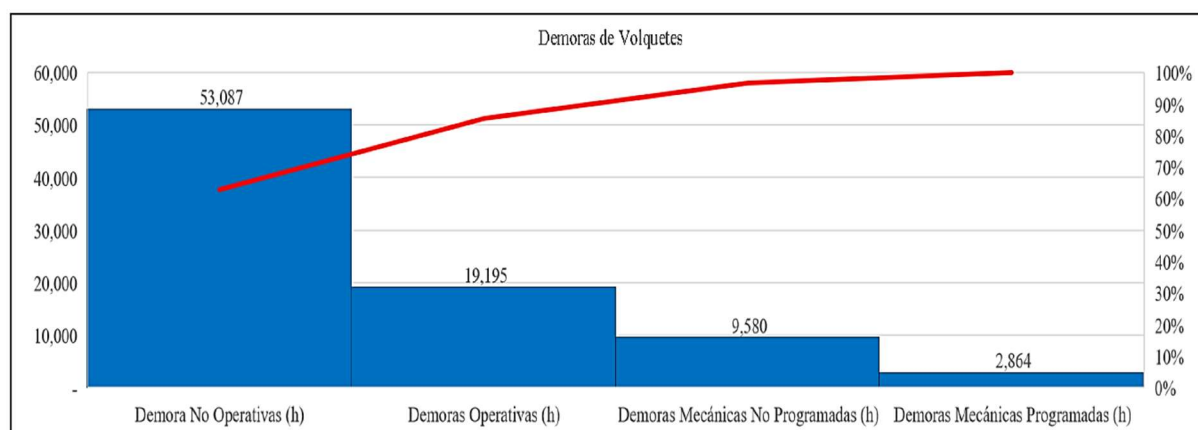
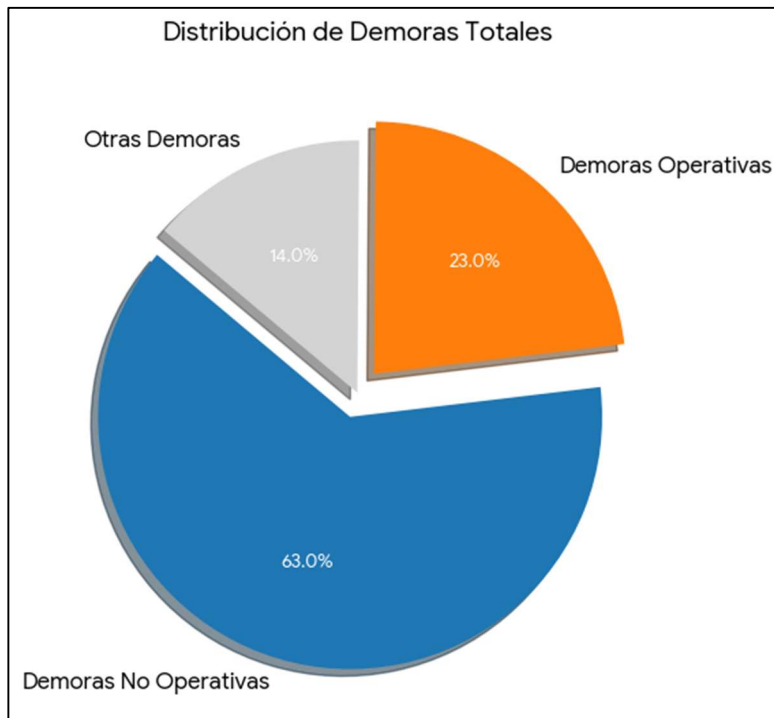
Figura 10.*Pareto de Demoras de Volquetes***Nota.** Elaboración propia

Figura 11.

Distribución de Demoras Totales



Nota. Elaboración propia

De las figuras anteriores se tiene que las Demoras No Operativas representan un 63% de las demoras totales y las Demoras Operativas un 23%, acumulando entre ambos tipos de demora un 86% para los meses analizados; siendo estos dos tipos de demoras las variables a estudiar.

- $X1$ = Demoras Operativas
- $X2$ = Demoras No Operativas

4.4.2.5 Recolección de data

Lo que se busca calcular es el tiempo efectivo por equipo acarreo, esto por guardia, el cual depende de los cuatro tipos de demoras mostradas, teniendo lo siguiente.

Debido a que solo se abordaran demoras originadas por condiciones en la operación o por la gestión de la misma, se procede únicamente a recolectar datos concernientes a demoras operativas y no operativas.

- Y = Tiempo efectivo
- X_1 = Demoras Operativas
- X_2 = Demoras No Operativas
- T = Horas por guardia
- $Y = T - (X_1 + X_2)$

Donde:

- $T = 12$ horas
- Y = Variable dependiente
- X_n = Variables independientes

Tabla 3.*Tabla de demoras central mina*

Equipo	Descripción	Fecha	Guardia	Turno	Inicio Demora	Final Demora	Tipo Demora	Tiempo Demora	Demora Programada	Demora no Operativa	Demora Operativa
CV-051	Cambio de Turno	01/01/2025	B	Día	7:00:00 AM	7:10:00 am	No operativas	0.17	0.00	0.17	0.00
CV-052	Cambio de Turno	01/01/2025	B	Día	7:00:00 AM	7:08:00 am	No operativas	0.13	0.00	0.13	0.00
CV-053	Cambio de Turno	01/01/2025	B	Día	7:00:00 AM	7:10:00 am	No operativas	0.17	0.00	0.17	0.00
CV-054	Cambio de Turno	01/01/2025	B	Día	7:00:00 AM	7:10:00 am	No operativas	0.17	0.00	0.17	0.00
CV-055	Cambio de Turno	01/01/2025	B	Día	7:00:00 AM	7:10:00 am	No operativas	0.17	0.00	0.17	0.00
CV-056	Cambio de Turno	01/01/2025	B	Día	7:00:00 AM	7:10:00 am	No operativas	0.17	0.00	0.17	0.00
CV-057	Cambio de Turno	01/01/2025	B	Día	7:00:00 AM	7:10:00 am	No operativas	0.17	0.00	0.17	0.00
CV-058	Cambio de Turno	01/01/2025	B	Día	7:00:00 AM	7:10:00 am	No operativas	0.17	0.00	0.17	0.00
CV-059	Cambio de Turno	01/01/2025	B	Día	7:00:00 AM	7:10:00 am	No operativas	0.17	0.00	0.17	0.00
CV-060	Cambio de Turno	01/01/2025	B	Día	7:00:00 AM	7:10:00 am	No operativas	0.17	0.00	0.17	0.00
CV-061	Cambio de Turno	01/01/2025	B	Día	7:00:00 AM	7:10:00 am	No operativas	0.17	0.00	0.17	0.00
CV-062	Cambio de Turno	01/01/2025	B	Día	7:00:00 AM	7:10:00 am	No operativas	0.17	0.00	0.17	0.00
CV-063	Cambio de Turno	01/01/2025	B	Día	7:00:00 AM	7:10:00 am	No operativas	0.17	0.00	0.17	0.00
CV-064	Cambio de Turno	01/01/2025	B	Día	7:00:00 AM	7:10:00 am	No operativas	0.17	0.00	0.17	0.00
CV-065	Cambio de Turno	01/01/2025	B	Día	7:00:00 AM	7:10:00 am	No operativas	0.17	0.00	0.17	0.00
CV-066	Cambio de Turno	01/01/2025	B	Día	7:00:00 AM	9:43:00 am	Mecánico	2.72	2.72	0.00	0.00
CV-067	Cambio de Turno	01/01/2025	B	Día	7:00:00 AM	9:10:00 am	PM	2.17	2.17	0.00	0.00

Nota. Elaboración propia

Análisis

En la tabla anterior se obtiene la causa de la demora, el tiempo de dicha demora y demás descripciones como código de equipo, fecha, guardia, turno, etc., para un posterior análisis.

Con dicha tabla se realizó un ordenamiento teniendo en cuenta los tipos de demoras operativas y no operativas.

Tabla 4.*Tabla de demoras por tipo*

Equipo	Fecha	Guardia	Turno	Tiempo Demora (hrs)	Demora Operativa (hrs)	Demora no Operativa (hrs)	Demora OP + No Op (hrs)	Demora Mtto (hrs)	Tiempo Efectivo (hrs)
CV-051	01/09/2024	B	Día	1,85	0,08	1,77	1,85	0,00	10,15
CV-052	01/01/2024	B	Día	2,35	0,08	2,27	2,35	0,00	9,65
CV-053	01/01/2024	B	Día	1,85	0,08	1,77	1,85	0,00	10,15
CV-054	01/01/2024	B	Día	2,42	0,08	2,33	2,42	0,00	9,58
CV-055	01/01/2024	B	Día	2,75	0,08	2,67	2,75	0,00	9,25
CV-056	01/01/2024	B	Día	2,25	0,08	2,17	2,25	0,00	9,75
CV-057	01/01/2024	B	Día	1,92	0,08	1,83	1,92	0,00	10,08
CV-058	01/01/2024	B	Día	2,30	0,08	2,22	2,30	0,00	9,70
CV-059	01/01/2024	B	Día	9,62	0,08	5,73	5,82	3,80	2,38
CV-060	01/01/2024	B	Día	2,42	0,08	2,33	2,42	0,00	9,58
CV-061	01/01/2024	B	Día	2,82	0,08	1,93	2,02	0,80	9,18
CV-062	01/01/2024	B	Día	5,78	0,08	1,65	1,65	4,13	6,22
CV-063	01/01/2024	B	Día	4,13	0,08	2,65	2,73	1,40	7,87
CV-064	01/01/2024	B	Día	4,50	0,08	2,18	2,27	2,23	7,50
CV-065	01/01/2024	B	Día	1,85	0,08	1,77	1,85	0,00	10,15
CV-066	01/01/2024	B	Día	12,00	0,08	0,00	0,05	12,00	0,00
CV-067	01/01/2024	B	Día	2,25	0,08	2,17	2,25	0,00	9,75
CV-068	01/01/2024	B	Día	3,60	0,08	3,60	3,60	0,00	8,40
CV-069	01/01/2024	B	Día	2,58	0,08	2,50	2,58	0,00	9,42
CV-070	01/01/2024	B	Día	2,25	0,08	2,17	2,25	0,00	9,75
CV-071	01/01/2024	B	Día	1,85	0,08	1,77	1,85	0,00	10,15
CV-072	01/01/2024	B	Día	2,25	0,08	2,17	2,25	0,00	9,75
CV-073	01/01/2024	B	Día	2,38	0,08	2,30	2,38	0,00	9,62

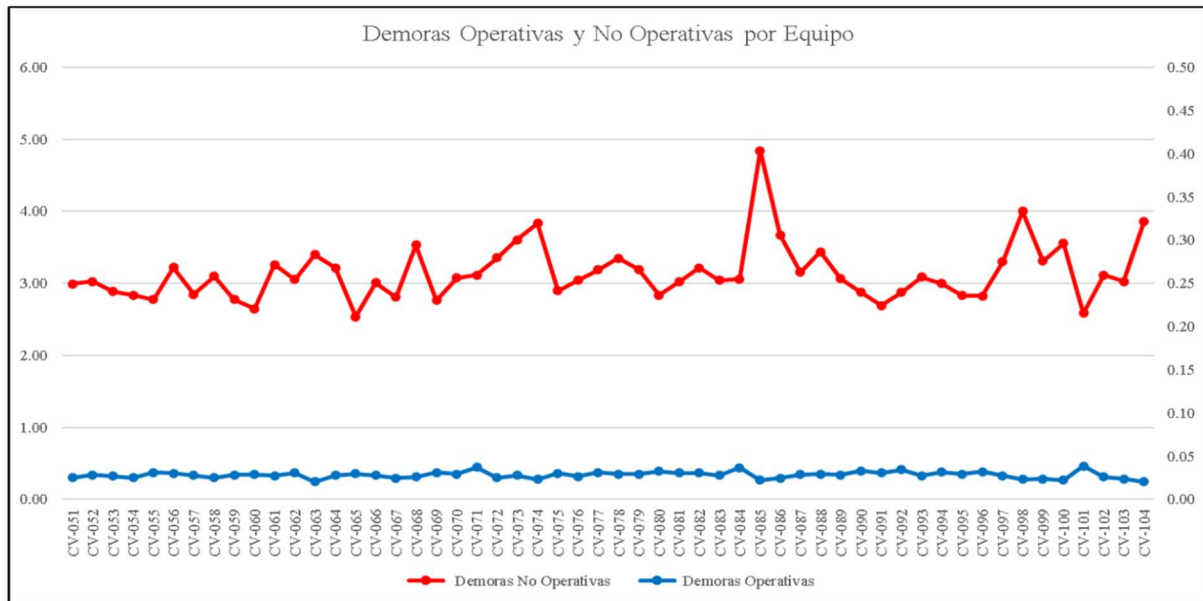
Nota. Elaboración propia

4.4.2.6 Distribución de data

Se realizó el análisis del comportamiento de la data, en la siguiente figura se muestra la variación de demoras operativas y no operativas por volquetes.

Figura 12.

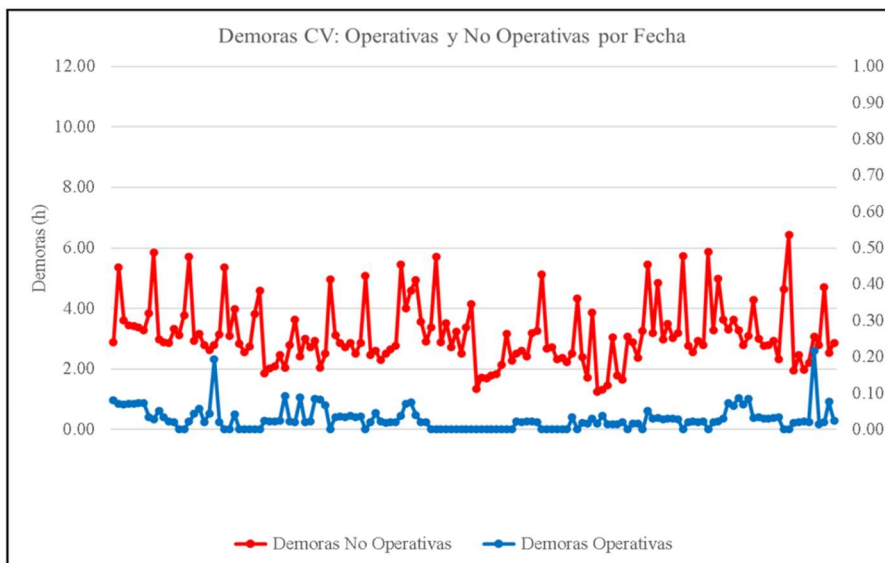
Demoras por turno: operativas y no operativas



Nota. Elaboración propia

Figura 13.

Demoras operativas y no operativas de los CV



Nota. Elaboración propia

Análisis

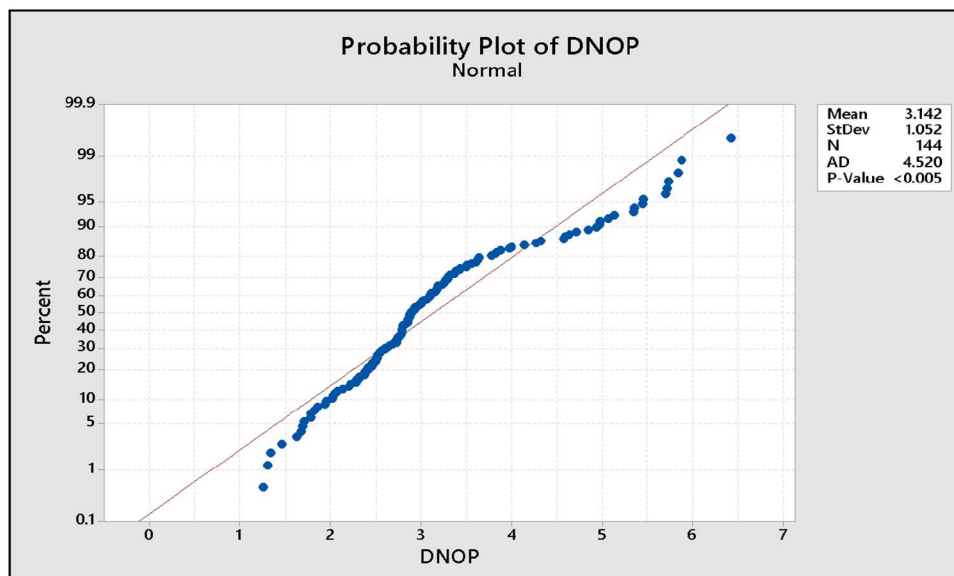
Las demoras operativas y no operativas de la figura previa se establecen como un promedio diario sobre un turno de 12 horas, siendo las demoras no operativas las más altas. Se elaboró, además, el anterior gráfico para cada volquete, observándose un comportamiento parecido.

Las gráficas anteriores indican que la variabilidad más alta ocurre entre días, no entre volquetes, confirmando así la presencia de causas asignables dentro. También se puede apreciar en esas mismas gráficas que las demoras operativas tienen niveles bajos y poca variabilidad entre volquetes. Por lo tanto, se llevará a cabo un análisis sobre las demoras no operativas, ya que estas son más elevadas y tienen una mayor variabilidad que las demoras operativas.

Se prosigue a trabajar con demoras no operativas por turno, se obtiene un valor promedio de todos los equipos debido a que la mayor variabilidad no se encuentra entre ellos, sino entre días; luego se realizó el test de normalidad de Anderson – Darling mostrado a continuación:

Figura 14.

Teste de Normalidad Anderson - Darling



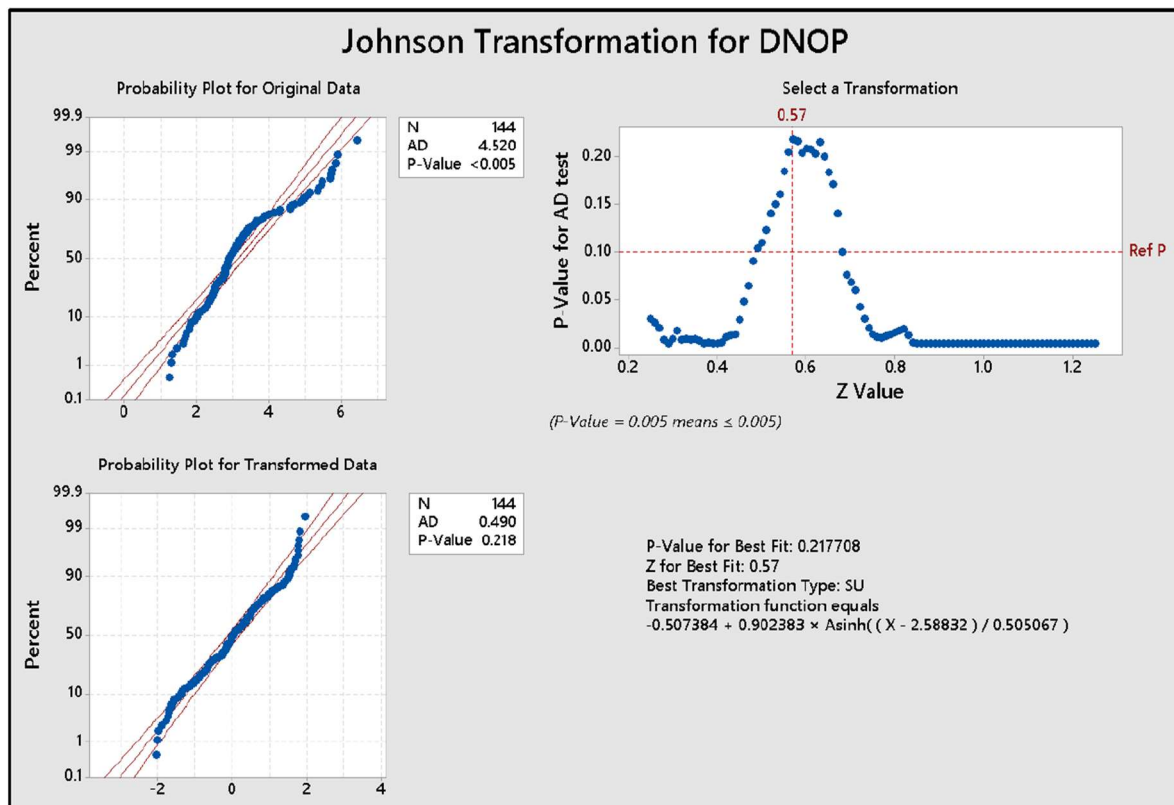
Nota. Elaboración propia en minitab.

Análisis

De la figura anterior se obtiene que la data no muestra una distribución normal, por lo que utilizó Minitab para identificar la distribución de la data, arrojando como resultado que mediante una transformación de Johnson se ajusta a una distribución normal.

Figura 15.

Transformación de Jhonson



Nota. Elaboración propia en minitab.

4.4.2.7 Capacidad del proceso – Nivel Sigma

Para la determinación de los límites del proceso se tiene en cuenta aquellas demoras que son inherentes a la operación, las cuales denominaremos demoras fijas y otras demoras.

Tabla 5.*Análisis de demoras fijas*

Descripción	Demora No Operativa (h/g)
Alimentación/Descanso	1.2
Cambio de Turno	0.6
Condiciones climáticas/polución	0.5
Pausas activas	0.2
Otras	0.5
Límite superior	3.0

Nota. Central Mina

Análisis

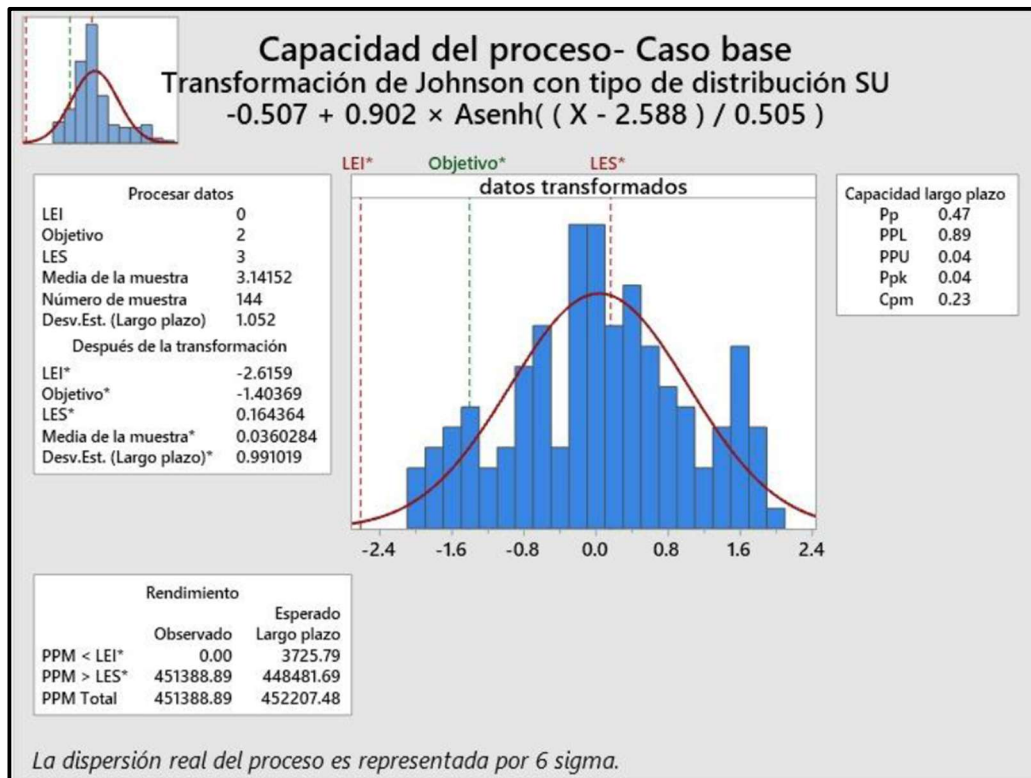
De la tabla anterior se establece el límite superior en 3 horas por guardia, esto debido a que se tomaron las demoras más comunes luego de un mapeo de la data.

Del mismo modo, se analizaron las demoras para establecer el límite inferior, estableciéndose este en 0 hora, debido al llenado del excel de central mina, el cual tiene como registros equipos que trabajaron casi las 12 horas, sin embargo, se debe de considerar que siempre se tiene 1 hora de alimentación / descanso.

Para el cálculo de la capacidad del proceso se procedió a realizar el siguiente gráfico con la data transformada, teniendo en cuenta los LEI y LES, en 0 hora y 3 horas respectivamente.

Figura 16.

Capacidad del proceso del caso base



Nota. Elaboración propia en minitab.

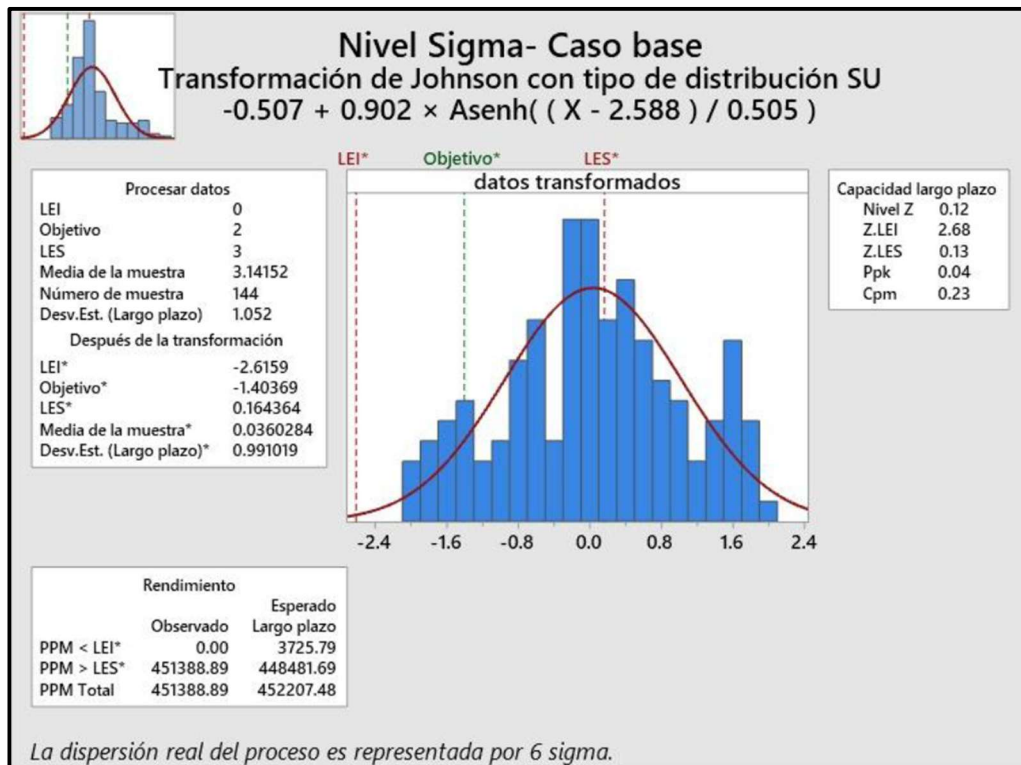
Del gráfico anterior se tiene lo siguiente:

- Pp= 0.47, que nos indica la capacidad potencial a largo plazo
- Ppk = 0.04, se interpreta como la capacidad real a largo plazo

A consecuencia del análisis no normal de la data, la determinación del nivel sigma se procederá utilizando como base a la data normalizada por el método de Johnson, debido a que nuestra data contiene valores iguales a cero.

Figura 17.

Nivel sigma del caso base



Nota. Elaboración propia en minitab.

Análisis:

El gráfico anterior muestra el nivel sigma en el control de las demoras no operativas, el cual es de 0.12 sigma, esto nos indica que el proceso es totalmente mejorable en el tiempo, teniendo el potencial de reducir la variabilidad del proceso significativamente.

4.4.3 Analizar

Se realiza un análisis cualitativo sobre las demoras no operativas, para ello en la siguiente figura se muestra la clasificación general de demoras.

Figura 18.

Clasificación de demoras

CLASIFICACIÓN DE DEMORAS							
Cod.	DEMORA OPERATIVA (DO)	DEMORAS MANTENIMIENTO				Cod.	DEMORA NO OPERATIVA (Stand By)
		Cod.	PROGRAMADO (MP)	Cod.	NO PROGRAMADO (MN)		
DO-01	Cambio de frente/proyecto	MP-01	Pre inspección	MN-01	Sistema de Frenos	SB-01	Espera por cambio de frente
DO-02	Traslado por voladura / tormenta eléctrica	MP-02	Cambio/Rotación de neumáticos/Carrilería	MN-02	Sistema de Dirección, suspensión y/o carrilería	SB-02	Cambio de Guardia
DO-03	Abastecimiento de combustible, adblue, etc.	MP-03	Engrase y lubricación	MN-03	Sistema de Tolda	SB-03	Cambio de Turno
DO-04	Demora en carguo y descarga	MP-04	PM150	MN-04	Sistema hidráulico, cilindro, levante y/o cucharón	SB-04	Espera por voladura / tormenta eléctrica
DO-05	Mantenimiento de vías/Plataformas	MP-05	PM250	MN-05	Sistema Eléctrico	SB-05	Evento de seguridad / Simulacro/Festividad
DO-06	Inspeccion de equipo/área	MP-06	PM500	MN-06	Motor, lubricantes, refrigerantes etc.	SB-06	Condiciones climáticas adversas
DO-07	Preparación de frente	MP-07	PM1000	MN-07	Cabina (Cinturón de seg., asientos, Aire acond., etc.)	SB-07	Falta de equipo de carguo / Acarreo / Empuje
DO-08	Abastecimiento de agua	MP-08	PM2000	MN-08	Espera por mantenimiento	SB-08	Capacitación / Entrenamiento
DO-09	Cambio de aceros de perforación			MN-09	Traslado a taller/tajo por falla mecánica	SB-09	Falta de operador
DO-10	Barra atorada			MN-10	Atención por neumáticos	SB-10	Falta de frente/área/malla
DO-11	Revisión de varillaje			MN-11	Inspección mecánica	SB-11	Alimentacion/Descanso
DO-12	Barra doblada			MN-12	Cambio de gets	SB-12	Coordinación de trabajo
DO-13	Revisión del sistema antivuelco			MN-13	Sistema de rodamiento	SB-13	Falta de combustible
DO-14	Otros			MN-14	Mástil de perforación	SB-14	Condiciones inseguras
				MN-15	Compresor	SB-15	Traslado en camabaja
				MN-16	Mandos y controles	SB-13	Otros
				MN-17	Cabezal		
				MN-11	Otros		

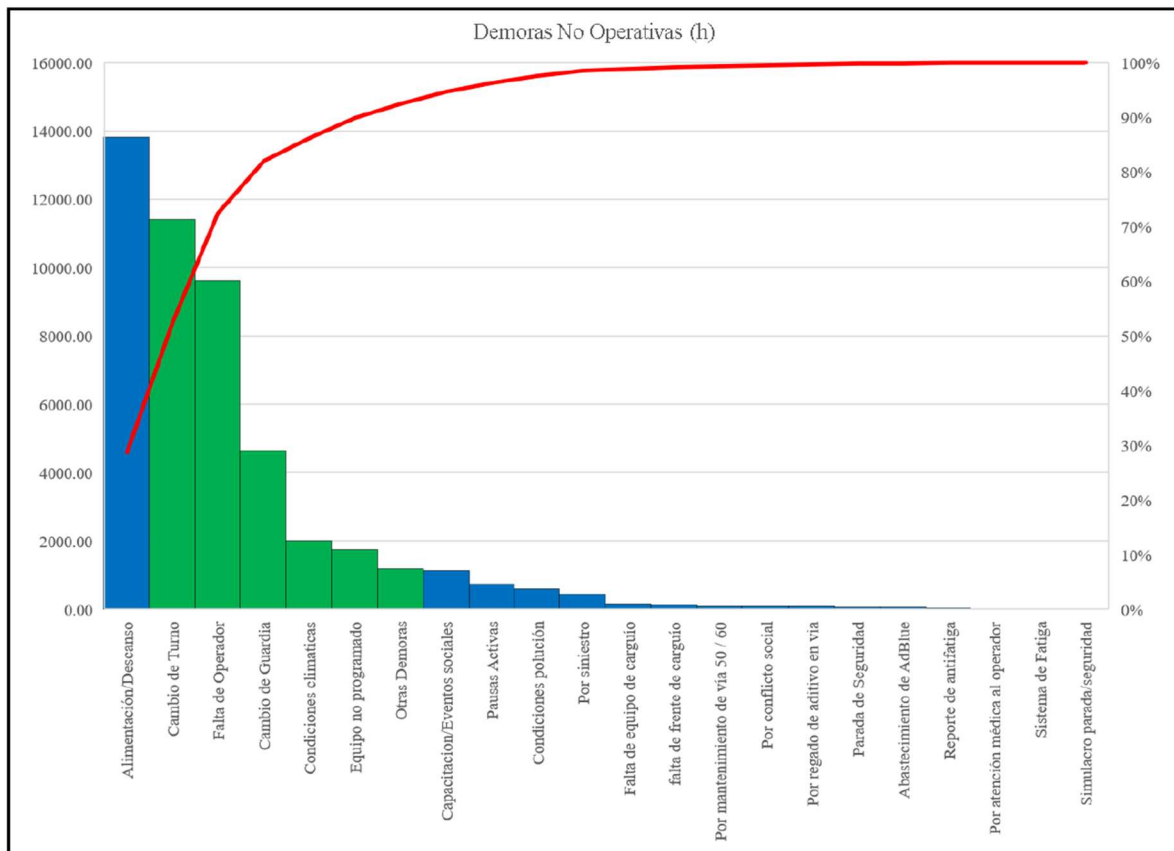
Nota. Operaciones mina U.M.

4.4.3.1 Diagrama de pareto

De acuerdo a la data recolectada de demoras no operativas se construye el siguiente Diagrama de Pareto para obtener de acuerdo a la clasificación de demoras no operativas las principales demoras que se han tenido en los meses analizados.

Figura 19.

Diagrama de pareto de demoras no operativas



Nota. Elaboración propia con data de central mina

De acuerdo a lo mostrado en la figura anterior se tienen las principales demoras no operativas, siendo las 7 con mayor presencia las siguientes:

1. Alimentación / descanso
2. Cambio de turno
3. Falta de operador
4. Cambio de guardia
5. Condiciones climáticas
6. Equipo no programado
7. Otras demoras

Se realiza un análisis causa – raíz con la técnica “5 por qué” de 6 de las 7 demoras no operativas con mayor presencia; no se analiza las demoras por alimentación / descanso, debido a que estas son fijas y siempre estarán presentes en la operación.

4.4.3.2 5 whys

Se realizó un análisis de las principales demoras identificadas obteniendo lo siguiente:

Tabla 6.

Whys de cambio de turno

Planteamiento del problema	Por qué 1	Por qué 2	Por qué 3
		¿Por qué no se tiene un	¿Por qué el personal
¿Por qué existen demoras por cambio de turno?	Porque no se ha regresado a lo anterior	cambio en caliente? Porque el personal demora en llegar y sale más temprano	demora en llegar? El personal sube y baja todos los días a las 7:00 am y 06:30 pm

Nota. Elaboración propia

Tabla 7.

Whys de falta de operador

Planteamiento del problema	Por qué 1	Por qué 2	Por qué 3
			¿Por qué no se tiene
¿Por qué existen demoras por falta de operador?	Se tienen descansos médicos por parte de los operarios y no hay operadores retén	¿Por qué no hay operarios de retén? No se tiene un control sobre ausencias	un control sobre las ausencias? No se tiene conciencia de la falta real de producción

Nota. Elaboración propia

Tabla 8.*Whys de cambio de guardia*

Planteamiento del problema	Por qué 1	Por qué 2	Por qué 3
		¿Por qué el personal	¿Por qué se mantiene
¿Por qué existen demoras por cambio de turno?	Porque el personal sube desde provincia ese mismo día	sube ese mismo día? Porque desde pandemia se estableció así para evitar contagios	esa medida? Porque no se ha establecido otro plan con cambio de régimen

Nota. Elaboración propia**Tabla 9.***Whys de condiciones climáticas*

Planteamiento del problema	Por qué 1	Por qué 2	Por qué 3
		¿Por qué los equipos	¿Por qué se coloca
¿Por qué existen demoras por condiciones climáticas?	Porque los equipos deben parar hasta que las condiciones sean seguras	deben parar? Porque se optan por medidas donde se tienen condiciones seguras como el regado de grava	grava? Porque es la medida que da resultados en las vías ante la presencia de lluvias

Nota. Elaboración propia

Tabla 10.

Whys de equipo no programado

Planteamiento del problema	Por qué 1	Por qué 2	Por qué 3
¿Por qué existen demoras por no programados?	Porque se completa la flota	¿Por qué se completa la flota sin programar todos los equipos? Porque cae un equipo de carguío	¿Por qué cae un equipo de carguío? Por falla mecánica o mantenimiento programado

Nota. Elaboración propia

Tabla 11.

Whys de otras demoras

Planteamiento del problema	Por qué 1	Por qué 2	Por qué 3
¿Por qué existen demoras clasificadas como “otras demoras”?	Capacitación centrales operadores	¿Por qué falta capacitar a los centrales y operadores? Porque no se tiene un programa de capacitación	¿Por qué no se tiene un programa de capacitación? Por el déficit de personal y porque no se sabía la gran cantidad de demoras no clasificadas

Nota. Elaboración propia

4.4.4 Mejorar

Se procedió al análisis de la data de Central Mina para integrar la información de productividad (afectada por demoras) y la producción mensual para así determinar el impacto que tendría nuestra disminución de demoras sobre las principales.

4.4.4.1 Disponibilidad mecánica

Para su cálculo se muestra la fórmula utilizada por Central Mina, para lo cual se consideran las demoras por mantenimiento en general y las horas totales por guardia (12 horas).

$$\text{Disponibilidad mecánica} = \frac{HT - DM}{HT}$$

4.4.4.2 Uso de la disponibilidad

Para calcularlo, se presenta la fórmula que utiliza Central Mina, la cual considera las horas totales (de mantenimiento, operativas y no operativas), lo cual es un KPI. más conservador que muestra la eficacia de la gestión operativa en la mina.

$$\text{Uso de la disponibilidad} = \frac{HT - DM - DNO - DO}{HT - DM}$$

4.4.4.3 Utilización

Dado que la fórmula anterior únicamente refleja la eficiencia de las operaciones mineras, se efectuó el cálculo de la utilización, que tiene en cuenta los retrasos del mantenimiento para un transparente en relación con las operaciones generales.

$$\text{Uso de la disponibilidad} = \frac{HT - DM - DNO - DO}{HT - DM}$$

- HT: Horas totales, considerado en 12 horas
- DM: Demoras por mantenimiento programado y no programado (horas)
- DT: Demoras totales, compuestas por demoras de mantenimiento, operativas y no operativas
- DNO: Demoras no operativas
- DO: Demoras operativas

Se llevó a cabo un análisis de los datos de Central Mina con el objetivo de combinar la información sobre productividad (que fue impactada por retrasos) y la producción que se obtiene cada mes. Como se justificó, nos enfocamos en los retrasos no operativos que impactan el uso de la disponibilidad y, por ende, conllevan una disminución de la producción.

A continuación, se presentan los datos que serán utilizados para calcular la producción

Tabla 12.

DNO & Kpis's de central mina

Mes	D. Mecánica	Uso de la Disponibilidad	Demora No Operativas
Enero	95%	68%	11,456
Febrero	92%	72%	10,117
Marzo	86%	72%	9,211
Abril	84%	68%	10,535
Mayo	90%	70%	7,535

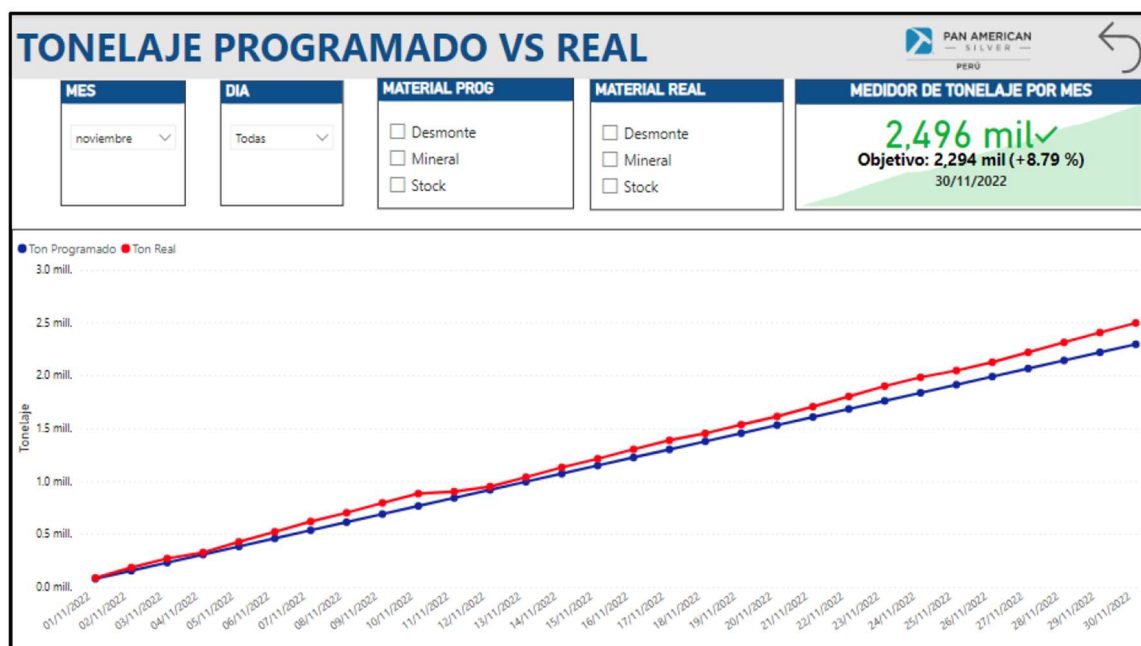
Nota. Central mina

Se utilizó la evaluación del tablero de mandos en Power BI para calcular la productividad por hora, el cual fue diseñado a partir de los datos de Central Mina para facilitar su entendimiento.

La siguiente figura muestra la producción acumulada mes a mes en comparación con lo planificado. Este dato se usará para calcular la productividad horaria, que estará relacionada con la disponibilidad mecánica y el uso de dicha disponibilidad, ya que Central Mina calcula esta productividad tomando en cuenta el número de viajes, lo cual es un enfoque diferente pero que debe llevar al mismo resultado, como veremos más adelante.

Figura 20.

Tonelaje programado vs ejecutado por mes



Nota. Elaboración propia

La productividad por hora se determina de la siguiente manera: la producción mensual es el resultado del producto de los parámetros presentados, a diferencia de la producción que Central Mina calcula, que se basa en contar las veces que cada camión volquete efectúa viajes.

$$Producción \left(\frac{ton}{mes} \right) = DM * UD * ND * NE * HT * PRD$$

- DM: Demoras por mantenimiento programado y no programado (horas)
- UD: Uso de la disponibilidad
- ND: Número de días
- NE: Número de equipos
- HT: Horas totales (24h/día)
- PRD: Productividad (ton/h)

Finalmente, se logró el caso base que servirá como punto de partida para implementar la mejora y verificar. Cómo la disminución de retrasos no operativos afecta el aumento de producción mensualmente.

Tabla 13.

DNO & Kpis's de central mina

Mes	Días	DNOP (hr/mes)	Utilización	Productividad (t/h)	Producción (t/mes)
Enero	31	11,456	65%	106	2,655,530
Febrero	28	10,117	66%	103	2,720,302
Marzo	31	9,211	61%	105	2,496,098
Abril	30	10,535	58%	108	2,490,348
Mayo	31	7,535	62%	102	1,816,770

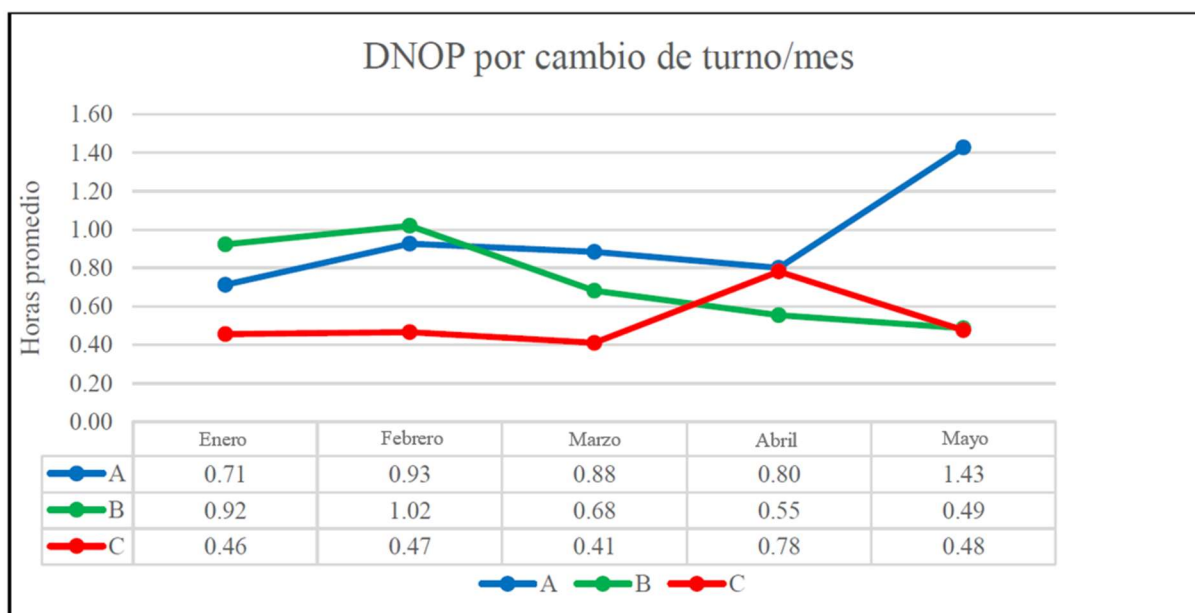
Nota. Elaboración propia

4.4.4.4 Cambio de turno

Respecto al asunto de la rotación de turnos, se ha propuesto implementar el cambio en caliente, por lo que se examinan las demoras por la rotación de turnos en el periodo de tiempo diferenciado por guardia, a continuación, se presenta un gráfico referida a las horas de retraso debido a cambios de turno.

Figura 21.

Demoras por cambio de turno por mes y por guardia



Nota. Elaboración propia

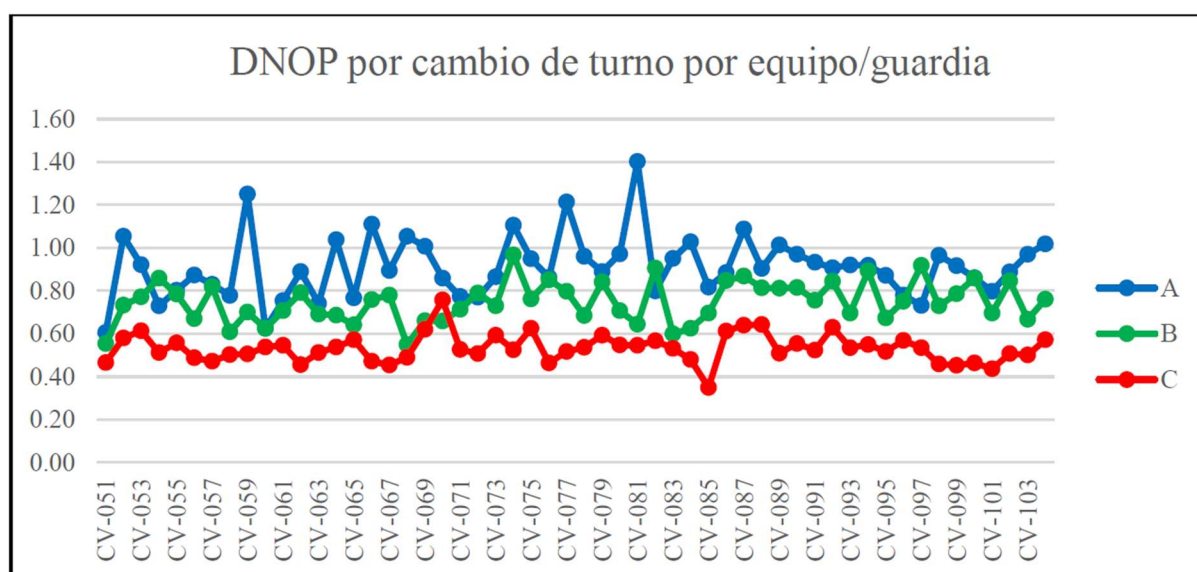
Análisis

Es importante destacar de la imagen anterior que la variabilidad del mes de enero se debe a que el personal de la zona de influencia recibió autorización para regresar a sus casas todos los días desde entonces.

A continuación, se presenta el comportamiento de demoras por equipo y por guardia, observándose una tendencia más pronunciada en la guardia A, a lo que respecta a las demoras por cambio de turno.

Figura 22.

Demoras por cambio de turno, guardia y por equipo

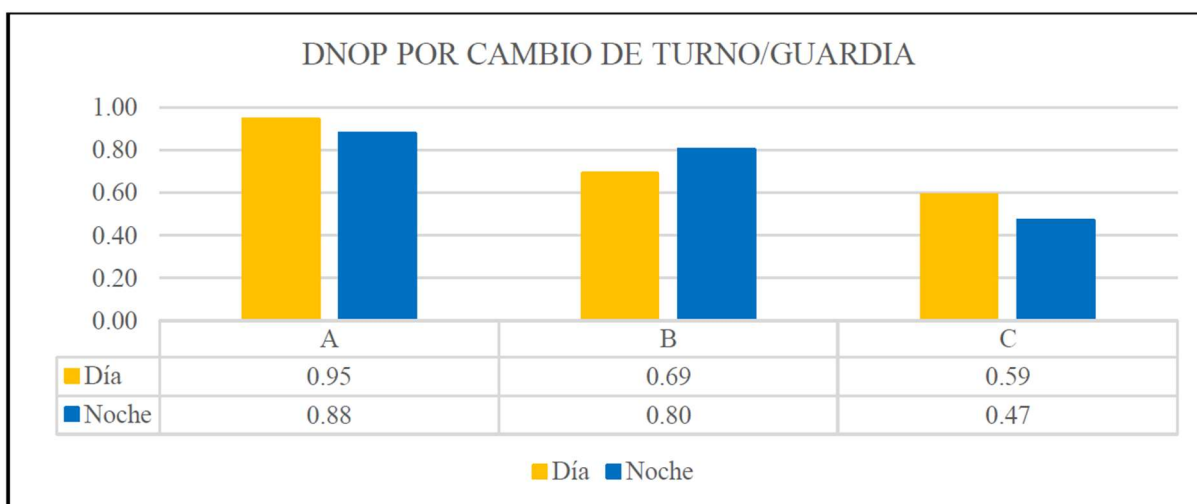


Nota. Elaboración propia

A continuación, se muestra el tiempo de demora por cambio de turno por guardia y por turno (Día y Noche).

Figura 23.

Demoras por cambio de turno, por guardia y por equipo



Nota. Elaboración propia.

Aquí podemos ver la distribución que se tiene por cada turno, tanto al inicio como al final del turno, en promedio.

Tabla 14.

Inicio y fin de guardia

Turno Día			
Inicio de Turno	07:00	07:14	00:14:40
Fin de Turno	18:30	19:00	00:30:00
Turno Noche			
Inicio de Turno	19:00	19:13	00:13:50
Fin de Turno	06:30	07:00	00:30:00

Nota. Elaboración propia

Análisis

Se realiza un análisis de escenarios en el cual se hubiese contado con media hora extra a fin de cada turno, así se redujeron las horas de DNOP por cambio de turno en un 72% con respecto al caso base que se tenía para todos los meses que se analizaron, viéndose un incremento de la producción de 7.2% (promedio) con respecto al caso base.

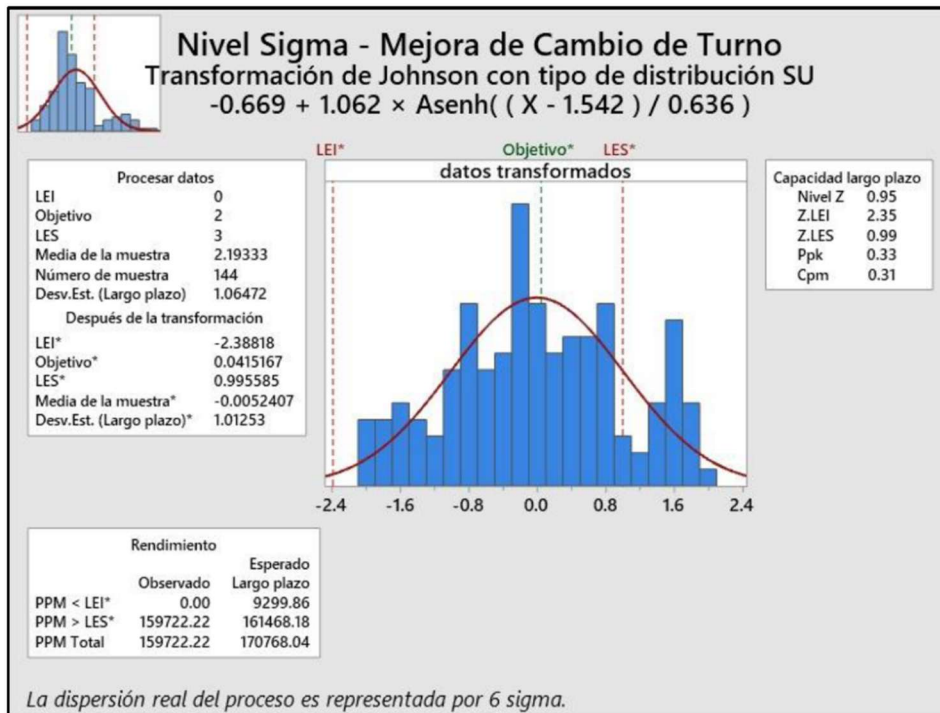
Tabla 15.*Escenario con mejora en cambio de turno (reducción 30 min)*

Mes	Días	DNOP (hr/mes)	Utilización	Productividad (t/h)	Producción (t/mes)	Incremento de Producción	Toneladas dejadas de producir
Enero	31	9,940	69%	106	2,815,575	6.0%	160,045
Febrero	28	8,480	70%	103	2,889,230	6.2%	169,018
Marzo	31	7,710	65%	105	2,653,058	6.3%	156,960
Abril	30	8,964	61%	108	2,659,569	6.8%	169,221
Mayo	31	6,386	67%	102	1,933,925	6.4%	117,155

Nota. Elaboración propia.

Figura 24.

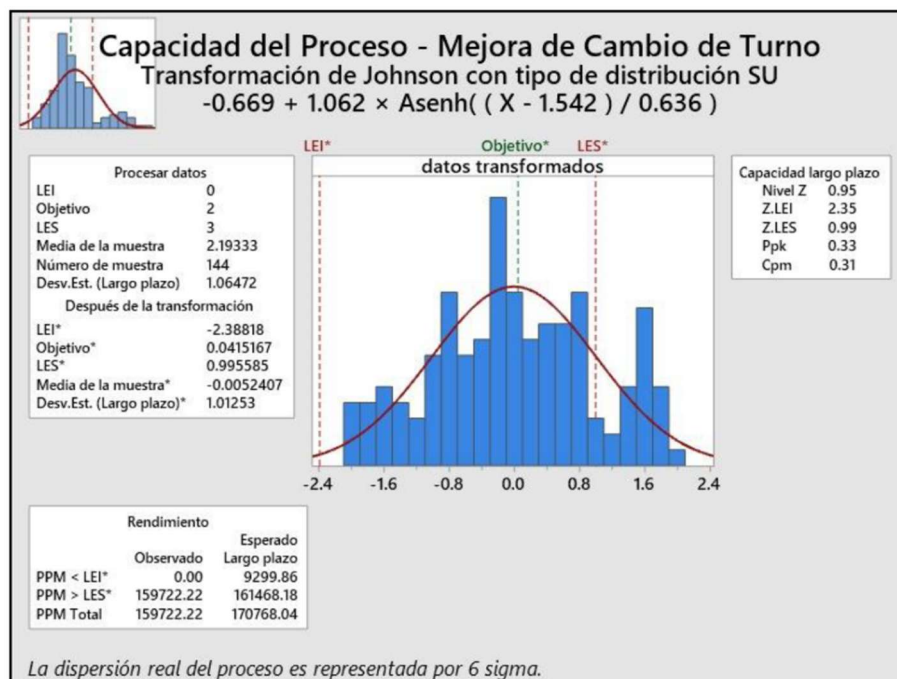
Nivel sigma después de la mejora por cambio de turno



Nota. Elaboración propia en minitab.

Figura 25.

Capacidad del proceso después de las tres mejoras



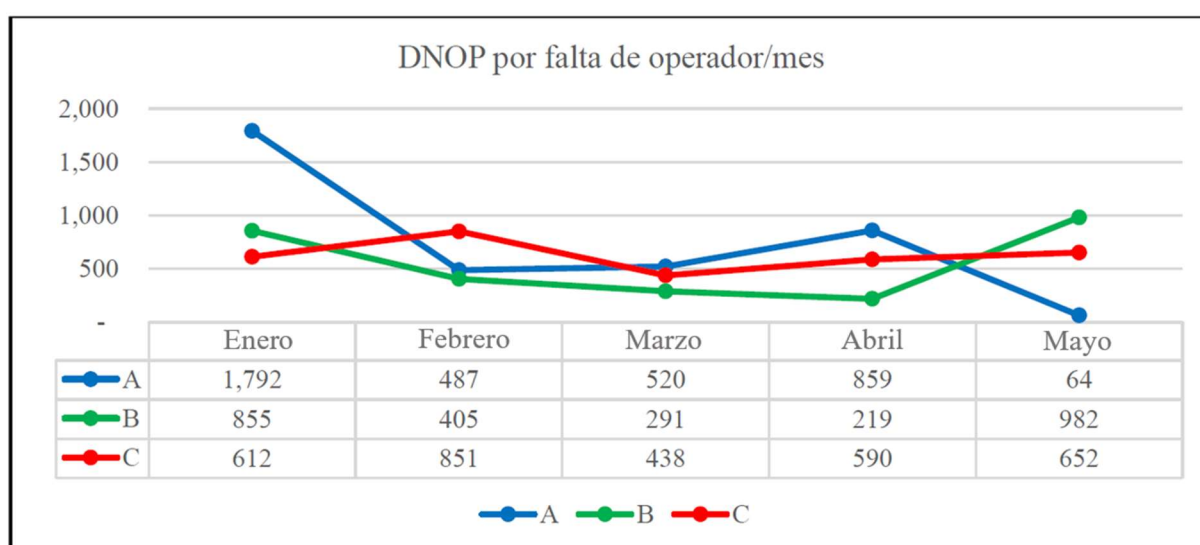
Nota. Elaboración propia en minitab.

4.4.4.5 Falta de operador

En cuanto al asunto de la escasez de operadores, se ha propuesto poner en marcha operadores a retén. Para ello, se examinan las demoras por falta de operador en el periodo estudiado, diferenciadas por guardia. A continuación, se presenta un gráfico que ilustra las horas de retraso por falta de operador.

Figura 26.

Demoras por falta de operador



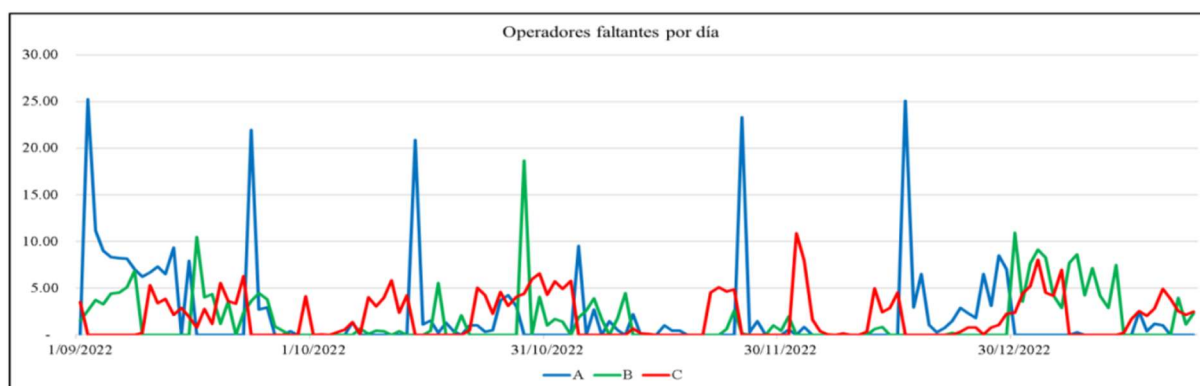
Nota. Elaboración propia.

Análisis

Es importante destacar de la figura anterior que la variabilidad se debe a que, en un mes, el número de días trabajados cambia entre guardias (debido al sistema laboral 14 x 7). Por eso, se elaboró el mismo gráfico, pero esta vez por día, obteniendo esto.

Figura 27.

Operadores faltantes por día



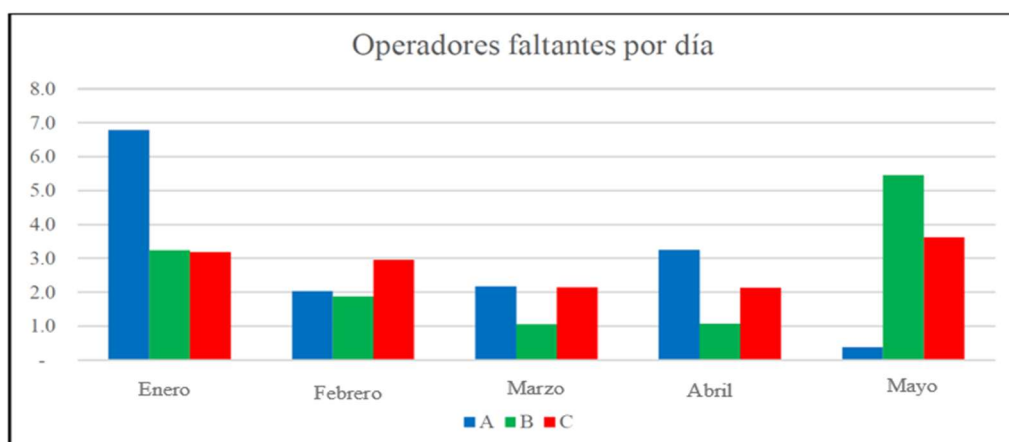
Nota. Elaboración propia.

Análisis

La figura anterior muestra las demoras no operativas debidas a la escasez de operadores, medida por el número de estos que faltaron diariamente, diferenciados por guardia. En algunos días se aprecian valores muy altos; esto se debe principalmente al llenado del Excel de central mina, que es la fuente de datos para elaborar estos gráficos. Se observó que, en esos días, el motivo del retraso fue el cambio de guardia; por lo tanto, puede afirmarse que este valor está sobreestimado. Luego se calculó un promedio mensual con los datos de los operadores ausentes cada día y se obtuvo lo siguiente.

Figura 28.

Promedio mensual de operadores faltantes por día



Nota. Elaboración propia.

Análisis

Se obtuvo como dato que en promedio faltan 3 operadores por día para cada guardia, del gráfico de la figura anterior se puede observar que la cantidad de operadores faltantes en promedio por mes varía, por lo que no se puede tener una tendencia de esto, pero en base a la información obtenida y a lo mostrado en el gráfico se plantea contratar 3 operadores a retén para cada guardia.

Se procede a realizar un análisis de escenarios con la información estudiada, en el cual se observaría en como hubiese afectado a la producción el haber contado con operadores a retén, a continuación, se muestra el cuadro resumen.

Tabla 16.

Horas disminuidas al contar con 3 operadores a retén por guardia

Mes	A	B	C	Total
Enero	576	577	467	1,620
Febrero	250	174	594	1,018
Marzo	198	263	263	725
Abril	395	116	376	887
Mayo	64	507	451	1,021

Nota. Elaboración propia.

Análisis

Se consideran estas horas para el cálculo del incremento en la producción.

Se realiza un análisis de escenarios en el cual se hubiese contado con 1, 2 y 3 operadores a retén por guardia obteniendo lo mostrado en las siguientes tres tablas.

Tabla 17.

Escenario con 1 Operador a retén por guardia

Mes	Días	DNOP (hr/mes)	Utilización	Productividad (t/h)	Producción (t/mes)	Incremento de Producción	Toneladas dejadas de producir
Enero	31	10,589	66%	106	2,718,559	2.4%	63,029
Febrero	28	9,668	67%	103	2,766,662	1.7%	46,360
Marzo	31	8,876	62%	105	2,531,122	1.4%	35,024
Abril	30	10,130	59%	108	2,533,971	1.8%	43,623
Mayo	31	7,141	64%	102	1,856,976	2.2%	40,206

Nota. Elaboración propia.

Tabla 18.*Escenario con 2 Operadores a retén por guardia*

Mes	Días	DNOP (hr/mes)	Utilización	Productividad (t/h)	Producción (t/mes)	Incremento de Producción	Toneladas dejadas de producir
Enero	31	10,321	68%	106	2,775,353	4.5%	119,823
Febrero	28	9,360	67%	103	2,798,445	2.9%	78,143
Marzo	31	8,643	63%	105	2,555,496	2.4%	59,398
Abril	30	9,853	59%	108	2,563,798	2.9%	73,450
Mayo	31	6,793	65%	102	1,892,490	4.2%	75,720

Nota. Elaboración propia.

Tabla 19.*Escenario con 3 Operadores a retén por guardia*

Mes	Días	DNOP (hr/mes)	Utilización	Productividad (t/h)	Producción (t/mes)	Incremento de Producción	Toneladas dejadas de producir
Enero	31	9,836	69%	106	2,826,574	6.4%	171,044
Febrero	28	9,099	68%	103	2,825,405	3.9%	105,103
Marzo	31	8,486	63%	105	2,571,899	3.0%	75,801
Abril	30	9,647	60%	108	2,585,919	3.8%	95,571
Mayo	31	6,514	66%	102	1,920,925	5.7%	104,155

Nota. Elaboración propia.

Análisis

De las tablas anteriores se puede observar en la última que, teniendo el escenario de haber contado con 3 trabajadores a retén, la producción se hubiese incrementado entre 3% y 6%, lo cual equivale a un incremento promedio aproximado de 110,000 toneladas por mes.

En cuanto al tema de la contratación, se propone primero tener como alternativa una lista de operadores dispuestos a trabajar en la mina en lugar de un compañero que no pudo asistir.

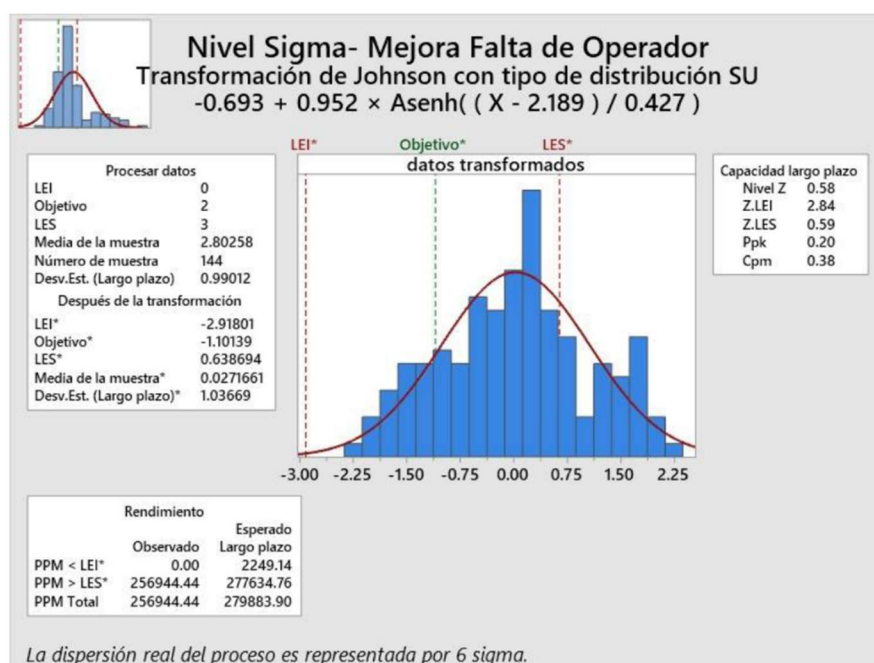
Este enfoque se debe a que la mayoría de los operadores están cerca de la unidad minera, por lo que sería necesario contar con una lista para cada guardia mediante una encuesta que establezca el beneficio económico correspondiente a un día de trabajo. Esto tendría beneficios económicos porque el costo del operador retén se basaría en las condiciones diarias y no requeriría un contrato mensual. De este modo, también tendríamos el personal requerido para la operación.

En el anexo 4 se muestra la encuesta a realizar.

A continuación, se muestra el nivel sigma y capacidad del proceso después de la mejora bajo el escenario de haber contado con 3 operadores a retén.

Figura 29.

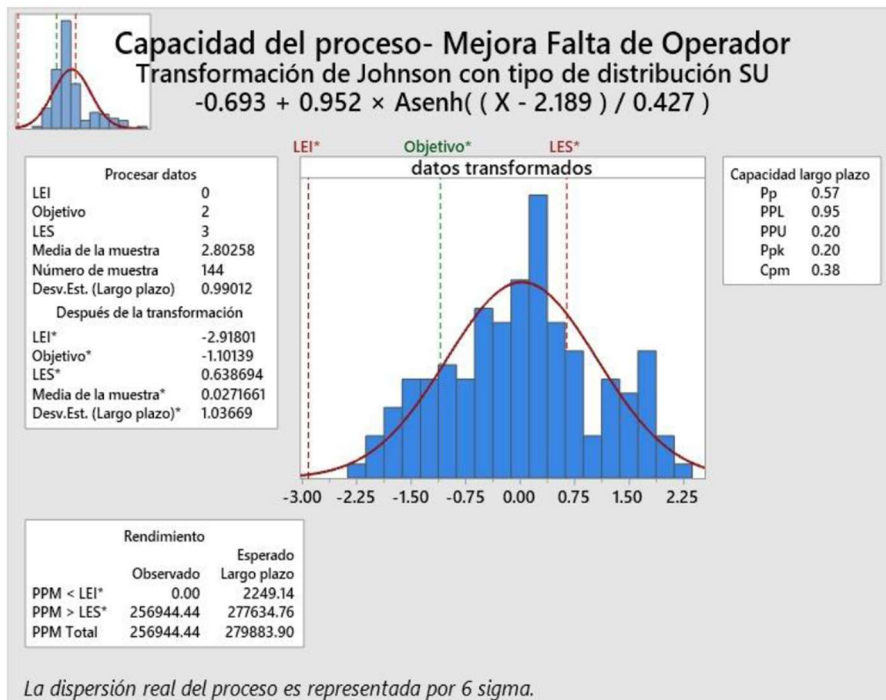
Nivel sigma después de la mejora por falta de operador



Nota. Elaboración propia.

Figura 30.

Capacidad de proceso después de la mejora por falta de operador



Nota. Elaboración propia.

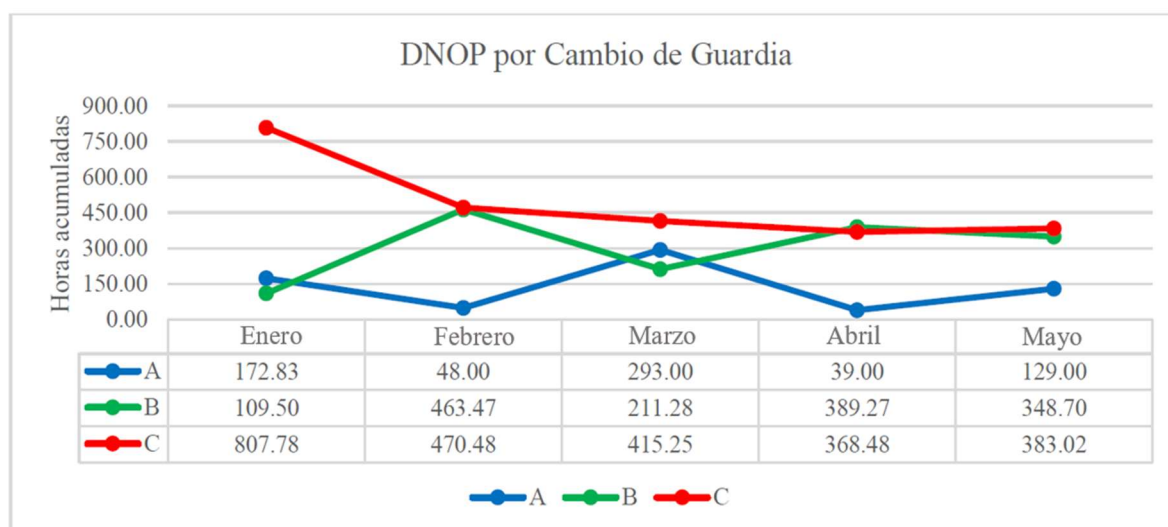
4.4.4.6 Cambio de guardia

En cuanto al cambio de guardia, se ha propuesto realizarlo en caliente. Para ello, se analizan las demoras relacionadas con la escasez de operadores durante el periodo analizado y se dividen por guardia.

A continuación, se presenta un gráfico que representa las horas de demora en el cambio de guardia.

Figura 31.

Demoras por cambio de guardia



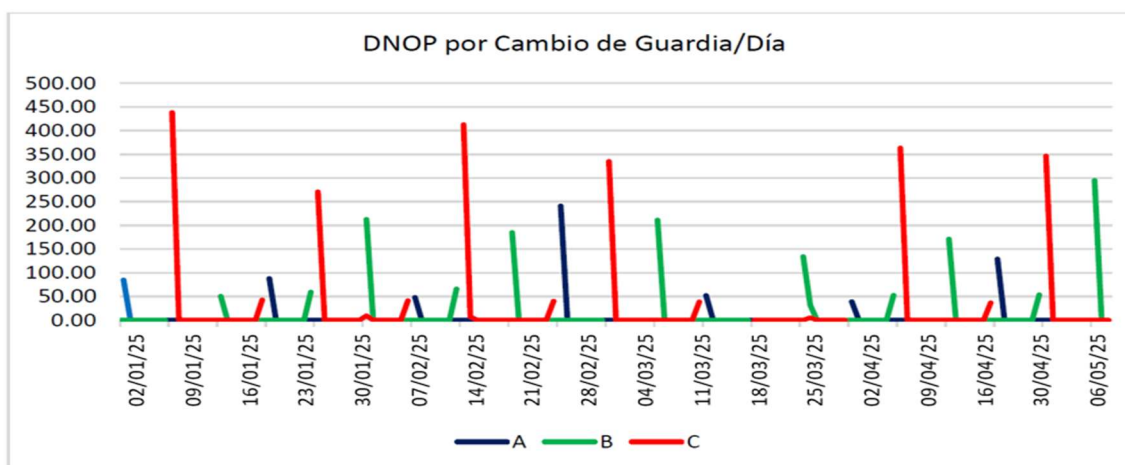
Nota. Elaboración propia.

Análisis

Podemos observar cómo varían las demoras acumuladas por cambio de guardia a través de los meses analizados, se observa una mayor tendencia de demoras en la guardia C en comparación a las demás guardias.

Figura 32.

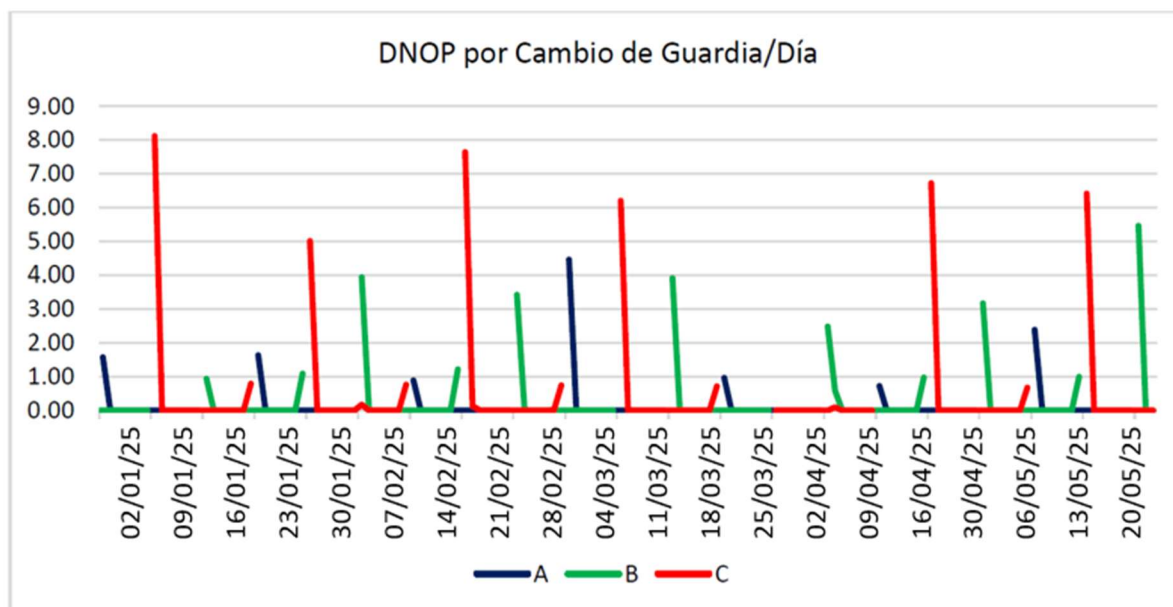
Demoras por cambio de guardia



Nota. Elaboración propia.

Figura 33.

Demora promedio por volquete por cambio de guardia



Nota. Elaboración propia.

Análisis

Podemos observar cómo las demoras por cambio de guardia se dan cada 7 días que es justamente cuando ingresa una nueva guardia a laborar, esta demora solo se presenta en el primer día que ingresa la nueva guardia a laborar, por lo cual los valores llenados fuera de dichos rangos de fecha (demoras entre semana), son consideradas como errores en el llenado de la data por parte de Central Mina.

A continuación, se encuentra el análisis del escenario en el que se disminuyen las demoras no operativas por cambio de guardia, obteniendo lo siguiente.

Tabla 20.*Escenario con mejora por cambio de guardia*

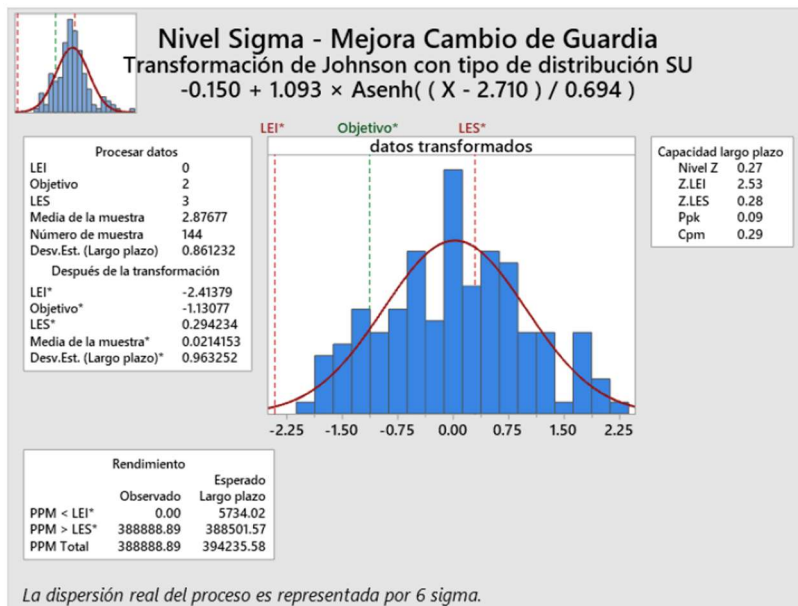
Mes	Días	DNOP (hr/mes)	Utilización	Productividad (t/h)	Producción (t/mes)	Incremento de Producción	Toneladas dejadas de producir
Enero	31	10,523	67%	106	2,753,997	3.7%	98,467
Febrero	28	9,259	68%	103	2,808,945	3.3%	88,643
Marzo	31	8,371	64%	105	2,583,896	3.5%	87,798
Abril	30	9,827	59%	108	2,566,524	3.1%	76,176
Mayo	31	6,765	65%	102	1,895,329	4.3%	78,559

Nota. Elaboración propia.**Análisis**

De la tabla anterior se puede decir que se está dejando de producir un 3.3% de lo ejecutado mensualmente, lo cual equivale a aproximadamente 85,000 toneladas por mes.

Figura 34.

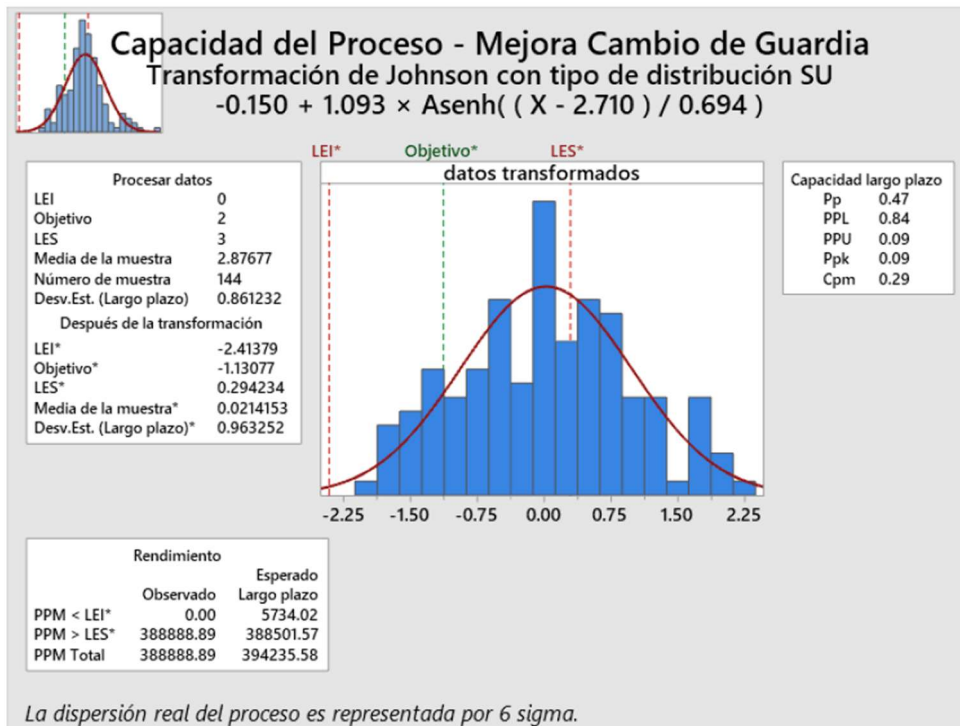
Nivel sigma después de la mejora por cambio de guardia



Nota. Elaboración propia.

Figura 35.

Capacidad del proceso después de la mejora



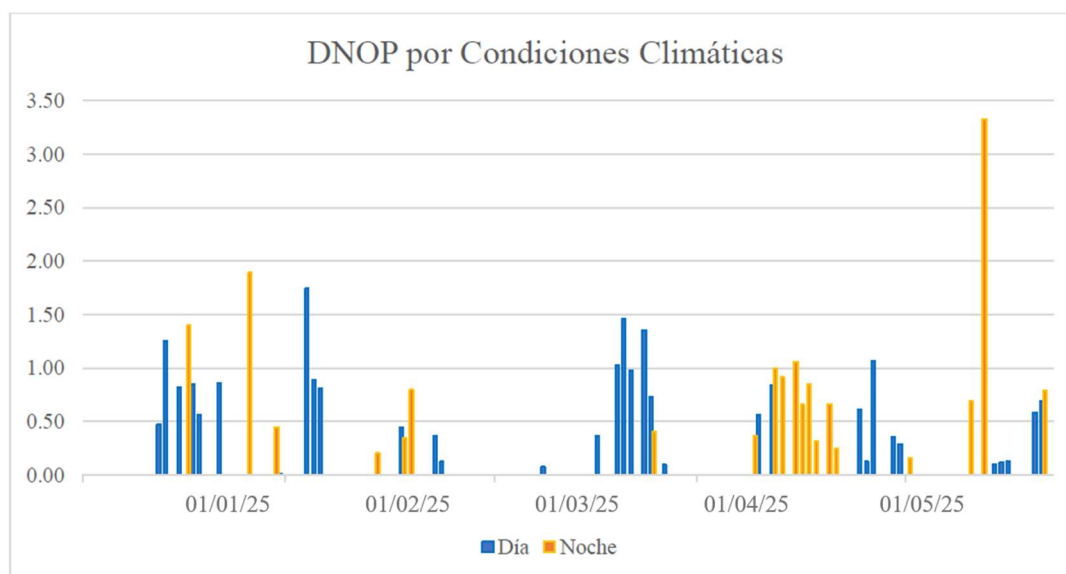
Nota. Elaboración propia.

4.4.4.7 Condiciones climáticas

En el tema de condiciones climáticas la situación que se tiene dentro de los meses analizados es la siguiente:

Figura 36.

DNOP por condiciones climáticas



Nota. Elaboración propia.

Análisis

La causa de las demoras por condiciones climáticas se debe a que los equipos de acarreo deben parar por las condiciones de las vías, las cuales en presencia de agua presentan un comportamiento “jabonoso”, siendo esto muy peligroso para el tránsito de equipos, este comportamiento se debe al material de las vías, como medida actual ante estas condiciones se hecha grava por las vías, sin embargo ello toma un cierto tiempo y además genera una condición por el comportamiento de la grava como un proyectil en contacto con la llanta de los equipos en tránsito; por lo que la solución que se plantea es tener un cronograma de mantenimiento aprovechándose los cambios de guardia (días en los cuales el tránsito de equipos es menor), lo principal de este mantenimiento radica en la obtención de material grueso, en tal cantidad que

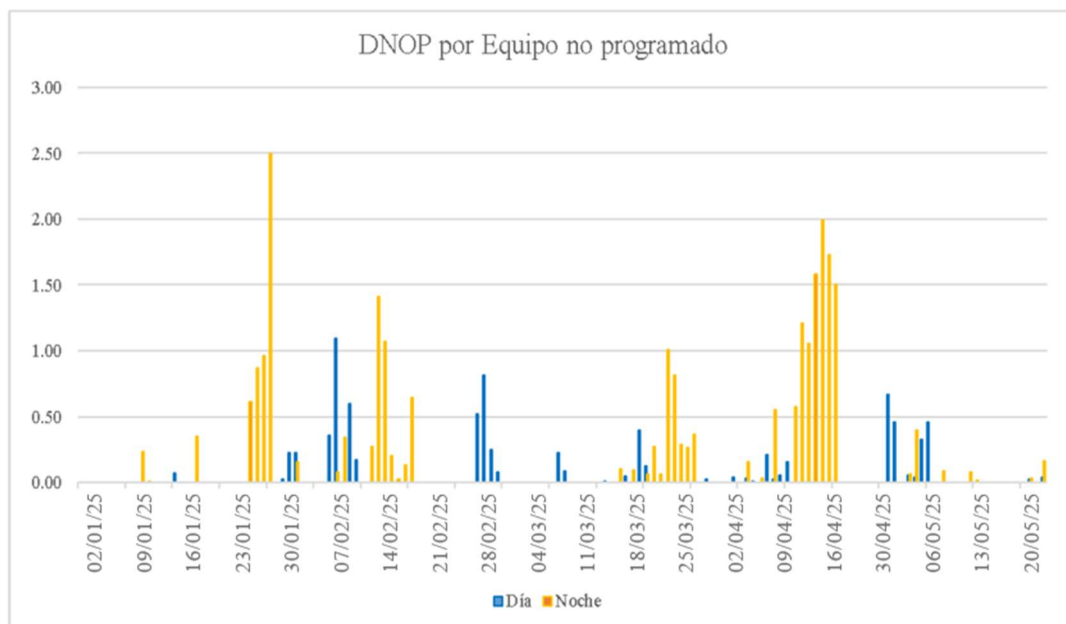
ante presencia de lluvias las vías ya no presenten un comportamiento “jabonoso”, siendo necesario la prueba para la obtención de la dimensión exacta de espesor mínimo que deben tener las vías de material grueso, así como también la frecuencia de este mantenimiento.

4.4.4.8 Equipo no programado

En el caso de demoras no operativas por equipo no programado, se debe a que se completa la flota, es decir, se completa la cantidad de volquetes para las excavadoras, siendo la causa la caída de excavadoras, por lo cual estarían sobrando volquetes para las excavadoras disponibles; el comportamiento que presenta esta demora es al mostrado a continuación.

Figura 37.

Demora por equipo no programado



Nota. Elaboración propia

Análisis

De la figura anterior se puede observar que el comportamiento es variable, y eso se debe a que la falla de una excavadora es un evento fortuito, que si bien se tiene un

mantenimiento programado, se resalta que se tendrá nueva flota de excavadoras, las cuales se tiene previsto que sean reemplazadas paulatinamente durante este año 2025.

En condiciones de contar con todas las excavadoras no se tienen equipos no programados, con lo cual se demuestra que la flota no está sobreestimada.

4.4.4.9 Otras demoras

Para el tema de registro de demoras con la descripción “otras demoras” se plantea capacitaciones tanto a los operadores, ya que son ellos los que reporten las demoras de los equipos, como a los Centrales Mina, quienes son los encargados de registrar estas demoras. El tema de capacitación se centraría en estandarizar el registro de demoras de acuerdo a las situaciones debido a que se registran con diferentes descripciones una misma situación; por ejemplo, en el cambio de guardia, situación en la que el operador puede tardar en llegar a la Unidad Minera e iniciar sus actividades, esto debe registrarse como una demora por cambio de guardia, sin embargo se registra en muchas ocasiones como demora por falta de operador, y así como esta, hay muchas otras situaciones en las se confunden los registros, por lo cual estas capacitaciones ayudarán mucho a llevar un mejor control de la operación

4.4.4.10 Resumen de análisis de escenarios

Se tiene el análisis de escenarios de DNOP con las tres propuestas de mejora, las cuales redujeron en un 43 % las demoras no operativas con respecto al caso base que se tenía para todos los meses que se analizaron, solo con las mejoras en el cambio de turno, falta de operador y cambio de guardia, viéndose un incremento de la producción de 14.5% (promedio para los meses analizados) con respecto al caso base.

Tabla 21.*Escenario con mejora por cambio de guardia*

Mes	Días	DNOP (hr/mes)	Utilización	Productividad (t/h)	Producción (t/mes)	Incremento de Producción	Toneladas dejadas de producir
Enero	31	7,387	75%	106	3,085,085	16.2%	429,555
Febrero	28	6,604	74%	103	3,083,067	13.3%	362,765
Marzo	31	6,146	69%	105	2,816,657	12.8%	320,968
Abril	30	7,369	65%	108	2,831,316	13.7%	340,968
Mayo	31	4,595	73%	102	2,116,639	16.5%	299,869

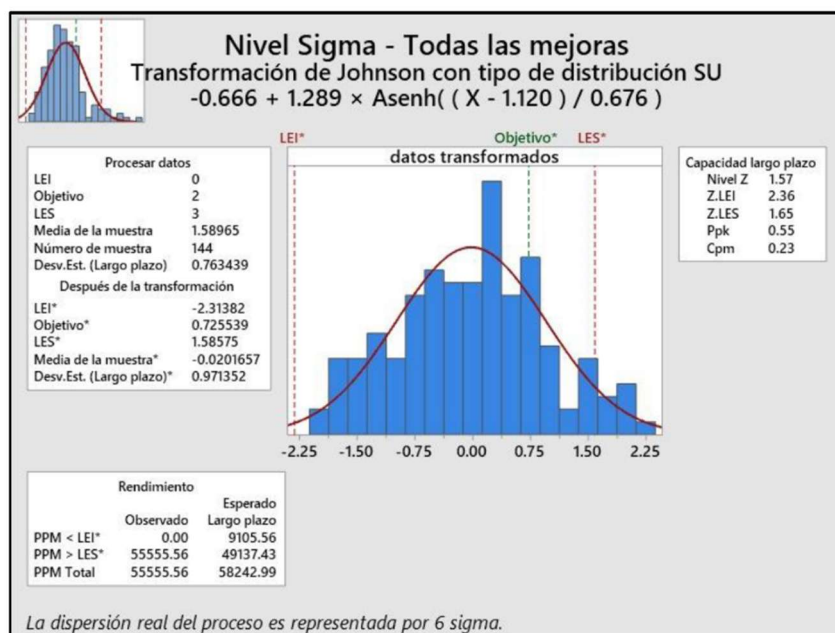
Nota. Elaboración propia.**Análisis**

El porcentaje de reducción de demoras no operativas está en un escenario conservador debido a que el cambio de guardia debe reducirse en su totalidad, así como el cambio de turno debe reflejarse en 1 horas más de uso de los equipos por día, sin embargo el no tener correctamente registrada esta información hace que no se pueda tener el dato exacto de en cuanto se disminuyen las demoras no operativas; este nivel de detalle se obtendrá al ejecutar los planes de control al realizar las mejoras propuestas.

A continuación, se muestra el nivel sigma y la capacidad del proceso después de las tres mejoras.

Figura 38.

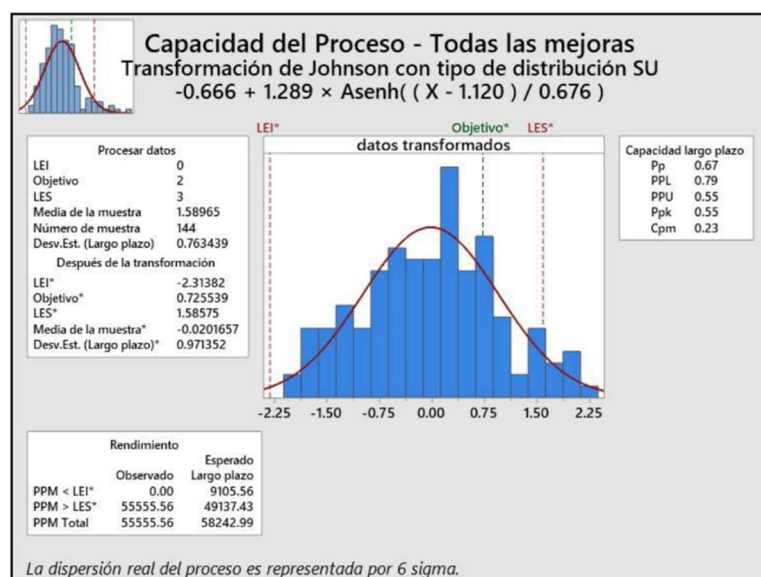
Nivel sigma después de las tres mejoras



Nota. Elaboración propia

Figura 39.

Capacidad de proceso después de las tres mejoras



Nota. Elaboración propia

Tabla 22.*Resumen del nivel sigma y capacidad del proceso*

Indicadores	Caso Base	Mejora Cambio de Turno	Mejora Falta de Operador	Mejora Cambio de Guardia	Tres Mejoras
Nivel Sigma	0.12	0.95	0.58	0.27	1.57
Ppk	0.04	0.33	0.20	0.09	0.55

Nota. Elaboración propia**Tabla 23.***Data para el cálculo de nivel sigma después de las mejoras*

Fecha	DN OP	DNOP (falta op)	DNOP (cambio turno)	DNOP (cambio de guardia)	DNOP	DNOP (total mejora)
1/01/2025	2.89	2.38	1.89	2.89	2.40	1.90
2/01/2025	5.36	4.74	4.36	4.58	4.39	2.98
3/01/2025	3.61	2.94	2.61	3.61	2.61	1.94
4/01/2025	3.43	2.76	2.43	3.43	2.43	1.76
5/01/2025	3.43	2.76	2.43	3.43	2.57	1.90
6/01/2025	3.38	2.71	2.38	3.38	2.66	2.00
7/01/2025	3.27	2.60	2.27	3.27	2.27	1.60
8/01/2025	3.84	3.17	2.84	3.84	2.84	2.17
9/01/2025	5.84	5.49	4.84	1.78	5.06	0.65
10/01/2025	2.97	2.30	1.97	2.97	2.02	1.35
11/01/2025	2.88	2.21	1.88	2.88	1.88	1.21
12/01/2025	2.87	2.20	1.87	2.87	1.92	1.25
13/01/2025	3.32	2.75	2.32	3.32	2.75	2.18
14/01/2025	3.11	2.79	2.11	3.11	2.18	1.86
15/01/2025	3.78	3.23	2.78	3.78	2.78	2.23
16/01/2025	5.72	5.29	4.72	5.25	4.83	3.94
17/01/2025	2.92	2.28	1.92	2.92	1.92	1.28
18/01/2025	3.16	2.70	2.16	3.16	2.18	1.72
19/01/2025	2.79	2.32	1.79	2.79	1.79	1.32
20/01/2025	2.63	1.96	1.63	2.63	1.63	0.96
21/01/2025	2.79	2.45	1.79	2.79	1.79	1.45
22/01/2025	3.14	2.54	2.14	3.14	2.14	1.54
23/01/2025	5.35	4.68	4.35	4.54	4.35	2.87
24/01/2025	3.10	2.46	2.10	3.10	2.10	1.46
25/01/2025	3.97	3.31	2.97	3.97	2.97	2.31
26/01/2025	2.83	2.73	1.83	2.83	1.83	1.73
27/01/2025	2.55	2.50	1.55	2.55	1.55	1.50
28/01/2025	2.74	2.70	1.74	2.74	1.74	1.70
29/01/2025	3.81	3.81	2.81	3.81	2.81	2.81

Fecha	DN OP	DNOP (falta op)	DNOP (cambio turno)	DNOP (cambio de guardia	DNOP	DNOP (total mejora)
30/01/2025	4.58	4.24	3.58	2.07	3.58	0.73
31/01/2025	1.86	1.86	0.86	1.86	0.86	0.86
1/02/2025	2.03	2.02	1.03	2.03	1.03	1.02
2/02/2025	2.08	2.08	1.08	2.08	1.08	1.08
3/02/2025	2.46	2.43	1.46	2.46	1.46	1.43
4/02/2025	2.03	1.97	1.03	2.03	1.25	1.19
5/02/2025	2.79	2.49	1.79	2.79	1.79	1.49
6/02/2025	3.64	3.55	2.64	1.58	2.64	0.49
7/02/2025	2.41	2.06	1.41	2.41	1.41	1.06
8/02/2025	3.01	2.63	2.01	3.01	2.01	1.63
9/02/2025	2.72	2.34	1.72	2.72	1.72	1.34
10/02/2025	2.92	2.59	1.92	2.92	1.92	1.59
11/02/2025	2.05	1.74	1.05	2.05	1.05	0.74
12/02/2025	2.50	2.16	1.50	2.50	1.50	1.16
13/02/2025	4.97	4.63	3.97	4.52	3.97	3.19
14/02/2025	3.11	2.98	2.11	3.11	2.11	1.98
15/02/2025	2.85	2.63	1.85	2.85	1.85	1.63
16/02/2025	2.72	2.37	1.72	2.72	1.72	1.37
17/02/2025	2.85	2.70	1.85	2.85	1.85	1.70
18/02/2025	2.50	2.45	1.50	2.50	1.50	1.45
19/02/2025	2.85	2.62	1.85	2.85	1.85	1.62
20/02/2025	5.07	4.90	4.07	1.25	4.21	0.22
21/02/2025	2.46	2.02	1.46	2.46	1.46	1.02
22/02/2025	2.59	2.22	1.59	2.59	1.59	1.22
23/02/2025	2.29	1.98	1.29	2.29	1.29	0.98
24/02/2025	2.52	1.85	1.52	2.52	1.52	0.85
25/02/2025	2.65	1.98	1.65	2.65	1.65	0.98
26/02/2025	2.78	2.11	1.78	2.78	1.78	1.11
27/02/2025	5.45	4.79	4.45	3.74	4.45	2.08
28/02/2025	4.00	3.66	3.00	4.00	3.00	2.66
1/03/2025	4.59	3.92	3.59	4.59	3.62	2.96
2/03/2025	4.94	4.50	3.94	4.94	4.24	3.80
3/03/2025	3.56	3.04	2.56	3.56	2.74	2.22
4/03/2025	2.89	2.40	1.89	2.89	1.89	1.40
5/03/2025	3.37	3.04	2.37	3.37	2.64	2.31
6/03/2025	5.70	5.16	4.70	3.47	4.70	1.93
7/03/2025	2.88	2.59	1.88	2.88	1.88	1.59
8/03/2025	3.51	2.88	2.51	3.51	2.51	1.88
9/03/2025	2.72	2.54	1.72	2.72	1.72	1.54
10/03/2025	3.23	3.07	2.23	3.23	2.23	2.07
11/03/2025	2.51	2.25	1.51	2.51	1.51	1.25
12/03/2025	3.37	3.03	2.37	3.37	2.37	2.03
13/03/2025	4.14	3.83	3.14	1.04	3.64	0.22
14/03/2025	1.34	1.32	0.34	1.34	0.46	0.44
15/03/2025	1.72	1.71	0.72	1.72	0.72	0.71
16/03/2025	1.68	1.68	0.68	1.68	0.68	0.68
17/03/2025	1.79	1.68	0.79	1.79	0.98	0.87

Fecha	DN OP	DNOP (falta op)	DNOP (cambio turno)	DNOP (cambio de guardia	DNOP	DNOP (total mejora)
18/03/2025	1.83	1.78	0.83	1.83	0.99	0.94
19/03/2025	2.14	2.09	1.14	2.14	1.14	1.09
20/03/2025	3.17	3.17	2.17	1.21	2.63	0.68
21/03/2025	2.29	2.29	1.29	2.29	1.29	1.29
22/03/2025	2.51	2.51	1.51	2.51	1.55	1.55
23/03/2025	2.60	2.27	1.60	2.60	1.60	1.27
24/03/2025	2.42	2.08	1.42	2.42	1.42	1.08
25/03/2025	3.18	2.78	2.18	3.18	2.18	1.78
26/03/2025	3.26	2.63	2.26	3.26	2.54	1.92
27/03/2025	5.13	4.78	4.13	4.65	4.13	3.30
28/03/2025	2.68	2.65	1.68	2.68	1.68	1.65
29/03/2025	2.73	2.57	1.73	2.73	1.73	1.57
30/03/2025	2.32	2.32	1.32	2.32	1.32	1.32
31/03/2025	2.37	2.26	1.37	2.37	1.37	1.26
1/04/2025	2.23	2.18	1.23	2.23	1.23	1.18
2/04/2025	2.52	2.24	1.52	2.52	1.52	1.24
3/04/2025	4.32	3.99	3.32	4.32	3.32	2.99
4/04/2025	2.38	1.95	1.38	2.38	1.46	1.03
5/04/2025	1.70	1.52	0.70	1.70	0.70	0.52
6/04/2025	3.87	3.83	2.87	3.87	2.87	2.83
7/04/2025	1.26	1.25	0.26	1.26	0.43	0.42
8/04/2025	1.31	1.31	0.31	1.31	0.47	0.47
9/04/2025	1.42	1.35	0.41	1.42	0.44	0.41
10/04/2025	1.46	1.45	0.46	1.46	0.46	0.45
11/04/2025	3.04	3.04	2.04	1.80	2.40	1.16
12/04/2025	1.79	1.79	0.79	1.79	1.33	1.33
13/04/2025	1.63	1.60	0.63	1.63	0.63	0.60
14/04/2025	3.06	2.66	2.06	3.06	2.41	2.00
15/04/2025	2.88	2.51	1.88	2.88	1.94	1.57
16/04/2025	2.38	2.06	1.38	2.38	1.38	1.06
17/04/2025	3.25	2.92	2.25	3.25	2.25	1.92
18/04/2025	5.46	5.13	4.46	5.10	4.46	3.77
19/04/2025	3.18	2.85	2.18	3.18	2.18	1.85
20/04/2025	4.85	4.52	3.85	4.85	3.85	3.52
21/04/2025	2.96	2.84	1.96	2.96	1.96	1.84
22/04/2025	3.50	3.47	2.50	3.50	2.50	2.47
23/04/2025	3.01	2.93	2.01	3.01	2.01	1.93
24/04/2025	3.18	2.99	2.18	3.18	2.24	2.05
25/04/2025	5.73	5.38	4.73	2.37	4.73	1.01
26/04/2025	2.76	2.41	1.76	2.76	1.76	1.41
27/04/2025	2.56	2.27	1.56	2.56	1.56	1.27
28/04/2025	2.93	2.60	1.93	2.93	1.93	1.60
29/04/2025	2.79	2.37	1.79	2.79	1.79	1.37
30/04/2025	5.88	5.43	4.88	5.88	4.90	4.44
1/05/2025	3.29	2.70	2.29	3.29	2.29	1.70
2/05/2025	4.98	4.38	3.98	3.40	4.10	1.92
3/05/2025	3.62	2.95	2.62	3.62	2.62	1.95

Fecha	DN OP	DNOP (falta op)	DNOP (cambio turno)	DNOP (cambio de guardia)	DNOP	DNOP (total mejora)
4/05/2025	3.30	2.64	2.30	3.30	2.30	1.64
5/05/2025	3.63	2.97	2.63	3.63	2.63	1.97
6/05/2025	3.29	2.62	2.29	3.29	2.30	1.63
7/05/2025	2.79	2.12	1.79	2.79	1.79	1.12
8/05/2025	3.09	2.44	2.09	3.09	2.31	1.66
9/05/2025	4.28	3.94	3.28	3.08	3.28	1.75
10/05/2025	3.00	2.64	2.00	3.00	2.00	1.64
11/05/2025	2.77	2.44	1.77	2.77	1.77	1.44
12/05/2025	2.80	2.46	1.80	2.80	1.80	1.46
13/05/2025	2.93	2.59	1.93	2.93	1.93	1.59
14/05/2025	2.32	2.00	1.32	2.32	1.32	1.00
15/05/2025	4.64	4.31	3.64	4.64	3.64	3.31
16/05/2025	6.43	6.41	5.43	3.22	5.43	2.20
17/05/2025	1.94	1.75	0.94	1.94	0.94	0.75
18/05/2025	2.46	1.89	1.46	2.46	1.46	0.89
19/05/2025	1.96	1.69	0.96	1.96	0.96	0.69
20/05/2025	2.21	1.76	1.21	2.21	1.21	0.76
21/05/2025	3.08	2.64	2.08	3.08	2.08	1.64
22/05/2025	2.80	2.46	1.80	2.80	1.80	1.46
23/05/2025	4.72	4.10	3.72	1.98	4.13	0.78
24/05/2025	2.54	2.18	1.54	2.54	1.63	1.26
25/05/2025	2.86	2.33	1.86	2.86	1.86	1.33

Nota. Elaboración propia

Análisis

De la tabla anterior se puede observar que tanto el nivel sigma como la capacidad del proceso muestran un incremento con respecto a las mejoras por cambio de turno y falta de operador, teniendo un nivel sigma de 1.57 y un Ppk de 0,55; lo cual también nos indica que el proceso es mejorable debido a que aún se tienen demoras no operativas por abordar, habiéndose analizado parte de estas demoras, las cuales tendrán un impacto positivo en la calidad del proceso.

4.4.4.11 Planificación de escenarios

Se considera el Budget 2023 para mostrar el impacto que se tendría considerando la disminución de las demoras no operativas con un incremento en la producción de 4% con respecto al tonelaje minado, teniendo como escenario base lo siguiente.

Figura 40.

Budget 2025 – Caso Base

Descripción	Unidad	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Costo mensual	\$	3,816,041	3,602,420	3,909,521	4,603,797	4,790,004	4,704,043	5,157,653	5,172,449	5,150,869	4,526,501	4,304,014	4,183,158
Toneladas húmedas	t	2,243,254	2,187,603	2,598,744	2,619,744	2,945,038	2,881,153	3,337,003	3,368,244	3,242,044	3,147,595	2,981,703	2,880,294
Mineral ROM	t	939,911	912,957	972,710	1,026,610	1,371,629	1,365,132	1,401,483	1,355,033	1,335,079	1,355,651	1,302,749	1,294,226
Mineral a Stock	t	-	21,782	38,721	22,152	21,883	21,079	82,945	64,823	58,476	59,760	49,265	30,638
Desmonte	t	1,303,343	1,252,863	1,587,313	1,570,981	1,551,525	1,494,941	1,852,574	1,948,388	1,848,489	1,732,184	1,629,688	1,555,430
Costo de minado	\$/t	1.70	1.65	1.50	1.76	1.63	1.63	1.55	1.54	1.59	1.44	1.44	1.45
Mineral de Stock	t	216,668	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Porcentaje humedad	%	8.61%	8.45%	8.59%	8.11%	7.64%	7.61%	7.87%	8.88%	8.29%	8.24%	8.64%	8.96%
ROM													
Au grade	g/t	0.62	0.55	0.42	0.39	0.36	0.39	0.39	0.38	0.45	0.43	0.50	0.52
Onzas de Au	oz	17,335	14,994	12,067	11,815	14,831	15,989	16,249	15,365	17,757	17,114	19,083	19,705
REMANEJO													
Au grade	g/t	0.27											
Onzas de Au	oz	1,716	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MINERAL A STOCK													
Au grade	g/t	-	0.23	0.26	0.26	0.24	0.26	0.25	0.24	0.26	0.26	0.25	0.24
Onzas de Au	oz	-	150	299	170	157	162	623	450	443	456	367	217
ONZAS TOTALES	oz	19,051	14,994	12,067	11,815	14,831	15,989	16,249	15,365	17,757	17,114	19,083	19,705

Nota. Elaboración propia

Análisis

La imagen anterior muestra indicadores clave como el costo de minado, la producción (t/mes) y las onzas puestas en Pad (oz/mes).

Figura 41.

Budget 2025 con las mejoras e incremento de 4% en las tmh

Descripción	Unidad	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Inversión	\$	22.014	22.014	22.014	22.014	22.014	22.014	22.014	22.014	22.014	22.014	22.014	22.014
Costo mensual	\$	3.963.653	3.703.307	4.084.923	4.665.281	4.883.380	4.716.789	5.205.154	5.237.050	5.006.318	4.488.294	4.234.427	2.350.185
Costo Fijo	\$	572.406	540.363	586.428	690.570	718.501	705.607	773.648	775.867	772.630	678.975	645.602	627.474
Costo Fijo	\$/t	0.26	0.25	0.23	0.26	0.24	0.24	0.23	0.23	0.24	0.22	0.22	0.22
Costo Variable	\$	3.243.635	3.062.057	3.323.093	3.913.228	4.071.504	3.998.437	4.384.005	4.396.581	4.378.238	3.847.526	3.658.412	3.555.684
Costo Variable	\$/t	1.45	1.40	1.28	1.49	1.38	1.39	1.31	1.31	1.35	1.22	1.23	1.23
Toneladas limedadas	t	2.332.984	2.275.107	2.702.694	2.724.533	3.062.840	2.996.399	3.470.483	3.502.974	3.371.726	3.273.498	3.100.971	1.618.209
Mineral ROM	t	939.911	875.361	898.595	913.587	1.217.542	1.156.180	1.137.925	1.035.415	961.260	928.429	821.302	760.668
Mineral ROM febrero	t	37.596											
Mineral ROM marzo	t		74.115										
Mineral ROM abril	t			113.023									
Mineral ROM mayo	t				154.088								
Mineral ROM junio	t					208.953							
Mineral ROM julio	t						263.558						
Mineral ROM agosto	t							319.617					
Mineral ROM setiembre	t								373.819				
Mineral ROM octubre	t									427.222			
Mineral ROM noviembre	t										481.448		
Mineral ROM diciembre	t											533.558	
Mineral a Stock	t	-	21.782	37.850	19.732	18.577	16.897	77.920	56.481	47.540	46.485	33.601	13.003
Mineral a Stock febrero	t												
Mineral a Stock marzo	t		871										
Mineral a Stock abril	t			2.420									
Mineral a Stock mayo	t				3.306								
Mineral a Stock junio	t					4.182							
Mineral a Stock julio	t						5.025						
Mineral a Stock agosto	t							8.343					
Mineral a Stock setiembre	t								10.935				
Mineral a Stock octubre	t									13.274			
Mineral a Stock noviembre	t										15.665		
Mineral a Stock diciembre	t											17.635	
Desmonte	t	1.303.343	1.200.730	1.485.065	1.405.240	1.322.945	1.204.300	1.502.135	1.523.846	1.346.012	1.155.767	983.984	844.538
Desmonte febrero	t	52.134											
Desmonte marzo	t		102.248										
Desmonte abril	t			165.741									
Desmonte mayo	t				228.580								
Desmonte junio	t					290.641							
Desmonte julio	t						350.439						
Desmonte agosto	t							424.542					
Desmonte setiembre	t								502.477				
Desmonte octubre	t									576.417			
Desmonte noviembre	t										645.704		
Desmonte diciembre	t											710.892	
Costo de minado	\$/t	1.70	1.63	1.51	1.71	1.59	1.57	1.50	1.50	1.48	1.37	1.37	1.45
Mineral de Stock	t	216.668	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Porcentaje limedad	%	8.61%	8.45%	8.59%	8.11%	7.64%	7.61%	7.87%	8.88%	8.29%	8.24%	8.64%	8.96%
ROM													
Au grade	g/t	0.62	0.55	0.42	0.39	0.36	0.39	0.39	0.38	0.45	0.43	0.50	0.52
Ozozas de Au	oz	17.952	15.296	12.448	12.180	15.612	16.597	16.818	16.713	18.178	18.773	20.155	11.582
REMANEJO													
Au grade	g/t	0.27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ozozas de Au	oz	1.716	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MINERAL A STOCK													
Au grade	g/t	-	0.23	0.26	0.26	0.24	0.26	0.25	0.24	0.26	0.26	0.25	0.24
Ozozas de Au	oz	-	157	311	175	165	167	643	475	461	472	375	92
ONZAS TOTALES	oz	19.668	15.296	12.448	12.180	15.612	16.597	16.818	16.713	18.178	18.773	20.155	11.582

Nota. Elaboración propia

Análisis

La inversión mencionada en la tabla anterior considero la contratación de 3 operadores a retén por guardia, el pago de 1 hora extra a 90 operadores por guardia con costos de 1750 \$/mes por operador y 11.6 \$/h por trabajador; esto fue llevado a un equivalente por mes y se realizó el plan de minado que se tendría con un incremento de 4% en el tonelaje minado, segregando de acuerdo a los destinos respetando los ratios, sabiendo que el aumento de la utilización se ve reflejado en que el tiempo de minado se reduce, teniendo un impacto económico positivo por el costo fijo que no se pagaría por el ahorro del tiempo, a continuación se muestran los resultados de comparar ambos escenarios.

Figura 42.*Resumen de variaciones del escenario propuesto vs el caso base*

Planificado													
Onzas	oz	19,051	14,994	12,067	11,815	14,831	15,989	16,249	15,365	17,757	17,114	19,083	19,705
Costo de minado	\$/t	1.70	1.65	1.50	1.76	1.63	1.63	1.55	1.54	1.59	1.44	1.44	1.45
Tonelaje minado	t	2,243,254	2,187,603	2,598,744	2,619,744	2,945,038	2,881,153	3,337,003	3,368,244	3,242,044	3,147,595	2,981,703	2,880,294
Ingreso	\$	10,211,110	8,036,679	6,467,682	6,332,834	7,949,528	8,570,045	8,709,521	8,235,514	9,517,851	9,172,866	10,228,709	10,562,018
Costo	\$	3,816,041	3,602,420	3,909,521	4,603,797	4,790,004	4,704,043	5,157,653	5,172,449	5,150,869	4,526,501	4,304,014	4,183,158
Beneficio	\$	6,395,069	4,434,259	2,558,161	1,729,036	3,159,524	3,866,002	3,551,868	3,063,066	4,366,983	4,646,365	5,924,695	6,378,859
Tasa mensual	%	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
VAN	\$	47,389,271											

Planificado con mejoras													
Onzas	oz	19,668	15,296	12,448	12,180	15,612	16,597	16,818	16,713	18,178	18,773	20,155	11,582
Costo de minado	\$/t	1.70	1.63	1.51	1.71	1.59	1.57	1.50	1.50	1.48	1.37	1.37	1.45
Tonelaje minado	t	2,332,984	2,275,107	2,702,694	2,724,533	3,062,840	2,996,399	3,470,483	3,502,974	3,371,726	3,273,498	3,100,971	1,618,209
Ingreso	\$	10,542,068	8,198,520	6,672,086	6,528,673	8,368,252	8,896,161	9,014,185	8,957,942	9,743,627	10,062,268	10,802,858	6,207,717
Costo	\$	3,963,653	3,703,307	4,084,923	4,665,281	4,883,380	4,716,789	5,205,154	5,237,050	5,006,318	4,488,294	4,234,427	2,350,185
Beneficio	\$	6,578,415	4,495,214	2,587,164	1,863,392	3,484,872	4,179,373	3,809,031	3,720,893	4,737,309	5,573,974	6,568,431	3,857,532
Tasa mensual	%	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
VAN	\$	48,771,585											

Resultados comparativos													
Variación de costo de minado	\$/t	0.00	0.02	(0.01)	0.05	0.03	0.06	0.05	0.04	0.10	0.07	0.08	-
Variación de tonelaje	t	89,730	87,504	103,950	104,790	117,802	115,246	133,480	134,730	129,682	125,904	119,268	(1,262,085)
Variación de beneficio	\$	183,346	60,955	29,003	134,355	325,348	313,371	257,163	657,827	370,326	927,609	643,735	(2,521,327)
Variación de VAN	\$	1,382,314											

Nota. Elaboración propia

Análisis

La imagen anterior muestra un incremento del VAN de 1,382,314 \$ durante el 2025 (se consideró una de descuento mensual) con la implementación de las propuestas de mejora.

4.4.4.12 Medición de la Mejora

La medición de la mejora se realizará considerando el Budget, ya que para este plan se involucra la utilización, la cual impacta en la productividad; por lo cual al plantearse un escenario en el que la producción se incrementa en un 4% será a causa de la disminución de las Demoras No Operativas de los volquetes, siendo esta variable (Demoras No Operativas) la que se utilizará para la medición del nivel sigma y su comparación con la condición mostrada en la fase medir.

Los datos de demoras no operativas se registran en el Excel de Central Mina, donde se tiene la siguiente tabla de referencia.

Tabla 24.*Resumen de demoras para volquetes*

	D. Programada	D. No Operativa	D. Operativa	D. Programada por CV	D. No Operativa por CV.
1 – Feb	101.37	315.83	3.50	0.94	2.92
2 – Feb	56.55	419.83	3.67	0.52	3.89
3 – Feb	67.80	520.42	2.15	0.63	4.82
4 – Feb	70.12	277.40	2.28	0.65	4.82
5 – Feb	126.85	208.17	2.25	0.65	2.57
6 – Feb	90.10	249.00	1.85	0.83	2.31
7 – Feb	92.55	238.08	2.20	0.86	2.20
8 – Feb	103.00	240.28	1.60	0.95	2.22
9 – Feb	69.95	373.18	2.45	0.65	3.46
10 – Feb	111.55	580.18	3.27	1.03	5.37
11 – Feb	127.67	312.78	3.95	1.18	2.98
12 – Feb	130.08	303.72	5.43	1.20	2.81
13 – Feb	91.05	369.52	12.50	0.84	3.42
14 – Feb	126.42	397.55	2.93	1.17	3.68
15 – Feb	133.03	370.72	8.53	1.23	3.43
16 – Feb	83.17	412.03	7.62	0.77	3.82
17 – Feb	88.35	617.18	3.33	0.82	5.71
18 – Feb	73.33	353.47	1.95	0.68	3.27
19 – Feb	73.03	377.35	2.05	0.68	3.49
20 – Feb	81.23	524.22	4.20	0.75	4.85
21 – Feb	80.62	353.47	1.95	0.68	3.27
22 – Feb	88.35	617.18	3.33	0.82	5.71
23 – Feb	77.55	413.63	15.90	0.72	3.83
25 – Feb	103.67	258.70	2.20	0.96	2.40
26 – Feb	188.72	214.67	2.00	1.75	1.99
27 – Feb	137.18	221.07	2.10	1.27	2.05
28 – Feb	190.15	181.28	2.20	1.76	1.68

Nota. Elaboración propia**Análisis**

Los datos de demoras no operativas mostrados en la tabla anterior son acumulados por día para los 54 volquetes de ambos turnos, este valor se llevaría a un equivalente por cada volquete y con ello se procedería a calcular el nivel sigma y la capacidad del proceso.

Otro indicador clave y de mucho interés es la utilización y productividad de equipos, lo cual impacta directamente en la producción mensual, estos indicadores se comparan con lo planificado en el Budget, este reporte de cumplimiento del Budget lo realiza planeamiento mina.

4.4.5 Controlar

4.4.5.1 Plan de Control

A continuación, se detalla el plan de control a seguir considerando los puntos por mejorar que tienen un gran impacto en la variable estudiada

Figura 43.

Plan de Control

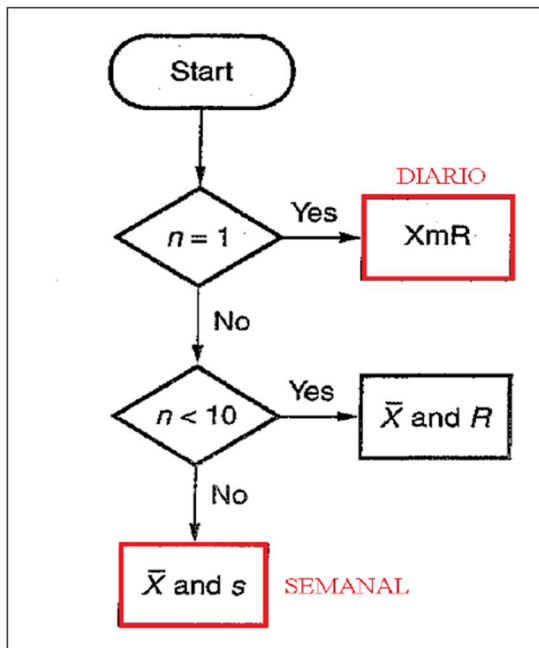
 PAN AMERICAN SILVER PERU		PLAN DE CONTROL PARA DEMORAS NO OPERATIVAS EN VOLQUETES										
ETAPA	PCC	PELIGRO	MEDIDA PREVENTIVA	LIMITE CRITICO	CRITERIOS DE VIGILANCIA				ACCION CORRECTIVA		REGISTRO	VERIFICACION
					Qué	Quién	Cómo	Cuándo	Acción (para proceso)	Destino (para producto)		
Acarreo de material	1	Demoras por Cambio de Turno	El cambio de turno debe completarse sin afectar la hora inicial y final de la operación, un cambio en caliente	La hora de inicio y fin de cada turno	Inicio y fin de turno por cada equipo	Central Mina	Registros de demoras por cambio de turno	Al inicio y fin de cada turno	Capacitación para Operadores sobre importancia de cambio en caliente	Negociar una hora extra con los operadores	Reporte de Central Mina (Excel) y Dashboard	Comparar registros de demoras no operativas por cambio de turno con plan de control, diario y semanalmente por turno (V°B° del Superintendente de Operaciones y/o Jefe de Mina).
	2	Demoras por Falta de Operador	Las guardias deben contar una cantidad de operadores que suplan la flota de acarreo	Cantidad de operadores para equipos de acarreo	Equipos en stand by por falta de operador e identificación de operador	Central Mina	Registros de demoras por falta de operador	Durante el turno de operación	Capacitación para Operadores sobre importancia en el impacto de la producción	Contratación de operadores a retén a corde a la situación operativa	Reporte de Central Mina (Excel) y Dashboard	Comparar registros de demoras no operativas por falta de operador con plan de control, diario y semanalmente por guardia (V°B° del Superintendente de Operaciones y/o Jefe de Mina).
	3	Demoras por Cambio de Guardia	El cambio de guardia debe realizarse sin afectar el inicio de la operación, se debe subir a unidad un día antes del inicio de guardia	El inicio de la operación	Inicio de operación por cada equipo e identificación de operadores	Central Mina	Registro de demoras por cambio de guardia	Durante el inicio de turno en cambio de guardia	Capacitación para Central Mina y Operadores sobre impacto en la producción	Retorno a condiciones pre-pandemia sobre el cambio de guardia	Reporte de Central Mina (Excel) y Dashboard	Comparar registros de demoras no operativas por cambio de guardia con plan de control, en cada cambio de guardia (V°B° del Superintendente de Operaciones y/o Jefe de Mina).
	4	Demoras por Condiciones Climáticas	Las vías deben contar con un mantenimiento tal que en condiciones de lluvia permita el tránsito seguro de los equipos	Condiciones adecuadas de vías	Maniobrabilidad de equipos	Jefe de Guardia / Supervisor de operaciones	Registro de verificación en campo de condiciones de vías	En presencia de lluvias	Prueba en campo de maniobrabilidad de vías en condiciones de lluvias	Asegurar las condiciones de vías para el tránsito de equipos	Reporte de Central Mina (Excel) y Dashboard	Comparar registros de demoras no operativas por condiciones climáticas bajo condiciones de lluvia con plan de control, diario y semanalmente por turno (V°B° del Superintendente de Operaciones y/o Jefe de Mina).
	5	Demoras por Equipo no programado	Se debe cumplir dentro de las fechas los mantenimientos programados a excavadoras tal que estas no fallen por tiempos prolongados	Volquete sin actividad asignada	Volquetes en stand by por falta de excavadoras	Central Mina	Registro de demoras por equipo no programado	Durante el turno de operación	Seguimiento al cumplimiento de los mantenimientos programados a las excavadoras	Flota nueva de excavadoras	Reporte de Central Mina (Excel) y Dashboard	Comparar registros de demoras no operativas por equipo no programado con plan de control, diario y semanalmente por turno (V°B° del Superintendente de Operaciones y/o Jefe de Mina).
	6	Demoras por otras causas	No se deben tener registros de demoras por otras causas, todas deben tener una descripción	Presencia de demoras sin descripción o descritas como "otras demoras"	Descripción dada por los operadores al reportar la demora	Central Mina	Mediante la comunicación por radio acerca de la demora	En cada registro de demora	Capacitación para Central Mina y Operadores sobre el reporte de demoras	Revisión de Matriz de clasificación de demoras, debe incluir todos los casos	Reporte de Central Mina (Excel) y Dashboard	Comparar registros de demoras no operativas descritas como otras demoras con plan de control, diario y semanalmente por turno (V°B° del Superintendente de Operaciones y/o Jefe de Mina).

Nota. Elaboración propia

Los gráficos de control a utilizar se decidieron en base a la siguiente figura

Figura 44.

Árbol de decisión para gráfico de control



Nota. Elaboración propia

4.4.5.2 Gráfico de Control Diario

Para el control diario se utiliza el gráfico XmR, en el cual los límites serán los siguientes:

- $LCL_X = \bar{X} - E_2 * (mR)$
- $UCL_X = \bar{X} + E_2 * (mR)$
- $LCL_{Mr} = D_3 * mR$
- $UCL_{Mr} = D_4 * mR$

Para nuestro caso E_2 tiene un valor de 2.660, D_3 un valor de 0, D_4 un valor de 3.267 y $\bar{X}$ es la media de las demoras no operativas de los 54 volquetes y mR es la media del rango móvil de la diferencia de las demoras no operativas entre volquetes; por lo cual se obtendrían los siguientes límites.

- $LCL_X = \bar{X} - 2.660 * (mR)$
- $UCL_X = \bar{X} + 2.660 * (mR)$
- $LCL_{Mr} = 0$
- $UCL_X = 3.267 * mR$

A continuación se muestra un ejemplo de cómo se llevaría el control diario para cada turno.

Tabla 25.

Tabla de demoras por tipo

Equipo	Demora Programada	Demora No Operativa	Demora Operativa
CV-051	0.00	1.67	0.00
CV-052	0.00	3.17	0.00
CV-053	0.00	1.17	0.00
CV-054	0.00	1.67	0.00
CV-055	0.00	1.17	0.00
CV-056	0.00	2.17	0.00
CV-057	0.00	1.67	0.00
CV-058	2.20	2.67	0.00
CV-059	0.00	2.67	0.00
CV-060	0.62	1.17	0.00
CV-061	3.00	1.00	0.00
CV-062	0.00	4.67	0.00
CV-063	0.00	1.17	0.00
CV-064	0.00	1.00	0.00
CV-065	0.00	4.67	0.00
CV-066	1.82	1.17	0.00
CV-067	0.00	1.67	0.00
CV-068	2.52	2.67	0.00
CV-069	0.00	2.17	0.00
CV-070	0.00	1.17	0.00
CV-071	4.33	0.67	0.00
CV-072	0.00	1.67	0.00
CV-073	2.60	1.67	0.00
CV-074	0.00	1.17	0.00
CV-075	0.00	1.67	0.00
CV-076	0.68	2.17	0.00
CV-077	0.00	0.50	0.00
CV-078	0.00	2.17	0.00

Equipo	Demora Programada	Demora No Operativa	Demora Operativa
CV-079	4.97	3.30	0.00
CV-080	5.77	3.40	0.00
CV-081	2.43	3.67	0.00
CV-082	0.00	1.17	0.00
CV-083	0.00	1.17	0.00
CV-084	0.00	1.67	0.00
CV-085	0.00	1.67	0.00
CV-086	0.00	2.17	0.00
CV-087	0.00	2.17	0.00
CV-088	0.00	1.67	0.00
CV-089	0.00	1.67	0.00
CV-090	0.00	1.17	0.00
CV-091	6.28	0.50	0.00
CV-092	0.00	1.17	0.00
CV-093	0.00	2.67	0.00
CV-094	2.70	2.17	0.00
CV-095	0.00	2.17	0.00
CV-096	0.00	1.17	0.00
CV-097	0.00	2.67	0.00
CV-098	3.12	1.17	0.00
CV-099	3.40	1.00	0.00
CV-100	0.00	1.17	0.00
CV-101	0.00	1.17	0.00
CV-102	0.00	1.67	0.00
CV-103	0.00	2.17	0.00
CV-104	0.00	1.17	0.00

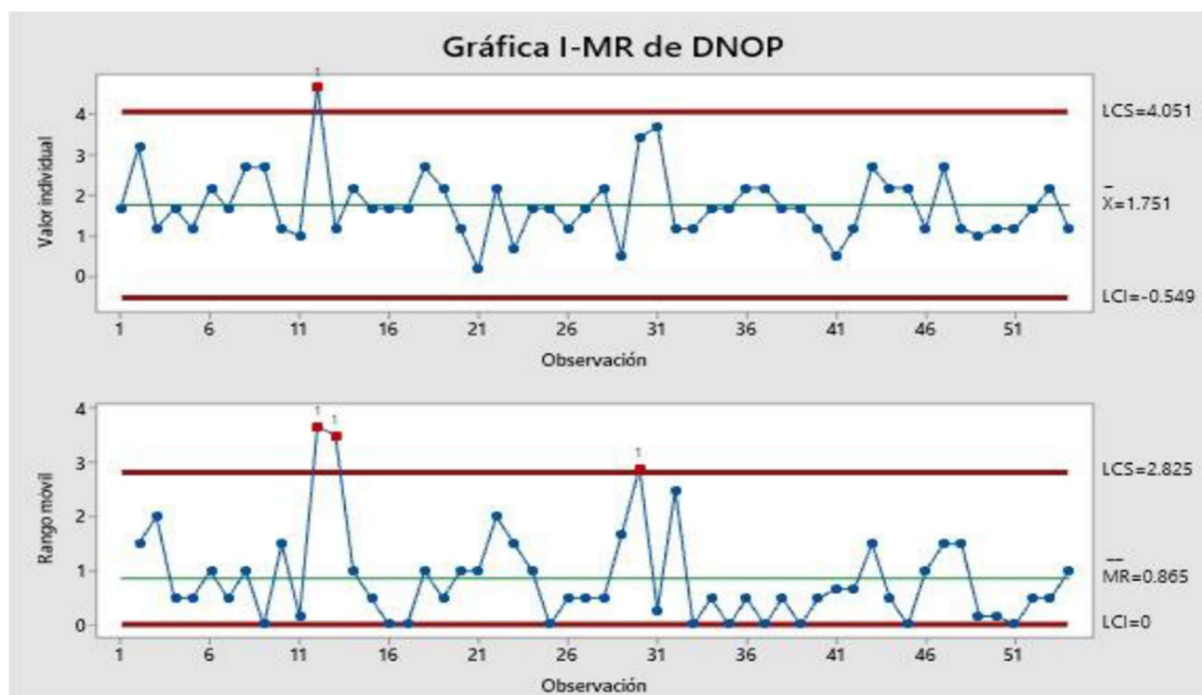
Nota. Elaboración propia

Análisis

La tabla mostrada anteriormente está disponible en los reportes diarios de Central Mina, siendo esta actualizada para cada turno; con estos datos el gráfico de control sería el siguiente.

Figura 45.

Gráfico XmR para control diario de DNOP



Nota. Elaboración propia

Análisis

El gráfico se muestra como un ejemplo de cómo se realizará y de donde se tomarán los datos, este seguimiento es de suma importancia para el control de las demoras.

En la siguiente tabla se detalla el encargado y de qué manera se llevará el control diario

Tabla 26.

Tabla de demoras por tipo

Encargado	Frecuencia	Reporte
Personal de Central Mina	Diaria, por turno	Adjuntar en el reporte diario por turno

Nota. Elaboración propia

4.4.5.3 Gráfico de Control Semanal

Para el control semanal se utiliza el gráfico $\bar{X}$ and s , en el cual los límites serán los siguientes:

- $LCL\bar{X} = \bar{\bar{x}} - A3 * s$
- $UCL\bar{X} = \bar{\bar{x}} + A3 * s$
- $LCLs = B3 * \bar{s}$
- $UCLs = B4 * s$

A continuación, se muestra un ejemplo de cómo se llevaría el control semanal por turno.

Tabla 27.

Tabla de demoras por tipo

Equipo	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7
CV-051	2.13	3.68	1.83	2.67	1.67	0.00	1.67
CV-052	3.63	2.17	2.33	4.88	2.17	0.00	3.17
CV-053	1.47	2.58	2.17	2.17	1.67	5.50	1.17
CV-054	3.93	1.92	3.08	2.17	1.20	5.00	1.67
CV-055	3.30	2.58	2.33	1.67	5.75	7.50	1.17
CV-056	2.30	2.67	1.67	1.67	2.17	6.00	1.67
CV-057	2.70	2.58	1.67	1.33	1.67	6.00	1.67
CV-058	3.30	2.17	1.00	0.17	0.00	9.00	2.67
CV-059	3.68	2.33	2.33	1.67	1.67	7.50	2.67
CV-060	12.00	12.00	12.00	12.00	3.08	0.00	1.17
CV-061	11.17	6.83	1.67	2.67	1.67	5.50	1.00
CV-062	2.30	2.58	2.33	2.05	0.00	0.00	4.67
CV-063	1.60	12.00	0.00	3.33	2.17	7.00	1.17
CV-064	2.70	2.00	1.33	1.67	2.72	4.00	2.17
CV-065	8.72	2.58	1.67	1.67	1.67	6.00	1.67
CV-066	0.00	2.17	2.33	7.78	2.17	5.00	1.67
CV-067	3.82	2.58	2.33	1.88	1.67	4.50	1.67
CV-068	2.70	12.00	7.68	2.17	2.17	5.00	2.67
CV-069	2.30	2.17	3.42	1.00	2.17	5.50	1.17
CV-070	3.30	2.83	2.83	1.67	2.17	5.50	1.17
CV-071	2.43	0.90	2.83	1.67	1.00	5.50	0.17
CV-072	2.70	2.58	0.20	0.67	2.17	5.50	2.17
CV-073	3.10	2.30	1.67	1.67	2.78	7.00	0.67
CV-074	2.30	2.58	4.10	2.67	3.08	0.00	1.67
CV-075	3.73	2.58	1.83	1.33	3.58	5.50	1.67
CV-076	2.77	12.00	12.00	1.17	3.58	0.00	1.17
CV-077	3.30	0.67	1.33	0.17	3.35	5.00	1.67
CV-078	2.95	2.58	2.33	1.67	3.08	0.00	2.17

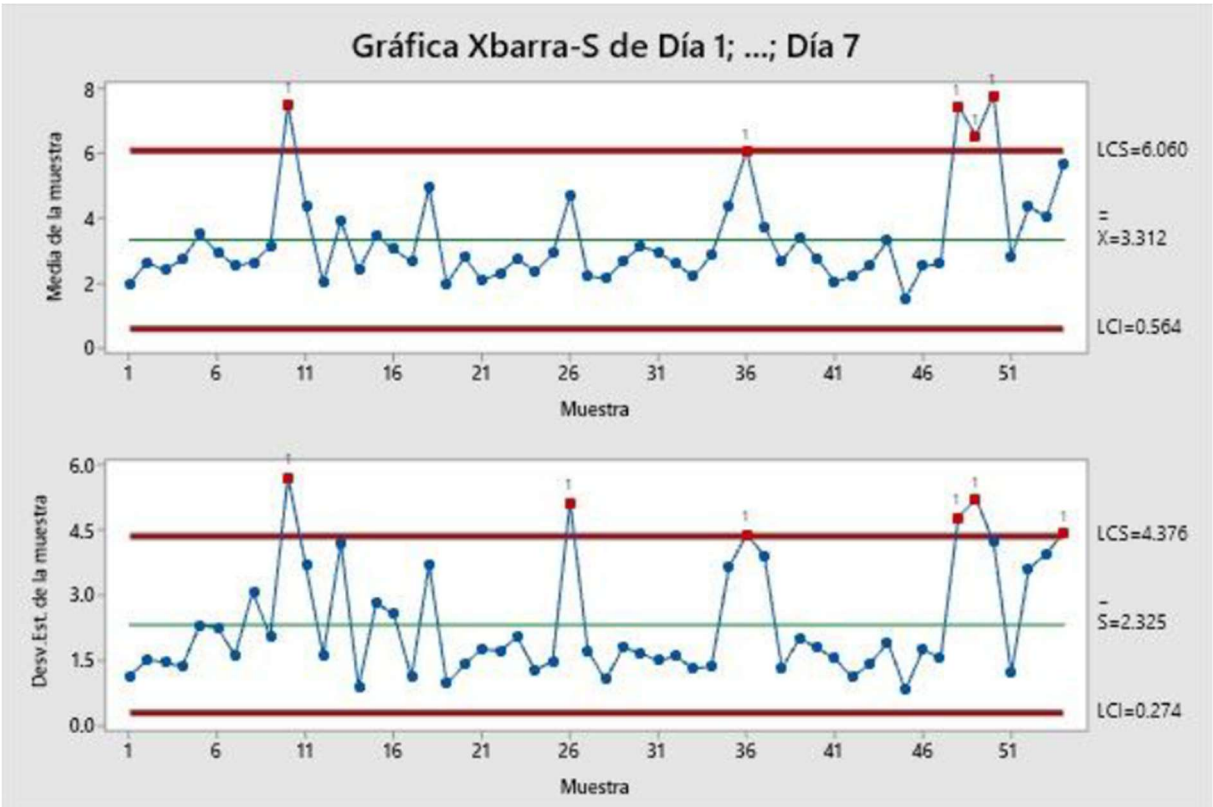
Equipo	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7
CV-079	4.12	0.75	3.33	2.17	2.17	5.50	0.50
CV-080	2.30	2.58	3.08	1.67	2.17	6.67	3.40
CV-081	2.05	2.58	2.17	1.67	2.33	6.00	3.67
CV-082	2.30	2.58	2.33	2.17	1.48	6.00	1.17
CV-083	2.13	1.17	2.00	1.67	2.17	5.00	1.17
CV-084	2.58	4.50	2.33	2.17	1.63	5.00	1.67
CV-085	5.03	2.17	2.33	2.32	12.00	5.00	1.67
CV-086	3.30	2.23	3.67	1.67	2.17	5.50	2.17
CV-087	3.13	12.00	0.67	1.67	2.17	5.00	2.17
CV-088	2.63	2.58	2.33	1.67	2.17	5.50	1.67
CV-089	3.30	2.23	3.67	1.67	3.58	7.50	1.67
CV-090	2.13	2.58	2.33	2.17	2.17	6.67	1.17
CV-091	4.53	3.17	2.17	1.67	2.17	0.00	0.50
CV-092	1.60	2.00	1.67	2.67	1.67	4.50	1.17
CV-093	2.30	2.58	1.45	2.17	1.18	5.50	2.67
CV-094	3.62	2.73	3.83	2.17	1.33	7.17	2.17
CV-095	1.17	2.58	1.67	1.33	1.67	0.00	2.17
CV-096	0.17	2.58	3.67	1.67	2.78	5.50	1.17
CV-097	2.00	2.58	2.83	0.27	2.17	5.50	1.17
CV-098	12.00	12.00	8.05	2.17	12.00	4.50	1.17
CV-099	12.00	12.00	12.00	3.33	1.67	3.50	1.00
CV-100	12.00	9.17	12.00	10.50	5.00	4.50	1.17
CV-101	3.30	2.58	2.33	3.17	2.17	5.00	1.17
CV-102	2.12	3.37	3.03	12.00	2.58	5.50	1.67
CV-103	5.57	1.78	12.00	4.58	2.08	0.00	2.17
CV-104	3.53	3.77	12.00	12.00	2.78	4.50	1.17

Nota. Elaboración propia

Análisis

La tabla mostrada anteriormente fue organizada a partir de los reportes diarios de Central Mina, siendo esta actualizada para cada turno; con estos datos el gráfico de control sería el siguiente.

Figura 46.
Gráfico $\bar{X}$ and s para control semanal de DNOP



Nota. Elaboración propia

Análisis

El gráfico mostrado se añadirá en los reportes semanales, siendo este un ejemplo de cómo se realizará, más no de cómo se encuentra en si la información, al ejecutar las mejoras se observarán los resultados que son tomados del excel de Central Mina.

Tabla 28.
Tabla de demoras por tipo

Encargado	Frecuencia	Reporte
Personal de Central Mina	Semanal, por turno	Adjuntar en el reporte diario por turno

Nota. Elaboración propia

CONCLUSIONES

1. El proyecto presenta un beneficio que se calcula mediante un análisis de sensibilidad de variables como el precio del oro, el porcentaje de incremento en la producción programada y el porcentaje del costo fijo en relación con los costos totales. Se estima que estos beneficios oscilarían entre \$6,000 y \$840,000 durante aproximadamente seis meses (de julio a diciembre de 2023). Esto significa que es probable alcanzar el objetivo esperado, que es \$120,000 al mes. Por lo tanto, la implementación de las mejores propuestas junto con el plan de control permitirá cumplir con lo prometido.
2. La supervisión y el registro de indicadores esenciales son un reflejo de una operación eficaz, por lo que el control en las operaciones es esencial para alcanzar las metas a largo plazo.
3. El uso de los equipos es uno de los indicadores más importantes a considerar cuando se realiza el seguimiento de estos. Junto con otros indicadores, como la productividad, tiene un impacto significativo en la operación. Es crucial que tanto los operadores como la línea de supervisión se comuniquen para llevar a cabo el plan de minado y también para desempeñar las actividades en un entorno seguro.
4. El plan de control de las mejoras propuestas es parte fundamental para alcanzar lo propuesto en este proyecto, poniendo el ejemplo el control de la cantidad de operadores disponibles por guardia, así como el registro de demoras durante la operación, situaciones como estas deben de darse seguimiento para así lograr lo planteado, el apoyo en herramientas y programas como Power BI agilizan este proceso y soportan la toma de decisiones en campo.

5. A través de este proyecto se evidencia la relevancia que tienen los operarios, siendo estos el combustible de las operaciones y la correcta gestión e integración de la supervisión con ellos sentará las bases para la ejecución de este tipo de proyectos de mejora, los cuales requieren el compromiso de todos los involucrados.
6. Las condiciones climáticas pueden ser sumamente desfavorables. Aunque no es posible preverlas completamente, se puede contar con las condiciones operativas más óptimas para estar listos ante cualquier eventualidad, como lluvias o polvo. Prepararse no solo se considera una necesidad para evitar la interrupción de la operación, sino sobre todo por el bienestar de los empleados y para que estos comprendan y sientan lo importante que son en el funcionamiento.

RECOMENDACIONES

1. Capacitar a los operadores, Central Mina en el reporte de demoras, será un punto clave para un mayor control de la operación, siendo vital el manejo de indicadores claves en tiempo real para la toma de decisiones.
2. Crear un grupo de operadores disponibles para reemplazar a otros que no puedan asistir a la unidad, será una ventaja adicional para contar con soluciones frente a las condiciones cambiantes que puedan surgir en la operación.
3. Mejorar la coordinación sobre el traslado de personal en cada fin e inicio de turno ayudará al incremento de indicadores de rendimiento, esperándose alcanzar un nivel six sigma mediante la mejora continua.
4. Reanudar el diálogo con el personal sobre el cambio de guardia, tendrá un impacto positivo en la reducción de las horas inoperativas, disminuyendo la variabilidad de las demoras no operativas con un impacto positivo en la guardia.

REFERENCIAS

- Burt, C. N., & Caccetta, L. (2014). Equipment selection for surface mining: A review. *Interfaces*, 44(2), 143–162.
- Darling, P. (Ed.). (2011). *SME mining engineering handbook* (3rd ed.). Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.
- Erçelebi, S. G., & Başçetin, A. (2009). Optimization of shovel–truck systems for surface mining. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 109(7), 433–439.
- Hustrulid, W., Kuchta, M., & Martin, R. K. (2013). *Open Pit Mine Planning and Design o Blasting Principles for Open Pit Mining* (3rd ed.). CRC Press.
- Pyzdek, T., & Keller, P. A. (2014). *The Six Sigma handbook: A complete guide for green belts, black belts, and managers at all levels* (4th ed.). McGraw-Hill Education.
- Dindarloo, S. R., Osanloo, M., Frimpong, S., & Awuah-Offei, K. (2015). Truck dispatching optimization in surface mines: A review of models and algorithms. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 29(1), 1–23. <https://doi.org/10.1080/17480930.2013.866660>.
- Cueva Terrones, A. N. (2025). *Análisis de las demoras para optimizar la utilización y disponibilidad de los equipos de carguío y acarreo en la mina El Toro de la región La Libertad 2024* [Tesis de pregrado, Universidad Privada del Norte]. Repositorio Institucional UPN.
- Tupac Yupanqui Rivera, R. (2025). *Reducción de demoras en los ciclos de carguío y acarreo y mejoras de la eficiencia operacional de los equipos en la mina Pucamarca, 2021* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. Repositorio Institucional Cybertesis UNMSM.
- Caterpillar Inc. (2021). *Performance handbook* (51st ed.). Caterpillar Inc.
- George, M. L., Rowlands, D., Price, M., & Maxey, J. (2005). *The Lean Six Sigma pocket toolbox*. McGraw-Hill.
- Ministerio de Energía y Minas. (2023). *Anuario Minero 2023*. <https://www.gob.pe/minem>

- Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía. (2022). *Reporte del sector minero peruano*.
<https://www.snmpe.org.pe>
- Lilly, P. A. (1986). *An empirical method of assessing rock mass blastability*. En *Large Open Pit Mining Conference* (pp. 89–92). Australasian Institute of Mining and Metallurgy.
- Hustrulid, W. A. (1999). *Blasting principles for open pit mining* (Vols. 1–2). A. A. Balkema.
- Mina, F. (2014). *Optimization of truck-shovel operations in open pit mining using simulation and dispatching systems*. [Tesis doctoral, University of Alberta].
- Wills, B. A., & Finch, J. (2016). *Wills' mineral processing technology: An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery* (8th ed.). Butterworth-Heinemann.
- George, M. L., Rowlands, D., Price, M., & Maxey, J. (2005). *The Lean Six Sigma pocket toolbook: A quick reference guide to nearly 100 tools for improving quality and speed*. McGraw-Hill.
- Wills, B. A., & Finch, J. (2016). *Wills' mineral processing technology: An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery* (8th ed.). Butterworth-Heinemann.
- Mina, F. (2014). *Optimization of truck-shovel operations in open pit mining using simulation and dispatching systems*. University of Alberta.
- George, M. L., Rowlands, D., Price, M., & Maxey, J. (2005). *The Lean Six Sigma pocket toolbook: A quick reference guide to nearly 100 tools for improving quality and speed*. McGraw-Hill.
- Socconini, L., & Reato, C. (2019). *Lean Six Sigma: Sistema de gestión para liderar empresas*. Marge Books.

ANEXOS

Anexo 1.

Encuesta de Kano

ENCUESTA DE SATISFACCION	
1.- ¿Estaría de acuerdo con un control de demoras mas minucioso? ☒ 1. De acuerdo. ☐ 2. Espero que sea así. ☐ 3. Soy neutral. ☐ 4. Puedo aceptar que sea de esa manera. ☐ 5. Me disgusta que sea así.	1.- ¿No Estaría de acuerdo con un control de demoras mas minucioso? ☐ 1. De acuerdo. ☐ 2. Espero que sea así. ☐ 3. Soy neutral. ☐ 4. Puedo aceptar que sea de esa manera. ☒ 5. Me disgusta que sea así.
2.- ¿Está satisfecho con el control actual de las demoras en el proceso de carguio y acarreo? ☒ 1. De acuerdo. ☐ 2. Espero que sea así. ☐ 3. Soy neutral. ☐ 4. Puedo aceptar que sea de esa manera. ☐ 5. Me disgusta que sea así.	2.- ¿No está satisfecho con el control actual de las demoras en el proceso de carguio y acarreo? ☐ 1. De acuerdo. ☐ 2. Espero que sea así. ☐ 3. Soy neutral. ☒ 4. Puedo aceptar que sea de esa manera. ☐ 5. Me disgusta que sea así.
3.- ¿Estaría de acuerdo en que una causa de demoras en carguio son los frentes duros? ☒ 1. De acuerdo. ☐ 2. Espero que sea así. ☐ 3. Soy neutral. ☐ 4. Puedo aceptar que sea de esa manera. ☐ 5. Me disgusta que sea así.	3.- ¿No estaría de acuerdo en que una causa de demoras en carguio son los frentes duros? ☐ 1. De acuerdo. ☐ 2. Espero que sea así. ☐ 3. Soy neutral. ☒ 4. Puedo aceptar que sea de esa manera. ☐ 5. Me disgusta que sea así.
4.- ¿Estaría de acuerdo en que una demora principal es la falta de operador? ☒ 1. De acuerdo. ☐ 2. Espero que sea así. ☐ 3. Soy neutral. ☐ 4. Puedo aceptar que sea de esa manera. ☐ 5. Me disgusta que sea así.	4.- ¿No estaría de acuerdo en que una demora principal es la falta de operador? ☐ 1. De acuerdo. ☐ 2. Espero que sea así. ☐ 3. Soy neutral. ☒ 4. Puedo aceptar que sea de esa manera. ☐ 5. Me disgusta que sea así.
5.- ¿Estaría de acuerdo con un control de demoras mas minucioso? ☒ 1. De acuerdo. ☐ 2. Espero que sea así. ☐ 3. Soy neutral. ☐ 4. Puedo aceptar que sea de esa manera. ☐ 5. Me disgusta que sea así.	5.- ¿Estaría de acuerdo con un control de demoras mas minucioso? ☐ 1. De acuerdo. ☐ 2. Espero que sea así. ☒ 3. Soy neutral. ☐ 4. Puedo aceptar que sea de esa manera. ☐ 5. Me disgusta que sea así.

Anexo 2.

Encuesta sobre disponibilidad de operadores en días libres

ENCUESTA SOBRE DISPONIBILIDAD EN DÍAS LIBRES

Nombres:

Apellidos:

Guardia:

Lugar de procedencia:

Equipo que opera:

La presente encuesta se realiza con la finalidad de tener una lista de operadores con la disponibilidad de suplir a algún operador que no haya podido subir en los días que le corresponde, antes de responder la pregunta tener en cuenta lo siguiente:

- ✓ El monto a pagar por día es de 60 soles.
- ✓ El día suplido no se acumula para los días libres.
- ✓ El responder con un “Sí” la presente encuesta no obliga al operador a lo mencionado en la encuesta, solo es para tener una lista de candidatos.
- ✓ De presentarse la situación de tener que suplir a un operador se le comunicará a la brevedad posible para confirmar si se podrá contar con usted durante ese día.
- ✓ El pago por el monto indicado se verá reflejado en la fecha correspondiente del pago de haberes.

Después de haber leído lo anterior proceder a marcar una opción para la siguiente pregunta.

1. ¿Tendrás disponibilidad para suplir a un operador en uno de tus días libres?

- a. Sí
- b. No