

Universidad Nacional de Ingeniería
Facultad de Ingeniería Geológica Minera y Metalúrgica



TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

**Reducción de la variabilidad en el cálculo del ratio de consumo
de combustible en camiones mineros CAT 793**

Para obtener el título profesional de Ingeniero de Minas

Elaborado por

Edson Joel Lucano Lara

 [0009-0009-1398-9827](https://orcid.org/0009-0009-1398-9827)

Asesor

MBA. Eder León Salazar Dulanto

 [0000-0002-1400-3144](https://orcid.org/0000-0002-1400-3144)

LIMA – PERÚ

2025

Citar/How to cite	Lucano Lara [1]
Referencia/Reference	[1] E. Lucano Lara, “Reducción de la variabilidad en el cálculo del ratio de consumo de combustible en camiones mineros CAT 793” [Trabajo de suficiencia profesional de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2025.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

Citar/How to cite	(Lucano, 2025)
Referencia/Reference	Lucano, E. (2025). <i>Reducción de la variabilidad en el cálculo del ratio de consumo de combustible en camiones mineros CAT 793</i> . [Trabajo de suficiencia profesional de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

A mi querida madre Gladis, a mi entrañable tía Violeta, a mi padre Germán, a mi amada esposa Elizabeth, y a mis dos tesoros más grandes, mis hijos André y Leonardo. Gracias por su amor incondicional, su apoyo incansable y por ser siempre mi mayor fuente de inspiración. Este logro no solo me pertenece a mí, sino a cada uno de ustedes.

Con todo mi cariño y gratitud eterna.

Agradecimientos

Agradezco profundamente a Dios, por bendecirme con salud y vida. A mis hermanos, tíos y a toda mi familia, por su amor incondicional, su paciencia y el aliento constante que me acompañó en cada etapa de este camino. A mis profesores, por compartir generosamente sus conocimientos, guiarme con dedicación y motivarme a seguir creciendo. Y a todas las personas que, en algún momento del recorrido, me ofrecieron su apoyo, sus consejos o una palabra de aliento.

Este logro también les pertenece. ¡Gracias, de todo corazón!

Resumen

El presente estudio aborda la problemática de la alta variabilidad en el cálculo del ratio de consumo de combustible en camiones mineros CAT 793, la cual generaba una discrepancia significativa entre los valores planificados y los valores reales de consumo, impactando negativamente en la planificación operativa y los costos mensuales. El objetivo principal fue desarrollar un modelo basado en rutas específicas de acarreo, que permita reducir dicha variabilidad y mejorar la precisión en las estimaciones de consumo de combustible.

La investigación parte de la hipótesis de que un modelo por rutas, debidamente estructurado y ajustado a las condiciones reales de operación (distancia, pendiente, tiempo de ciclo, entre otros), permitirá reducir la diferencia entre lo calculado y lo real. Para ello, se comparó el desempeño del modelo por rutas frente al modelo tradicional de regresión múltiple, utilizado anteriormente como herramienta principal de estimación.

Los resultados fueron contundentes: el modelo por rutas redujo la sobreestimación promedio del ratio de consumo de +2.2 gal/h a una subestimación controlada de -0.31 gal/h. Asimismo, el porcentaje de error en la estimación del consumo disminuyó de 2.96% a -0.76%, lo cual representa una mejora significativa en la confiabilidad del cálculo. Además, este modelo mostró una alta capacidad de adaptación ante cambios operativos como modificaciones en las distancias de acarreo o en la pendiente de las rutas, mejorando la flexibilidad y aplicabilidad del modelo a diferentes escenarios.

En conclusión, la implementación del modelo por rutas permitió optimizar la gestión del combustible, reducir los sobrecostos operativos, y alinear la planificación con la ejecución real, lo que se traduce en una toma de decisiones más precisa tanto a nivel operativo como financiero.

Palabras clave — Consumo de combustible, variabilidad, planificación, modelo.

Abstract

This study addresses the issue of high variability in the calculation of the fuel consumption ratio in CAT 793 mining trucks, which resulted in significant discrepancies between planned and actual consumption values, negatively impacting operational planning and monthly cost control. The main objective was to develop a route-based model that would reduce this variability and improve the accuracy of fuel consumption estimates.

The research is based on the hypothesis that a route-based model, properly structured and adjusted to real operating conditions (such as distance, slope, cycle time, among others), would reduce the gap between calculated and actual fuel consumption. To validate this, the performance of the route-based model was compared to the previously used multiple regression model.

The results were conclusive: the route-based model reduced the average overestimation of fuel consumption from +2.2 gal/h to a controlled underestimation of -0.31 gal/h. Additionally, the error percentage in fuel consumption estimates dropped from 2.96% to -0.76%, representing a significant improvement in calculation reliability. Furthermore, the model demonstrated high adaptability to operational changes, such as modifications in haul distances or route slopes, enhancing its flexibility and applicability in various operational contexts.

In conclusion, the implementation of the route-based model optimized fuel management, reduced operational cost overruns, and aligned planning with actual performance, leading to more accurate and informed decision-making at both the operational and financial levels.

Keywords — Fuel consumption, variability, planning, model.

Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen	v
Abstract	vi
Introducción	xiii
Capítulo I. Parte introductoria del trabajo	1
1.1 Generalidades.....	1
1.2 Descripción del problema de investigación.....	1
1.3 Objetivo.....	2
1.4 Hipótesis	2
1.5 Operacionalización de variables.....	3
1.5.1 Variable independiente (V.I).....	3
1.5.2 Variable dependiente (V.D)	3
1.6 Antecedentes referenciales	3
1.6.1 Antecedentes internacionales	3
1.6.2 Antecedentes nacionales	6
Capítulo II. Marcos teórico y conceptual	9
2.1 Marco Teórico	9
2.1.1 Consumo de combustible en minería	9
2.1.2 Factores que afectan el consumo de combustible.....	10
2.1.3 Métodos de cálculo del consumo de combustible.....	12
2.1.4 Impacto de la desviación en el consumo de combustible	15
2.1.5 Estrategias para reducir el consumo de combustible.....	16
2.2 Marco conceptual.....	18
2.2.1 Consumo.....	18
2.2.2 Combustible	18
2.2.3 Variabilidad	19
2.2.4 Rendimiento	19

2.2.5	Eficiencia.....	19
2.2.6	Planificación	19
2.2.7	Desviación	19
2.2.8	Ralentí.....	19
2.2.9	Ruta	19
Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación		20
3.1	Recolección de datos	20
3.1.1	Unidad de estudio	20
3.1.2	Operaciones mina	25
3.1.3	Diseño de mina	29
3.2	Procesamiento de la información	38
3.2.1	Modelo por regresión (inicial)	38
3.2.2	Modelo por rutas	51
Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados		61
4.1	Análisis de resultados	61
4.2	Validación de hipótesis.....	64
Conclusiones		68
Recomendaciones		69
Referencias bibliográficas.....		70
Anexos		72

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 : Matriz de consistencia.....	3
Tabla 2 : Flota de equipos mineros	26
Tabla 3 : Zonas de voladuras.....	26
Tabla 4 : Definición de zonas de voladura	27
Tabla 5 : Tonelaje de mineral y desmonte por fase.....	31
Tabla 6 : Plan anual de extracción mina	32
Tabla 7 : Plan de producción por fase.....	34
Tabla 8 : Alimentación a planta.....	35
Tabla 9 : Coeficientes para modelo por regresión	38
Tabla 10: Indicadores de productividad – 2021.....	40
Tabla 11: Parámetros para el cálculo – 2021	41
Tabla 12: Cálculo de consumo de combustible – 2021	42
Tabla 13: Indicadores de productividad – 2022.....	43
Tabla 14: Parámetros para el cálculo – 2022	44
Tabla 15: Cálculo de consumo de combustible – 2022	45
Tabla 16: Indicadores de productividad – 2023.....	46
Tabla 17: Parámetros para el cálculo – 2023	47
Tabla 18: Cálculo de consumo de combustible – 2023	48
Tabla 19: Indicadores de productividad – 2024 (junio)	49
Tabla 20: Parámetros para el cálculo – 2024 (junio)	49
Tabla 21: Cálculo de consumo de combustible – 2024 (junio)	49
Tabla 22: Tonelaje planificado por material – 2024 (desde julio).....	52
Tabla 23: Tonelaje planificado por material – 2025.....	52
Tabla 24: Distancias por material y pendiente – 2024 (desde julio).....	53
Tabla 25: Distancias por material y pendiente – 2024 (desde julio).....	54
Tabla 26: Ratios de consumo por pendiente.....	56

Tabla 27: Ratios de consumo por material – 2024 (desde julio) 56

Tabla 28: Ratios de consumo por material – 2025 56

Tabla 29: Galones planificados por modelos – 2024 (desde julio)..... 58

Tabla 30: Galones planificados por modelos – 2025..... 59

Tabla 31: Consumo de galones reales (julio 2024 – marzo 2025)..... 61

Tabla 32: Comparación de consumo real vs consumo calculado 61

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 : Mapa de ubicación de la unidad minera	20
Figura 2 : Mapa geológico regional simplificado.....	21
Figura 3 : Vista en secciones de la geología local.....	23
Figura 4 : Sección vertical de mineralización	24
Figura 5 : Modelo estructural local de la unidad minera	25
Figura 6 : Vía de acarreo en tajo principal y tajo manto magnetita	28
Figura 7 : Vía de acarreo en superficie	29
Figura 8 : Huella tajo principal por rediseño de fases.....	30
Figura 9 : Producción mina	32
Figura 10: Producción de óxidos.....	33
Figura 11: Producción de sulfuros.....	33
Figura 12: Alimentación a planta de óxidos.....	35
Figura 13: Alimentación a planta de sulfuros	36
Figura 14: Producción de cobre fino total.....	36
Figura 15: Ingreso y salida de material – Acopios de óxidos.....	37
Figura 16: Ingreso y salida de material – Acopios de sulfuros.....	38
Figura 17: Resultados del ratio de consumo – 2021	50
Figura 18: Resultados del ratio de consumo – 2022	50
Figura 19: Resultados del ratio de consumo – 2023	51
Figura 20: Resultados del ratio de consumo – 2024 (junio).....	51
Figura 21: Longitud de segmento de ruta.....	53
Figura 22: Galones planificados por modelos – 2024 (desde julio)	60
Figura 23: Galones planificados por modelos – 2025.....	60
Figura 24: Consumo real vs Consumo calculado por regresión	62
Figura 25: Consumo real vs Consumo calculado por rutas	62
Figura 26: Variación y porcentaje de error	63

Figura 27: Prueba de normalidad – variabilidad por regresión	65
Figura 28: Prueba de normalidad – variabilidad por rutas	65
Figura 29: Prueba t de una muestra para la variabilidad	66

Introducción

El contenido de este estudio se estructura en cuatro capítulos claramente definidos que permiten abordar de manera sistemática el problema de investigación y su solución propuesta.

El Capítulo I, presenta el planteamiento del problema, evidenciando la brecha existente entre el consumo planificado y el consumo real de combustible en camiones mineros CAT 793, y cómo esta diferencia ha generado sobrecostos recurrentes en la operación. Se formulan los objetivos general y específicos de la investigación, orientados al desarrollo y validación de un modelo por rutas. Asimismo, se expone la hipótesis principal y se identifican las variables involucradas en el estudio. Finalmente, se recopilan antecedentes referenciales relevantes a nivel nacional e internacional, que sustentan la pertinencia y el enfoque metodológico de la propuesta.

El Capítulo II, desarrolla el marco teórico, en el cual se revisa el concepto de consumo de combustible en minería y su importancia dentro de los costos operativos. Se analizan los principales factores que afectan dicho consumo, como las condiciones topográficas, el tipo de operación, el estado del equipo y el comportamiento del operador. También se examinan los métodos de cálculo del consumo, desde modelos empíricos hasta técnicas basadas en datos operacionales, y se describen estrategias implementadas en la industria para reducir el consumo. Este capítulo incluye además el marco conceptual, donde se definen los términos clave que permiten la correcta interpretación de la investigación.

El Capítulo III, se enfoca en la unidad de estudio, detallando las características operativas de los camiones CAT 793 y el entorno en el que operan. Se explican los dos modelos de cálculo analizados: el modelo tradicional por regresión múltiple y el modelo propuesto basado en rutas. Asimismo, se describe el procedimiento para la recolección y procesamiento de datos, y la metodología para determinar los parámetros relevantes como distancia, pendiente, velocidad, tiempo de ciclo, entre otros.

Finalmente, el Capítulo IV, presenta el análisis comparativo de resultados entre ambos modelos frente al consumo real registrado. Se evalúa la variabilidad y el porcentaje de error generado por cada modelo, permitiendo validar la hipótesis planteada. A partir de los resultados, se desarrollan conclusiones que destacan la efectividad del modelo por rutas, y se formulan recomendaciones para su aplicación práctica y futuras investigaciones.

Esta investigación pretende aportar una solución concreta y técnicamente viable para reducir la incertidumbre en la estimación del consumo de combustible en minería, contribuyendo a una mayor eficiencia operativa, mejor control presupuestal y una toma de decisiones más precisa en contextos de alta exigencia como los que enfrentan las operaciones mineras a gran escala.

Capítulo I. Parte introductoria del trabajo

1.1 Generalidades

En la industria minera, la eficiencia operativa es un factor determinante para la rentabilidad y sostenibilidad de las operaciones. Uno de los aspectos críticos en este contexto es el consumo de combustible de los equipos de acarreo, especialmente de los camiones mineros de alta capacidad como el modelo CAT 793. Este tipo de camiones representa una parte significativa del costo operativo total debido a su alta demanda energética. Sin embargo, el análisis de su desempeño suele verse afectado por una alta variabilidad en el cálculo del ratio de consumo de combustible, lo que dificulta la identificación precisa de ineficiencias y la toma de decisiones basadas en datos confiables.

La variabilidad en este indicador puede deberse a múltiples factores, como condiciones topográficas, estilos de conducción, estado mecánico del equipo, tipo de material transportado y condiciones climáticas, entre otros. Esta dispersión en los datos compromete la capacidad de establecer comparaciones justas entre unidades, turnos o frentes de trabajo, y limita la implementación efectiva de estrategias de optimización del consumo de combustible.

La presente investigación tiene como objetivo principal proponer un enfoque para reducir la variabilidad en el cálculo del ratio de consumo de combustible en camiones mineros CAT 793, a partir de una revisión de variables operativas relevantes y la aplicación de métodos estadísticos y analíticos que permitan normalizar y corregir los datos. De este modo, se busca generar indicadores más representativos del desempeño real de los equipos, facilitando una gestión energética más precisa y sustentable dentro de la operación minera.

1.2 Descripción del problema de investigación

En las operaciones mineras a tajo abierto, la gestión eficiente del consumo de combustible en los camiones de acarreo constituye un factor crítico para el control de costos operativos. Sin embargo, en la flota de camiones CAT 793 se ha identificado una

discrepancia sistemática entre el consumo de combustible planificado y el consumo real observado en operación. Específicamente, se ha registrado una variación promedio de +2 galones por hora por camión, lo que genera una subestimación constante en la proyección de costos mensuales. Esta desviación, aunque aparentemente marginal por unidad, representa en conjunto un impacto económico significativo que puede superar los 2 millones de dólares anuales no planificados.

Dicha diferencia ha generado una percepción de falta de control en la planificación financiera por parte de los accionistas y ha contribuido a que la operación minera reporte consistentemente costos por encima del presupuesto. La raíz del problema radica en la alta variabilidad del cálculo del ratio de consumo de combustible, lo cual puede estar asociado a múltiples factores operacionales, técnicos y metodológicos que no están siendo adecuadamente considerados en la etapa de planificación. Esta situación pone en evidencia la necesidad de desarrollar una metodología que permita reducir dicha variabilidad y así mejorar la precisión de las estimaciones de consumo de combustible, con el objetivo de alinear los resultados reales con las proyecciones presupuestadas y optimizar la toma de decisiones financieras y operativas. (Fuente: Área de planeamiento mina).

En este contexto se plantea la siguiente interrogante.

¿En qué medida el inadecuado cálculo de ratio de consumo de combustible en camiones CAT 793 impacta de manera negativa en el cálculo de presupuesto anual de consumo?

1.3 Objetivo

Desarrollar un modelo por rutas que permita reducir la variabilidad en el cálculo del ratio de consumo de combustible en camiones CAT 793

1.4 Hipótesis

Un adecuado modelo por rutas para el cálculo de ratio de consumo de combustible en camiones CAT 793, permitirá reducir la variabilidad entre lo calculado y lo real.

1.5 Operacionalización de variables

1.5.1 Variable independiente (V.I)

- X: Modelo.
 - Tipo de material (mTon).
 - Distancia por pendiente (m).
 - Ratio de consumo por pendiente (gal/hr).

1.5.2 Variable dependiente (V.D)

- Y: Variabilidad.
 - Ratio de consumo planificado (gal/hr).
 - Ratio de consumo real (gal/hr)

Tabla 1

Matriz de consistencia

PROBLEMA	OBJETIVO	HIPÓTESIS	VARIABLE INDEPENDIENTE	VARIABLE DEPENDIENTE	INDICADORES
¿En qué medida el inadecuado cálculo de ratio de consumo de combustible en camiones CAT 793 impacta de manera negativa en el cálculo de presupuesto anual de consumo?	Desarrollar un modelo por rutas que permita reducir la variabilidad en el cálculo del ratio de consumo de combustible en camiones CAT 793	Un adecuado modelo por rutas para el cálculo de ratio de consumo de combustible en camiones CAT 793, permitirá reducir la variabilidad entre lo calculado y lo real.	X: Modelo	Y: Variabilidad	Ratio de consumo planificado (gal/hr). Ratio de consumo real (gal/hr)

Fuente: Elaboración propia

1.6 Antecedentes referenciales

1.6.1 Antecedentes internacionales

Bagheri, A. et al. (2022) *Application of machine learning techniques to predict haul truck fuel consumption in open-pit mines*. En este trabajo realizado en una mina de hierro iraní, se aplica inteligencia artificial para predecir el consumo de combustible de camiones mineros. Se utilizaron distintos algoritmos de aprendizaje automático (como redes neuronales, bosques aleatorios, regresión lineal múltiple, K-NN y SVM) para modelar datos históricos que incluyen variables como distancia recorrida, carga útil, velocidad media,

pendiente y condiciones del motor. La red neuronal artificial fue la que obtuvo mejores resultados, con un R^2 de 0.903, lo que indica alta precisión. Este enfoque permite identificar patrones de consumo no lineales y difíciles de detectar con métodos convencionales. La investigación concluye que la implementación de modelos predictivos basados en IA puede ayudar a mejorar la planificación de combustible, reducir costos operativos y tomar decisiones más informadas en tiempo real, incluso bajo condiciones variables de operación.

Dindarloo, S.R. et al (2016) *Determinants of fuel consumption in mining trucks*. Este estudio, basado en más de 5,000 ciclos de acarreo en una mina a cielo abierto, busca identificar los factores que determinan el consumo de combustible en camiones mineros. Se emplean modelos estadísticos avanzados, como regresión de mínimos cuadrados parciales (PLS) y series temporales ARIMA, para modelar el comportamiento del consumo. Los resultados muestran que el tiempo en ralentí, la velocidad, la distancia de acarreo, el peso del camión y el número de paradas son variables altamente significativas. En particular, se identifica que el tiempo en vacío representa una porción importante del consumo innecesario. Los autores recomiendan optimizar los procesos de despacho, introducir políticas de apagado automático en ralentí prolongado y entrenar a los operadores para reducir los comportamientos ineficientes. El trabajo destaca la necesidad de una estrategia integrada de control y monitoreo del consumo para mejorar el desempeño operativo y económico.

Gusman, M. (2021) *Effect of total resistance and speed on fuel consumption of dump truck HD 465-7 in coal mining*. En este trabajo, desarrollado en una operación minera de carbón en Indonesia, se investiga cómo la resistencia total al avance (incluyendo la resistencia al rodaje, la pendiente del terreno y la resistencia al aire) y la velocidad de operación influyen en el consumo de combustible de los camiones Komatsu HD 465-7. El análisis se basa en datos de campo obtenidos durante distintos turnos y rutas, combinando observaciones directas con simulaciones. Se concluye que una mala planificación de rutas, con pendientes muy pronunciadas o numerosas intersecciones, puede aumentar

significativamente el gasto de combustible. El autor recomienda rediseñar las rutas de acarreo, implementar un mantenimiento más frecuente de las vías y establecer velocidades operativas óptimas según el tipo de carga y condiciones del camino, lo que permite no solo reducir el consumo sino también prolongar la vida útil de los equipos.

Meneses, D. et al (2023) *Modeling productivity reduction and fuel consumption in open-pit mining trucks by considering the temporary deterioration of mining roads through discrete-event simulation*. Este estudio chileno analiza cómo la degradación temporal de los caminos mineros afecta el rendimiento de los camiones de acarreo, tanto en productividad como en consumo de combustible. Los autores aplican una simulación de eventos discretos para modelar la operación de camiones en distintas condiciones viales. Los resultados muestran que al no considerar el deterioro progresivo de los caminos en la planificación, se sobreestima la capacidad productiva hasta en 600 toneladas por hora y se genera un consumo de combustible 78% mayor al estimado. Asimismo, se propone la integración de un plan de mantenimiento vial más frecuente —como la operación de motoniveladoras— que permite recuperar parte de la eficiencia perdida. Este trabajo subraya la importancia de la planificación dinámica en minas a cielo abierto, tomando en cuenta la variabilidad operativa para evitar desvíos presupuestarios y mejorar la eficiencia energética.

Orkhontuul, B. et al. (2024) *Determination of fuel consumption of dump trucks depending on mining and technical conditions*. Investigadores de Mongolia aplicaron el sistema MICROMINE PITRAM para estudiar cómo las condiciones mineras y técnicas influyen en el consumo de combustible en la mina Erdenet, una de las más grandes de Asia. Se recopiló una gran base de datos que incluyó parámetros como distancia de acarreo, capacidad de carga, tiempo de ciclo, estado del camino y resistencia al movimiento. Mediante modelos de regresión, se establecieron relaciones cuantificables entre estos factores y el consumo específico por tonelada transportada. A partir del análisis, se propusieron mejoras en la programación de rutas, monitoreo de condiciones de los camiones y prácticas de mantenimiento, que permitirían una reducción considerable

en el consumo de combustible. La principal conclusión fue que el análisis detallado y continuo de datos operacionales permite diseñar soluciones personalizadas y adaptativas que mejoran el rendimiento y reducen el impacto ambiental.

1.6.2 Antecedentes nacionales

Lucano, W. (2014) Mejoramiento del cálculo de consumo de combustible en acarreo en las operaciones mina de Sociedad Minera Cerro Verde S.A.A. La investigación desarrolla una propuesta metodológica para mejorar la precisión en el cálculo del consumo de combustible en flotas de camiones mineros, específicamente en Cerro Verde. Se parte del diagnóstico de que los métodos tradicionales de estimación no consideran las particularidades del ciclo de acarreo y generan proyecciones que difieren significativamente del consumo real. El autor propone un modelo basado en regresión lineal que segmenta el consumo en tres componentes: consumo en tramos con carga y sin carga (según la pendiente del terreno), consumo en paradas prolongadas con el motor encendido, y consumo asociado a mantenimiento o detenciones técnicas. El modelo permite una estimación más exacta del combustible requerido por camión y por ciclo, facilitando la planificación de abastecimiento y la identificación de ineficiencias operativas. La implementación en campo permitió reducir la desviación entre lo planificado y lo real, mejorando la gestión financiera y operativa del área de acarreo.

Peña, L. (2021) Análisis de las variables de rendimiento operacional en camiones mineros Komatsu 730E. Esta tesis examina las variables operacionales que inciden en el rendimiento y consumo de combustible de los camiones Komatsu 730E en una operación minera peruana. Se realiza una recolección y análisis de datos mediante sensores a bordo (sistema Dispatch y VIMS), focalizándose en parámetros como velocidad promedio, tiempo de carga, número de ciclos diarios, carga útil efectiva, condiciones del camino y régimen del motor. A través de un enfoque estadístico y comparativo, el autor identifica que una variación de $\pm 10\%$ en la velocidad promedio genera cambios significativos en el consumo, y que las malas prácticas operativas como el exceso de ralentí aumentan innecesariamente el gasto de combustible. Se propone un plan de acción que incluye

capacitación a operadores, mantenimiento focalizado y ajustes de velocidad por tramo. El resultado fue una mejora comprobada en la eficiencia energética y una reducción en los costos de operación por camión.

Quijada, C. (2019) Reducción de consumo de combustible a través de análisis del desempeño de camiones 6x2. Este trabajo estudia el comportamiento energético de camiones con configuración 6x2 utilizados en operaciones de acarreo de mineral, evaluando cómo su diseño estructural y dinámico influye en el consumo de combustible. A través de un análisis técnico-operativo y pruebas en campo, el autor identifica factores como la resistencia aerodinámica, las pérdidas por fricción y la distribución del peso como determinantes clave del consumo. Se simulan escenarios con y sin mejoras aerodinámicas (como deflectores de aire) y se propone una ruta de optimización logística que incluye mejores prácticas de conducción y mantenimiento predictivo. La investigación concluye que una gestión integral del transporte puede lograr ahorros superiores al 10% en el consumo total de combustible, mejorando no solo los costos sino también las emisiones de gases contaminantes asociadas al transporte pesado en minería.

Tejsi. T. (2019) Estudio del consumo de combustible e implementación de un módulo de información en el sistema Dispatch para los camiones de la Cía. Minera Antapaccay - Espinar – Cusco. Este proyecto de investigación propone una mejora en el sistema de control Dispatch, ampliamente utilizado en minería para el monitoreo de flota, con el objetivo de incluir un nuevo módulo capaz de calcular y proyectar el consumo de combustible en tiempo real. Se analizan los métodos actuales de estimación, que suelen basarse en promedios históricos y carecen de flexibilidad ante cambios operacionales. El módulo desarrollado recopila datos en tiempo real del sistema VIMS de los camiones, integrando variables como carga transportada, velocidad, pendientes del camino y tiempos de inactividad. Esto permite generar alertas sobre desviaciones en el consumo esperado y planificar con mayor precisión el abastecimiento de combustible y el mantenimiento preventivo. La implementación del módulo en una mina de mediana escala del sur del Perú

permitió reducir en un 15% las desviaciones presupuestales mensuales relacionadas al combustible.

Valdivieso, L. (2015) Cálculo de camiones para el transporte de mineral y desmonte en Sociedad Minera Cerro Verde S.A.A. El autor desarrolla un modelo para determinar el número óptimo de camiones necesarios para cumplir con el plan de producción minera, tomando en cuenta el consumo de combustible como una de las variables críticas. El estudio integra parámetros como la capacidad del camión, el número de viajes por turno, la distancia de acarreo, los tiempos de carga y descarga, y el consumo de combustible por hora. A través de un enfoque matemático y simulaciones operacionales, se busca minimizar los costos asociados al sobreuso o subutilización de flota. El modelo se aplica a los camiones CAT 793 de Cerro Verde, y los resultados muestran que una planificación eficiente basada en datos reales de consumo y rendimiento puede evitar el sobredimensionamiento de la flota, reducir el gasto mensual en combustible y mejorar la eficiencia del acarreo.

Capítulo II. Marcos teórico y conceptual

2.1 Marco Teórico

2.1.1 *Consumo de combustible en minería*

En la minería a tajo abierto, el sistema de acarreo mediante camiones constituye una de las actividades más intensivas en consumo de energía. El combustible diésel, utilizado por la mayoría de camiones mineros de gran tonelaje, representa entre el 25% y 35% del costo operativo total en operaciones de gran escala, lo que convierte su gestión en una prioridad estratégica para las empresas mineras. (Fuente: Nieto et al, 2020 & Valdivieso, 2015).

El consumo de combustible no solo tiene implicancias económicas, sino también ambientales y de sostenibilidad. Un uso ineficiente del mismo contribuye al aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero, al desgaste prematuro de los equipos y a desviaciones presupuestarias recurrentes. A diferencia de otras industrias, en minería las condiciones operativas varían constantemente (pendientes, clima, distancia de acarreo, tipo de material), lo cual introduce una alta variabilidad en el rendimiento energético de los camiones. (Fuente: OECD, 2023)

En este contexto, el cálculo preciso del consumo de combustible se vuelve esencial tanto para la planificación financiera como para la programación operativa. Una subestimación en los volúmenes requeridos puede traducirse en desabastecimientos logísticos o sobre costos no previstos, mientras que una sobrestimación lleva a una ineficiente asignación de recursos. Adicionalmente, en flotas que operan las 24 horas del día, pequeñas desviaciones por unidad (por ejemplo, +2 gal/h) pueden traducirse en pérdidas millonarias a lo largo del año. (Fuente: Lucano, 2014 & Dindarloo et al, 2016).

Asimismo, las tecnologías de monitoreo moderno, como los sistemas VIMS o DISPATCH, han permitido avances en la precisión del seguimiento de parámetros como el consumo horario, tiempo en ralentí, carga útil y eficiencia por tonelada-kilómetro.

Sin embargo, la mayoría de las operaciones aún basa sus proyecciones en estimaciones históricas generalizadas, lo cual limita la capacidad de respuesta ante desviaciones operativas. (Fuente: Peña, 2021).

Por lo tanto, existe una necesidad crítica de comprender y reducir la variabilidad en el cálculo del consumo de combustible, lo cual contribuiría directamente a mejorar la gestión de costos, la sostenibilidad ambiental y la eficiencia global del proceso minero.

2.1.2 Factores que afectan el consumo de combustible

El consumo de combustible en camiones mineros está determinado por una interacción compleja de variables operacionales, técnicas y ambientales. Identificar y analizar estos factores permite no solo entender las causas de un alto consumo, sino también establecer acciones de mejora que reduzcan los costos operativos y la huella ambiental. Diversos estudios han categorizado estos factores en tres grupos principales: condiciones técnicas del equipo, variables operacionales y condiciones del entorno.

2.1.2.1 Condiciones técnicas del equipo. Las características del camión y su estado mecánico influyen directamente en su eficiencia energética. Entre los factores más relevantes se encuentran:

- **Potencia y tipo de motor:** Los camiones como el CAT 793 utilizan motores de alta potencia (más de 2,400 HP), cuyo rendimiento depende de su calibración y tecnología de inyección de combustible. (Fuente: Lucano, 2014).
- **Antigüedad y mantenimiento:** Equipos con mayor antigüedad o sin mantenimiento adecuado presentan mayores pérdidas mecánicas, incremento en el consumo de combustible y emisiones. Estudios muestran que la eficiencia puede reducirse hasta en un 15% en camiones con más de 30,000 horas de uso sin overhaul adecuado. (Fuente: Dindarloo et al, 2016).
- **Neumáticos y sistema de tracción:** La presión incorrecta o el desgaste de neumáticos aumenta la resistencia al rodaje, lo cual incrementa el esfuerzo del motor y, por tanto, el consumo. (Fuente: Nieto et al, 2020).

2.1.2.2 Variables operacionales. Las condiciones de operación diaria tienen un efecto crítico en el consumo real. Estas incluyen:

- **Carga útil:** Una carga mayor aumenta la resistencia al movimiento, pero si se encuentra dentro del rango óptimo del camión, puede mejorar la eficiencia por tonelada transportada. La sobrecarga, en cambio, genera desgaste acelerado y mayor consumo por ciclo. (Fuente: Orkhontuul et al., 2024).
- **Velocidad y aceleración:** El consumo se incrementa cuando los camiones operan en rangos de velocidad no óptimos o realizan aceleraciones bruscas frecuentes. Estudios han demostrado que una operación moderada puede reducir hasta un 10% el consumo. (Fuente: Gusman, 2021).
- **Tiempo en ralentí:** Es uno de los principales responsables del consumo innecesario. Se estima que entre el 25% y 40% del combustible en una operación minera se pierde durante el tiempo en que el camión permanece encendido pero sin movimiento ni carga útil. (Fuente: Dindarloo et al, 2016).
- **Paradas y ciclos improductivos:** Cada detención innecesaria, producto de una mala planificación o congestión operativa, genera gasto de combustible sin aporte productivo. La eficiencia energética se reduce cuando los ciclos son irregulares o contienen tiempos muertos prolongados. (Fuente: Peña, 2021).

2.1.2.3 Condiciones del entorno. El contexto físico donde opera el camión también incide en el rendimiento:

- **Pendientes y desniveles:** Las rutas de acarreo con pendientes mayores al 10% requieren mayor potencia, lo que incrementa el consumo por ciclo. El diseño de rampas y la secuencia de carguío influyen directamente. (Fuente: Meneses, 2023).
- **Estado del camino:** La presencia de baches, polvo suelto o vías sin mantenimiento incrementa la resistencia al rodaje y reduce la tracción, aumentando el esfuerzo del motor. (Fuente: Orkhontuul et al., 2024).
- **Altitud y temperatura:** A mayor altitud, la densidad del aire disminuye, lo que reduce la eficiencia de combustión en motores diésel. De igual forma, las

temperaturas extremas afectan la viscosidad del diésel y la eficiencia del sistema de refrigeración. (Fuente: Bagheri et al., 2022).

2.1.3 Métodos de cálculo del consumo de combustible

El cálculo preciso del consumo de combustible en camiones mineros es fundamental para optimizar costos operativos y mejorar la eficiencia energética. Existen varios métodos para estimar y calcular este consumo, que van desde los más simples y aproximados hasta los más complejos y precisos, utilizando tecnología avanzada como los sistemas de monitoreo en tiempo real. A continuación se detallan los principales métodos utilizados en la minería para calcular el consumo de combustible de camiones mineros.

2.1.3.1 Estimación por consumo horario nominal. El consumo horario nominal es el método más básico y utilizado en muchas operaciones mineras, especialmente cuando no se cuenta con sistemas avanzados de monitoreo. Este método consiste en tomar el valor promedio de consumo de combustible proporcionado por el fabricante del camión, generalmente expresado en galones por hora (gal/h), y multiplicarlo por el tiempo total de operación del camión durante el período de análisis.

Fórmula:

$$Cons. estimado (gal) = Cons. nominal \left(\frac{gal}{h} \right) * Horas de op. (h) \quad (1)$$

Aunque este método es simple y fácil de aplicar, tiene limitaciones importantes, ya que no considera las variaciones operacionales como el tipo de terreno, la carga útil, la velocidad de operación o las condiciones del entorno. Por esta razón, este método puede resultar impreciso cuando las condiciones operativas cambian significativamente durante el ciclo de trabajo. (Fuente: Lucano, 2014).

2.1.3.2 Consumo por tonelada-kilómetro (gal/t-km). Este método proporciona una forma más precisa de calcular el consumo de combustible, especialmente en operaciones mineras a gran escala, donde se transportan grandes volúmenes de material. El consumo por tonelada-kilómetro evalúa la eficiencia energética en función de la cantidad de material transportado y la distancia recorrida.

Fórmula:

$$Cons. específico = \frac{Total\ de\ galones\ consumidos}{Ton.\ transportadas * Kilometros\ recorridos} \quad (2)$$

Este método tiene la ventaja de considerar el rendimiento energético en función del trabajo real realizado (es decir, el transporte de material). Es útil para comparar la eficiencia entre diferentes camiones o diferentes turnos operativos. Sin embargo, no tiene en cuenta otros factores que podrían afectar el consumo, como el tiempo en ralentí o las condiciones de operación no ideales. (Fuente: Orkhontuul et al., 2024).

2.1.3.3 Modelos estadísticos y predictivos. Con el avance de la tecnología, los métodos estadísticos y de modelado predictivo han ganado popularidad para calcular el consumo de combustible con mayor precisión. Estos métodos utilizan algoritmos matemáticos y modelos estadísticos para predecir el consumo de combustible en función de múltiples variables, como la carga útil, la velocidad, la resistencia del terreno, las condiciones climáticas y las características del camión. Los enfoques más comunes incluyen:

2.1.3.3.1 Regresión lineal y multivariada: Estos modelos consideran las variables que afectan al consumo de combustible y crean una ecuación que describe la relación entre ellas. Se utilizan principalmente cuando se dispone de un conjunto de datos históricos sobre consumo y las variables relevantes. (Fuente: Dindarloo et al, 2016).

2.1.3.3.2 Redes neuronales y machine learning: Los métodos más avanzados, como las redes neuronales artificiales o los modelos de aprendizaje automático (machine learning), permiten analizar grandes volúmenes de datos en tiempo real y hacer predicciones precisas sobre el consumo de combustible. Estos modelos no solo consideran factores predefinidos, sino que también aprenden de los patrones operacionales y ajustan sus predicciones en consecuencia.

Un ejemplo de este tipo de tecnología es el uso de sistemas de monitoreo integrados con sensores en los camiones (como el VIMS de CAT) para analizar el rendimiento y predecir el consumo futuro. (Fuente: Bagheri et al, 2022)

Fórmula (modelo de regresión):

$$\text{Cons. de comb. (gal)} = \beta_0 + \beta_1(\text{carga}) + \beta_2(\text{velocidad}) + \beta_3(\text{pendiente}) + \dots \quad (3)$$

Donde:

β_0 = Es la intersección.

β_i = Son los coeficientes estimados que indican la influencia de cada variable en el consumo.

Estos modelos permiten hacer ajustes finos a las proyecciones de consumo basadas en condiciones operativas específicas, proporcionando estimaciones mucho más precisas que los métodos convencionales.

2.1.3.4 Tecnologías avanzadas de monitoreo en tiempo real. En los últimos años, el uso de tecnologías avanzadas de monitoreo en tiempo real ha revolucionado la manera en que se calcula el consumo de combustible en la minería. Los sistemas de gestión de flotas, como VIMS (Vital Information Management System) de Caterpillar y MineStar de Komatsu, permiten el seguimiento constante de variables como la velocidad del camión, las horas de motor, el consumo instantáneo de combustible, y otros factores operacionales.

Estos sistemas recogen datos de los sensores en tiempo real y proporcionan una visualización instantánea del rendimiento del camión.

- **Sistema VIMS:** Recoge y transmite datos como el consumo de combustible, la temperatura del motor, el régimen de funcionamiento y la carga útil, lo que facilita la identificación de ineficiencias y desviaciones del rendimiento esperado. Esta información permite tomar decisiones operativas más informadas, como el ajuste de rutas o el mantenimiento preventivo antes de que los problemas se agraven. (Fuente: Peña, 2021).

La implementación de estas tecnologías reduce significativamente la incertidumbre y permite a las empresas mineras optimizar el uso de los camiones, reduciendo costos y mejorando la sostenibilidad de las operaciones. (Fuente: Meneses et al, 2023).

2.1.4 Impacto de la desviación en el consumo de combustible

La desviación entre el consumo real de combustible y el consumo planificado en operaciones mineras representa un problema crítico que afecta directamente los costos operativos, la eficiencia del presupuesto, la rentabilidad del proyecto y la percepción del desempeño por parte de los accionistas. Estas desviaciones, aunque parezcan pequeñas en términos unitarios (por ejemplo, +2 gal/h por camión), adquieren una magnitud significativa cuando se proyectan sobre una flota completa operando durante turnos prolongados.

2.1.4.1 Impacto económico. El impacto más evidente de la desviación en el consumo de combustible es el sobre costo económico. En minería a tajo abierto, el combustible representa entre el 25% y 35% del costo total operativo. Por ejemplo, una desviación promedio de +2 gal/h por camión, considerando una flota de 30 camiones CAT 793 operando 20 horas al día, puede representar más de US\$2 millones anuales no presupuestados. (Fuente: Dindarloo et al, 2016)

Además, una mala estimación en el consumo de combustible afecta directamente los modelos financieros, desalineando los costos proyectados con los costos reales, lo que genera desviaciones en los KPIs financieros. (Fuente: Lucano, 2014).

2.1.4.2 Impacto en la planificación y control de operaciones. Cuando los datos de consumo no son precisos o presentan alta variabilidad, se dificulta la planificación eficiente del abastecimiento de combustible, lo que puede derivar en interrupciones operativas por desabastecimiento o exceso de almacenamiento, ambos generando sobre costos.

Asimismo, afecta el diseño de rutas óptimas y la planificación de turnos, ya que las decisiones basadas en datos inexactos de consumo no reflejan el comportamiento real de la operación.

Esto también complica la evaluación comparativa entre turnos, operadores o camiones, distorsionando los análisis de eficiencia operativa. (Fuente: Orkhontuul et al., 2024)

2.1.4.3 Impacto ambiental. El sobreconsumo de combustible no solo representa un costo económico, sino también un mayor impacto ambiental. Cada galón adicional de diésel consumido genera aproximadamente 10,2 kg de CO₂, lo que implica un aumento en la huella de carbono de la operación minera. (Fuente: EPA, 2022).

Las desviaciones sistemáticas en el consumo también impiden el cumplimiento de objetivos de sostenibilidad ambiental y pueden deteriorar la imagen de la empresa frente a la comunidad, autoridades ambientales y accionistas. (Fuente: Meneses, 2023).

2.1.4.4 Impacto en la percepción del accionista y toma de decisiones estratégicas. En contextos corporativos, donde se reportan periódicamente los costos operativos, una desviación constante entre lo planificado y lo real genera pérdida de confianza de los accionistas y altos ejecutivos. Esto puede afectar decisiones estratégicas como aprobaciones de nuevos proyectos, asignación de capital y desempeño de la gerencia. La empresa podría verse obligada a justificar variaciones presupuestales inesperadas, lo cual complica la gestión del control de costos. (Fuente: Peña, 2021).

2.1.5 Estrategias para reducir el consumo de combustible

Reducir el consumo de combustible en la minería no solo tiene un impacto directo sobre la reducción de costos operativos, sino que también contribuye al cumplimiento de objetivos ambientales y de sostenibilidad. Diversos estudios y prácticas en el sector minero han identificado múltiples estrategias eficaces que pueden implementarse de forma individual o integrada. Estas estrategias se dividen en medidas técnicas, operativas y de gestión.

2.1.5.1 Optimización de rutas y diseño de pistas. Una de las estrategias más eficaces es la mejora del diseño geométrico de las rutas de acarreo. Las pendientes pronunciadas, curvas cerradas y caminos mal mantenidos incrementan la resistencia al rodado, lo que aumenta el consumo de combustible. La nivelación de rutas, la reducción de pendientes y el mantenimiento regular de pistas pueden disminuir el esfuerzo del motor y mejorar la eficiencia. (Fuente: Meneses et al, 2023).

- Reducción del consumo entre 5% y 10% mediante mejoras en el diseño de rampas y pistas de acarreo.
- Implementación de software de optimización de rutas (ej. DISPATCH, MineStar) para minimizar distancias y pendientes críticas.

2.1.5.2 Capacitación de operadores y conducción eficiente. El estilo de conducción del operador influye significativamente en el consumo de combustible. Aceleraciones bruscas, frenadas innecesarias, uso inadecuado de marchas y tiempos prolongados en ralentí contribuyen al sobreconsumo. Capacitar a los operadores en técnicas de conducción eficiente puede generar ahorros importantes.

Según Komatsu (2021), una capacitación adecuada puede reducir el consumo entre 6% y 12%.

- Prácticas recomendadas: mantener velocidad constante, evitar el ralentí prolongado, y uso correcto del freno retarder.
- Monitoreo del desempeño del operador mediante indicadores por camión y retroalimentación periódica.

2.1.5.3 Gestión del ralentí. El tiempo en ralentí o marcha mínima es uno de los mayores contribuyentes al consumo innecesario de combustible. Diversos estudios muestran que hasta un 30% del tiempo de operación de un camión minero puede estar en ralentí, lo que representa consumo sin productividad.

- Estrategias: instalación de sistemas automáticos de apagado del motor (auto shutdown), sensibilización de operadores, e integración de alarmas o alertas por tiempo excesivo en ralentí.
- Lucano (2014) reportó que la reducción del ralentí de 30% a 15% generó ahorros anuales de más de US\$1.5 millones en una flota de 25 camiones.

2.1.5.4 Uso de tecnologías de monitoreo y control en tiempo real. La implementación de sistemas telemáticos y sensores permite registrar datos operativos en tiempo real, detectar desviaciones en el consumo y aplicar acciones correctivas

inmediatas. Tecnologías como VIMS (Caterpillar) y Modular Mining permiten monitorear variables como carga útil, consumo por ciclo, tiempos muertos, RPM del motor y más.

- Permiten generar reportes por camión, operador y turno.
- Soportan sistemas de alertas para acciones correctivas inmediatas.
- Se integran con dashboards de gestión para toma de decisiones.

2.1.5.5 Mantenimiento preventivo del equipo. El estado mecánico del camión tiene un impacto directo en su eficiencia. Filtros obstruidos, inyectores defectuosos, neumáticos mal inflados o mal alineados, y motores fuera de calibración elevan el consumo de combustible.

- Aplicación de programas de mantenimiento basados en condición (CBM).
- Inspecciones diarias de neumáticos, frenos y sistemas de inyección.
- Revisión del consumo por equipo para identificar unidades con comportamiento anómalo.

2.1.5.6 Optimización de la carga útil. Operar camiones con sobrecarga o carga subóptima afecta negativamente el consumo de combustible. La sobrecarga exige mayor esfuerzo al motor, reduce la vida útil del camión y aumenta el consumo por tonelada transportada.

- Uso de sistemas de pesaje a bordo para asegurar cargas dentro de los parámetros recomendados por el fabricante.
- Capacitación del personal de carguío (shovel operators) en técnicas de distribución de carga.

2.2 Marco conceptual

2.2.1 Consumo

Cantidad de combustible utilizada por una máquina o vehículo durante su operación en un período o actividad determinada.

2.2.2 Combustible

Sustancia (generalmente diésel en minería) que al ser quemada en el motor genera energía para el funcionamiento de los camiones y equipos pesados.

2.2.3 Variabilidad

Grado de dispersión o fluctuación de los datos en torno a un valor promedio, como en el caso del consumo de combustible entre lo planificado y lo real.

2.2.4 Rendimiento

Relación entre la producción obtenida (por ejemplo, toneladas transportadas) y los recursos consumidos (como galones de combustible), usada para medir eficiencia operativa.

2.2.5 Eficiencia

Capacidad de un sistema o equipo para obtener el máximo rendimiento con el mínimo consumo de recursos, en este caso, combustible.

2.2.6 Planificación

Proceso de estimar y organizar los recursos necesarios (incluido el combustible) para cumplir con los objetivos operativos en minería.

2.2.7 Desviación

Diferencia entre el valor real y el valor planificado o esperado, por ejemplo, en el cálculo del consumo de combustible por hora o por ciclo.

2.2.8 Ralentí

Estado en el que el motor del camión se encuentra encendido pero sin generar trabajo útil, lo que contribuye al consumo innecesario de combustible.

2.2.9 Ruta

Trayectoria o camino que sigue un camión minero desde el punto de carguío hasta el de descarga; su diseño y condición influyen directamente en el consumo de combustible.

Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación

3.1 Recolección de datos

3.1.1 Unidad de estudio

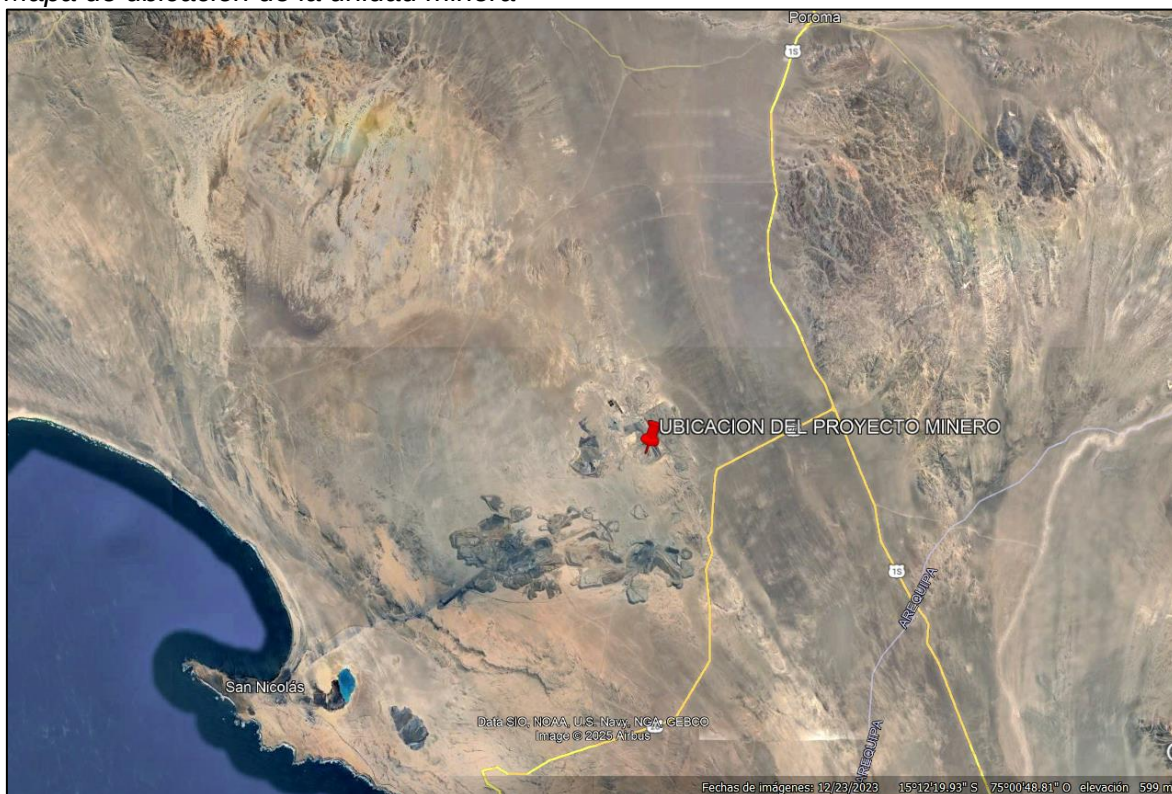
3.1.1.1 Ubicación y accesibilidad.

La unidad minera se encuentra ubicado en el distrito de Marcona, provincia de Nasca, departamento de Ica, aproximadamente a 489 km al sureste de Lima, a 35 km suroeste de la capital de la provincia de Nasca, y a 25 km al noreste del pueblo de San Juan de Marcona. Abarca un área de aproximadamente 3,969.31 hectáreas de una zona desértica. El acceso vía terrestre desde Lima se realiza por la Panamericana Sur (PE-1S) hasta el desvío a Marcona (DV Marcona), desde el cual se toma la carretera Interoceánica (Ruta PE-30), y finalmente se toma el desvío a la Unidad Minera.

En la figura 1, se muestra la ubicación de la unidad minera.

Figura 1

Mapa de ubicación de la unidad minera



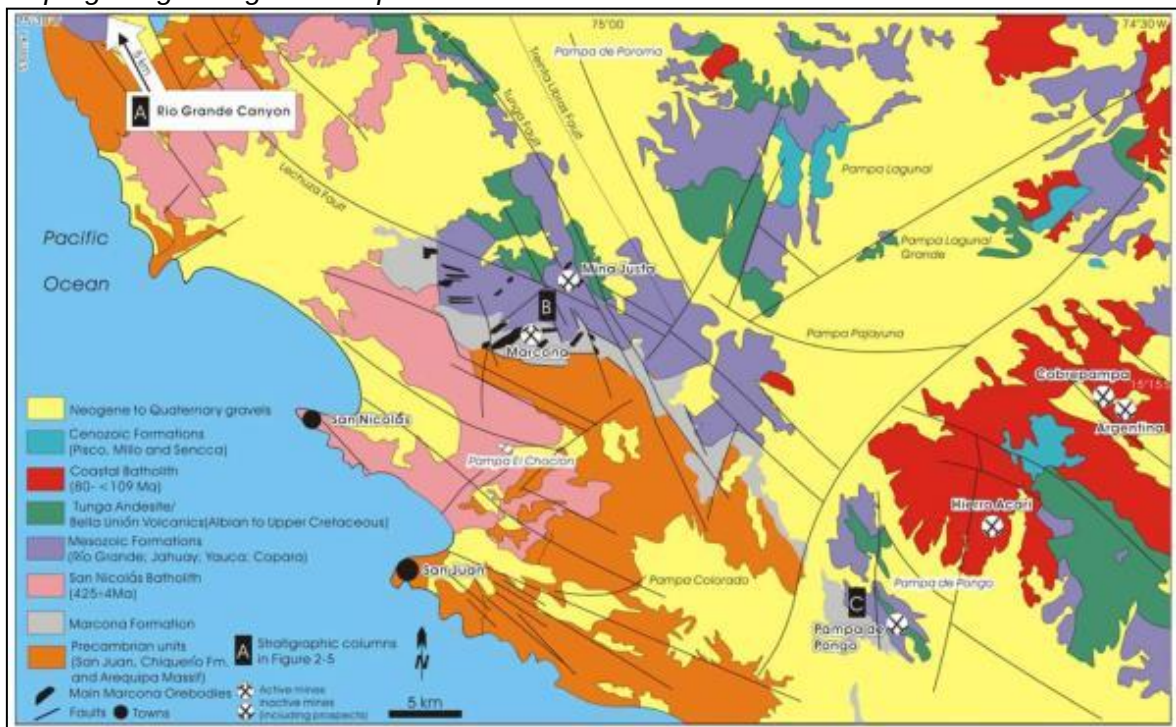
Fuente: Área de planeamiento mina

3.1.1.2 Geología Regional. El proyecto está ubicado en el Cinturón Costero del Perú, un cinturón lineal de tendencia noroeste paralelo a la zona de subducción donde la Placa de Nazca subduce debajo de la Placa Sudamericana, formando un margen continental activo.

La geología del distrito comprende el basamento precámbrico superpuesto de forma irregular por rocas sedimentarias neoproterozoicas y fanerozoicas. Las rocas de composición monzogranítica, granodiorítica y gabro-diorítica del batolito de San Nicolás (aproximadamente 425 Ma) intruyen a las rocas pre-cámbricas y paleozoicas. Las rocas pre-cámbricas y paleozoicas están superpuestas por una serie de secuencias volcano-sedimentarias que varían en edad desde el Triásico tardío hasta el Holoceno. Las secuencias de rocas volcano-sedimentarias están intruídas por diques de andesita porfírica de edad Cretácica (andesita Tunga, también denominada "ocoita"). La figura 2 presenta el mapa geológico simplificado.

Figura 2

Mapa geológico regional simplificado



Fuente: Área de geología mina

En las partes orientales del distrito, el batolito de la costa (aproximadamente 109 Ma) intruye las rocas paleozoicas y mesozoicas existentes. Los sedimentos marinos de aguas poco profundas de la era terciaria y los depósitos de terrazas marinas de la era cuaternaria se superponen de manera inconforme a la sucesión del arco volcán-plutónico.

3.1.1.3 Geología local. El proyecto es un yacimiento que comprende un cuerpo mineralizado Principal y dos cuerpos mineralizados adyacentes, Manto Magnetita, ubicado cerca de 2 km al oeste del cuerpo Principal y Escondida Norte, ubicado cerca de 1.2 km al noreste del cuerpo Principal. Estos cuerpos se encuentran dentro del mismo contexto geológico regional y local; alojados en la Formación Rio Grande de edad jurásico medio - inferior. La formación Rio Grande localmente está dominada por lavas andesíticas intercaladas con piroclastos y arcosas, areniscas carbonatadas, calizas fosilíferas y pequeños niveles de limoarcillas.

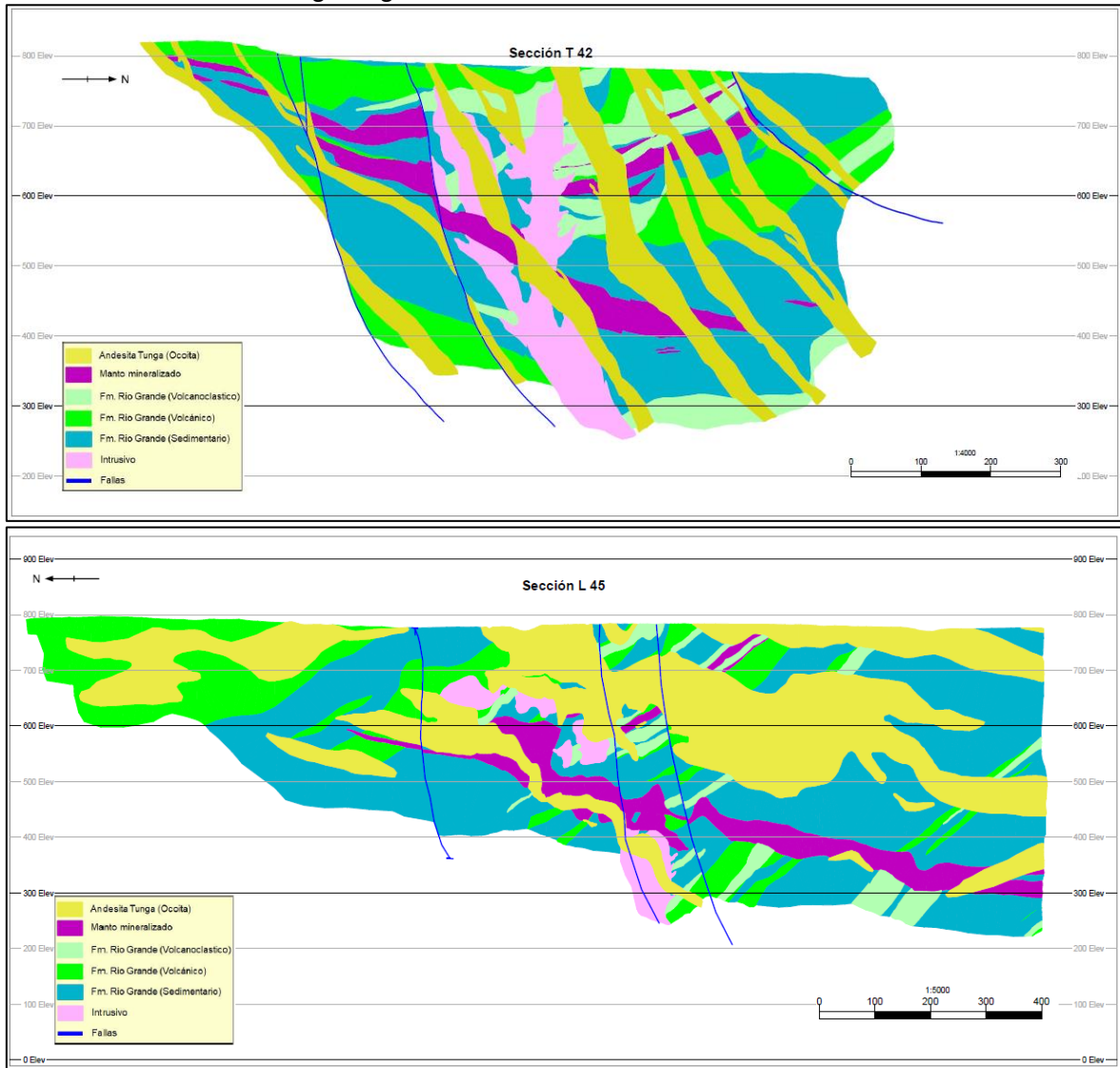
Este paquete volcánico-sedimentario muestra un historial prolongado de deformación y alteración, con varios eventos de fallas y cizalladuras afectados por cambios en el régimen de tensión de la zona de subducción cercana.

En gran parte de los sulfuros y algunos lentes en los óxidos, han sido sometidas a una intensa alteración hidrotermal, principalmente de óxidos de hierro, actinolita, clorita, albita secundaria, K-feldespato, apatito, escapolita y calcita. Las litologías con alteración intensa han sido agrupadas bajo el termino de “Unidad Hidrotermal”.

Una de las últimas etapas de deformación es la falla normal del bloque a lo largo de las estructuras de tendencia noroeste que están estrechamente asociadas con el emplazamiento tardío de diques de andesitas, localmente denominadas de ocoitas. El trabajo realizado por Chen (2008) sugiere que la mineralización de Mina Justa es significativamente más joven (aproximadamente 104 Ma a 95 Ma) que, y geoquímicamente distinta de, los depósitos vecinos de hierro de Marcona (aproximadamente 162 Ma a 156 Ma).

Figura 3

Vista en secciones de la geología local



Fuente: Área de geología mina

3.1.1.4 Zonas mineralizadas. La mineralización de cobre del proyecto presenta dos estilos principales: sulfuros de alta ley asociados a brechas hidrotermales y zonas de alteración masiva controladas por fallas NE-SE, y mineralización de baja ley tipo stockwork o vetas. Siete etapas hidrotermales han sido identificadas, destacando una fase tardía de sulfuros que reemplaza a una previa de magnetita. Las fallas NO-SE facilitaron el ascenso de fluidos mineralizantes hacia fallas de bajo ángulo, donde se concentra el mayor volumen de mineral.

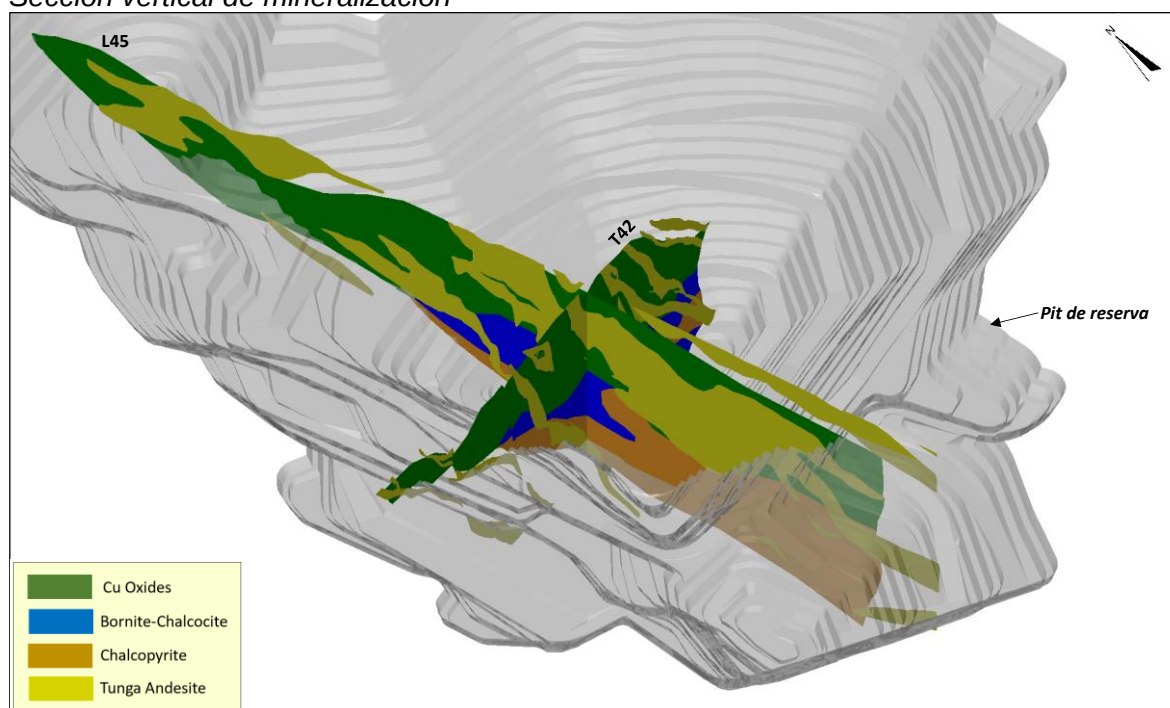
El intemperismo generó una zona de óxidos de cobre (atacamita y crisocola) desde superficie hasta unos 180 m de profundidad. El cuerpo principal del proyecto se extiende

2,100 m (N-S) por 1,500 m (E-O), con espesores de hasta 150 m y mineralización subhorizontal en superficie, que se profundiza siguiendo fallas lístricas. Los sulfuros presentes son bornita, calcosina y calcopirita, con una zona de transición hacia óxidos.

El cuerpo Manto Magnetita es tabular, orientado NE-SO, de 700 × 350 m y buzamiento de 60° al NO, dominado por óxidos de cobre. Por su parte, el cuerpo Escondida Norte muestra mantos con buzamiento al oeste (40°-45°), donde se desarrollan óxidos, una zona transicional, y sulfuros, con presencia creciente de pirita en los bordes.

Figura 4

Sección vertical de mineralización



Fuente: Área de geología mina

3.1.1.5 Geología estructural. La geología estructural del proyecto está marcada por una compleja historia de reactivación de fallas debido a múltiples fases de compresión y extensión relacionadas con la convergencia variable entre la placa de Nazca y el Cratón sudamericano. El depósito se localiza en la intersección de las fallas regionales Tunga y Lechuza, dentro de una zona con múltiples bloques menores que han acomodado desplazamientos diferenciales.

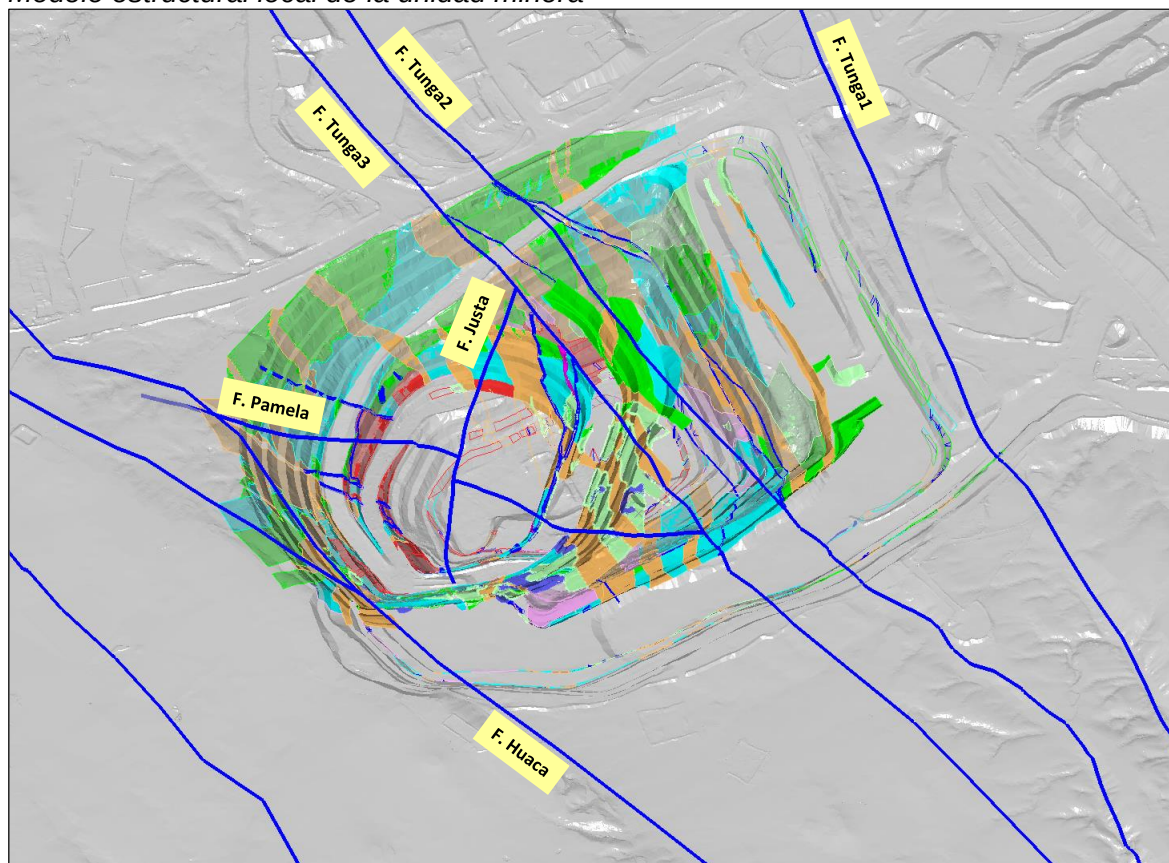
Las fallas individuales muestran evidencias de desplazamiento normal e inverso, y cambios en el sentido del movimiento, reflejando la inversión tectónica de la cuenca

Jahuay-Cañete. La mineralización se relaciona con un entorno tectónico transtensional entre 101–104 Ma y un evento transpresional entre 99–95 Ma, coincidente con la deformación mochica del Cretácico Medio. La fuente térmica y metalífera se asocia al batolito costero, que no presenta deformación interna.

Durante la fase 01 del tajo principal se identificaron fallas locales (Pamela y Evelyn) que, junto con las regionales del sistema andino (Huaca, Tunga 2 y Tunga 3), controlan la mineralización. Estas fallas presentan movimientos normales y dextrales, siendo Evelyn una falla inversa asociada al último evento compresivo. Los desplazamientos de bloques varían entre 12 y más de 50 m, influenciando significativamente la estratigrafía y el modelo geológico del yacimiento.

Figura 5

Modelo estructural local de la unidad minera



Fuente: Área de geología mina

3.1.2 Operaciones mina

El método de minado es a tajo abierto mediante un sistema de explotación convencional de pala y camión. En este método se remueven grandes volúmenes de

material, por lo que es necesario usar maquinaria y equipos de gran tamaño. La unidad minera dispone de una flota de equipos mineros que cumplen con los parámetros técnicos para cada operación unitaria de acuerdo con los diseños de fases y movimiento de material propuesto en el plan de producción.

Tabla 2

Flota de equipos mineros

EQUIPOS DE MINADO	MODELO	N° DE EQUIPOS
EQUIPOS DE CARGUÍO:		
Pala Electrohidráulica HITACHI	EX 5600	3
Cargador Frontal	CAT 994K	3
EQUIPOS DE ACARREO:		
Camión Minero	CAT 793D	29
PERFORADORAS:		
Perforadora Eléctrica	Pit Viper 271	3
Perforadora Diesel	Pit Viper 271	2
Perforadora Pre - Corte	SmartRock D65	2
	FlexiRock T50	1

Fuente: Área de planeamiento mina

3.1.2.1 Perforación y voladura. La operación cuenta con 5 perforadoras de producción de modelo Pit Viper 271, tres de ellas son eléctricas y dos son a diésel.

Los rendimientos de las perforadoras dependen de la zona de voladura en la que se encuentren operando, el rendimiento es medido en función a la velocidad de perforación, en metros perforados por hora. Se han identificado y definido 5 zonas de voladura, el cual se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 3

Zonas de voladuras

	Unid.	OXIDO	SULFURO	SULFURO	DESMONTE	DESMONTE
Diámetro de Taladro	In	10 5/8	10 5/8	10 5/8	10 5/8	10 5/8
Zona	Código	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5
Ratio de Penetración	m/h	39.00	37.00	37.00	42.00	42.00

Fuente: Área de planeamiento mina

Estas zonas se definen en función al dominio litológico, mineralización y destino final del bloque. En la Tabla 4 se muestra el detalle de las zonas de voladura.

Tabla 4*Definición de zonas de voladura*

ZONA DE VOLADURA	MINERALIZACIÓN	DOM. LITOLOGICO
Zona 1	OXIDO MINERAL	VOLCANO
	OXIDO MINERAL	HIDROTHERMAL
	OXIDO MINERAL	ACOITA
Zona 2	SULFURO MINERAL	VOLCANO
	SULFURO MINERAL	ACOITA
Zona 3	SULFURO MINERAL	HIDROTHERMAL
Zona 4	OXIDO ESTERIL	VOLCANO
	OXIDO ESTERIL	HIDROTHERMAL
	SULFURO ESTERIL	ACOITA
Zona 5	SULFURO ESTERIL	VOLCANO
	SULFURO ESTERIL	HIDROTHERMAL
	OXIDO ESTERIL	ACOITA

Fuente: Área de planeamiento mina

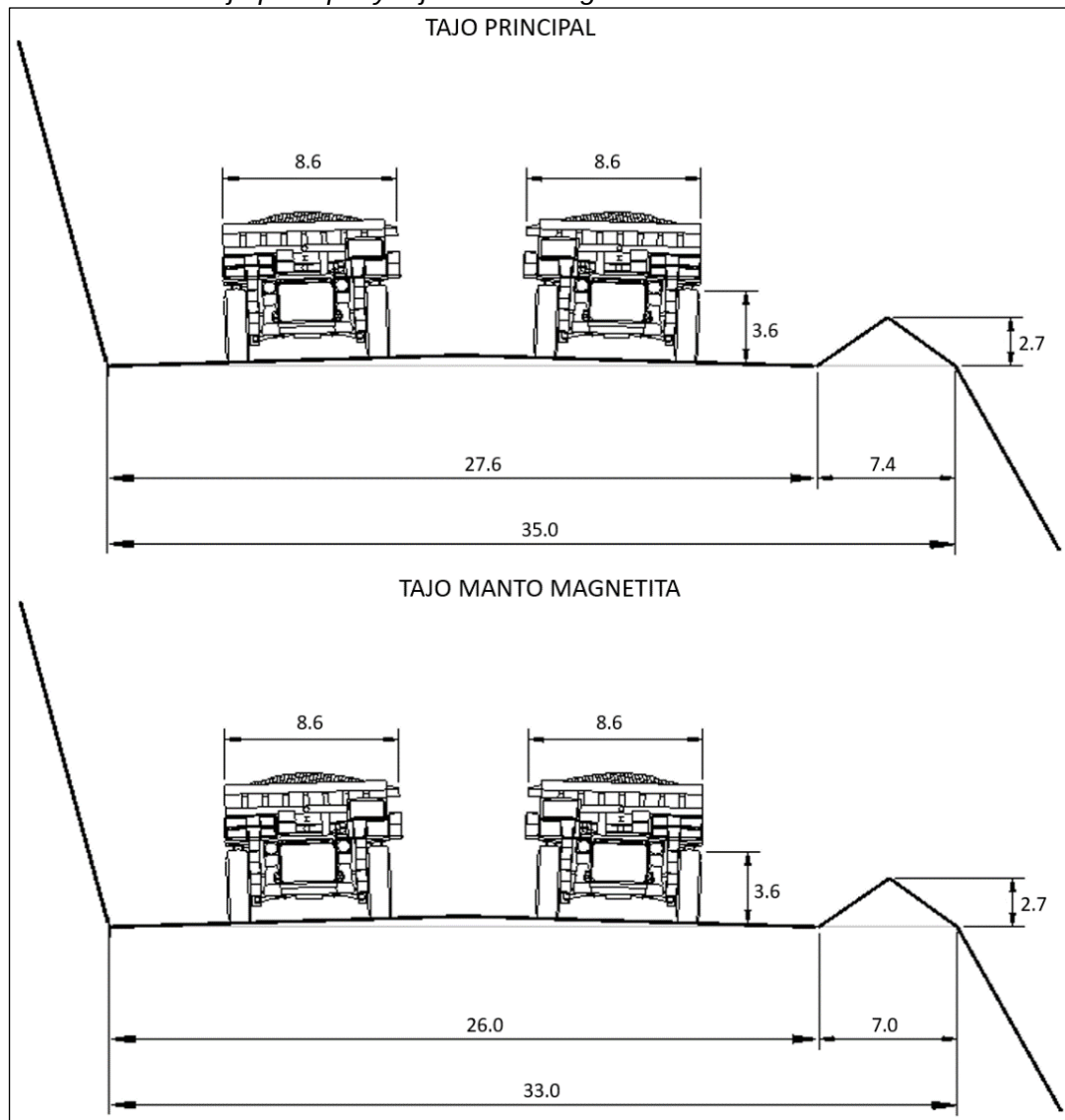
En el proceso de voladura se usa el Quantex 73 que es una mezcla explosiva compuesta de un 70% de emulsión gasificable, potenciada con un 30% de nitrato de amonio (ANFO), a la cual posteriormente se agrega una solución gasificante que le brinda la sensibilidad requerida y densidad deseada de acuerdo con el diseño de la voladura. La mezcla explosiva Quantex 73 está especialmente diseñada para rocas duras. Como detonadores, se usa los detonadores electrónicos i-Kon que son los más avanzados del mercado y son particularmente apropiados para voladuras complejas. Para las voladuras de pre-corte se usan la emulsión encartuchada Senatel Power Split, también producido por Orica.

3.1.2.2 Carguío y transporte. La actividad de carguío en la unidad minera se da principalmente con 3 palas electrohidráulicas Hitachi EX 5600 permanentemente ubicadas en el tajo, con una capacidad de cucharón de 55t, además las operaciones de carguío de material y alimentación de las chancadoras primarias se realiza con dos de los tres cargadores CAT 994K, cuya capacidad de balde es de 28 t, y teniendo el tercero disponible para dar soporte al minado en la mina, brindando mayor flexibilidad para tareas particulares además de la producción.

El transporte de material se realiza con camiones CAT 793D de 233 t. Para el tránsito en las vías de acarreo de doble sentido en tajo principal, se consideró un ancho de vía de 35 metros y un ancho de 33 metros para las vías de acarreo de doble sentido en el tajo manto magnetita, como se aprecia en la figura 6. Las gradientes de rampa están limitadas a 12% como máximo en el eje central pudiendo variar conforme la medición se distancia del mismo. El diseño de las vías de acarreo en superficie considera 1 berma para cada carril con un ancho total de vía de 41 m., como se aprecia en la figura 7.

Figura 6

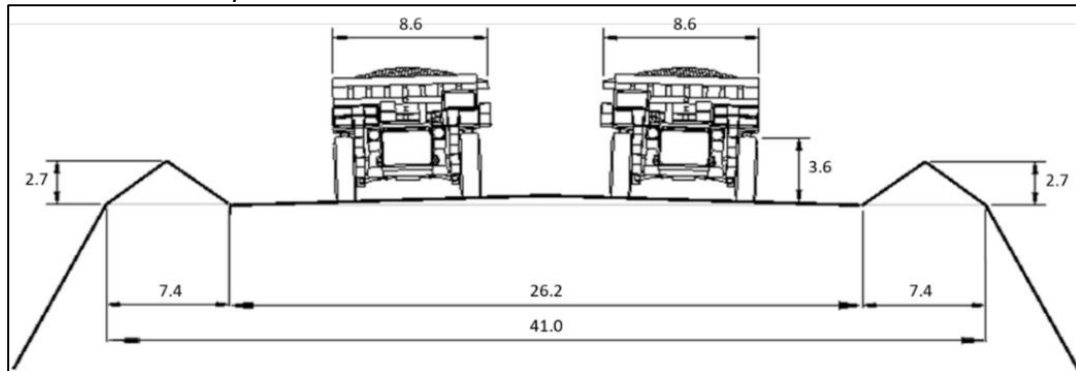
Vía de acarreo en tajo principal y tajo manto magnetita



Fuente: Área de operaciones mina

Figura 7

Vía de acarreo en superficie



Fuente: Área de operaciones mina

3.1.3 Diseño de mina

Las reservas minerales serán extraídas a través de 12 fases de minado con las siguientes características:

- Las fases 3, 4, 5, 10 y 12 están ubicadas en la zona central conocida como “Tajo Principal”. Estas contienen cantidades significativas de mineral de óxido, pero el principal motivo de esta secuencia de extracción es la exposición del mineral de sulfuro en profundidad.
- Las fases 6 y 7 prácticamente contienen solo mineral de óxido. La fase 06 es completamente independiente de otras fases, mientras que la fase 07 se programa luego del minado de la fase 04. Ambas fases pertenecen al área conocida como “Óxidos Norte”
- La fase 09 corresponde al sector Manto Magnetita. Esta fase es independiente del resto de la secuencia y se puede extraer siempre que agregue el mayor valor.
- Las fases 8 y 11 extraen el sector conocido como “Cobre 40”. Estas fases están limitadas al sur por el área de la concesión minera.

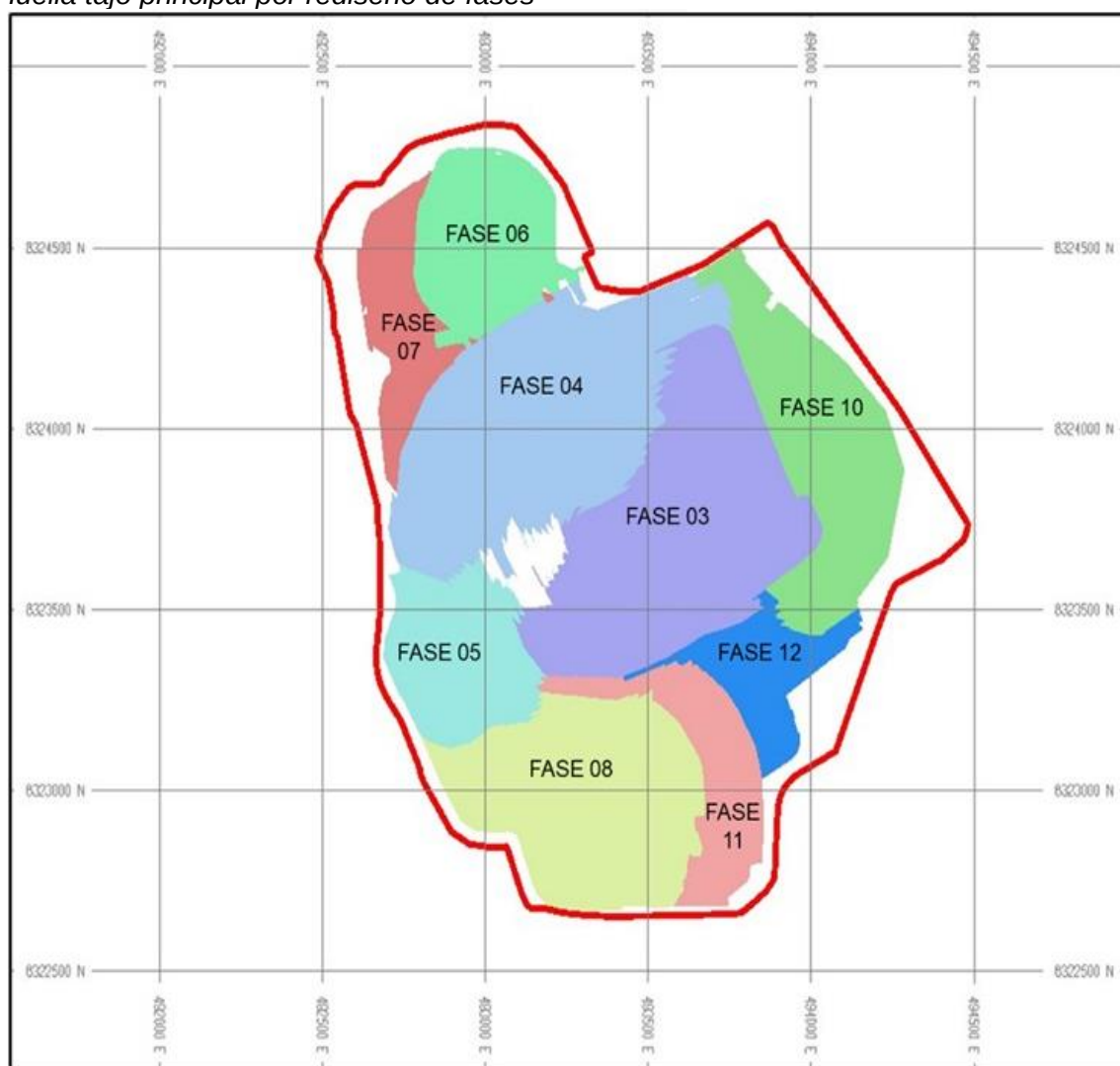
El diseño de fases se realiza en base a un plan con una alimentación a plantas del orden de 6.8 millones de toneladas por año de sulfuros y de 12 millones de toneladas por año de óxidos, con un minado total máximo de aproximadamente de 85 millones de toneladas por año, distribuido en varios frentes.

Se consideró el uso de camiones de 233 toneladas métricas de capacidad, cargados por palas electrohidráulicas y cargadores frontales.

El límite del tajo final está dado simplemente por la sumatoria de las fases extraídas resultado del proceso de optimización descrito previamente siguiendo recomendaciones geotécnicas, resultados de optimización de macro secuencia de minado, capacidades de mina y planta, condiciones comerciales, entre otros. Esta huella considera un área de 281 ha.

Figura 8

Huella tajo principal por rediseño de fases



Fuente: Área de planeamiento mina

3.1.3.1 Tonelaje in situ. La Tabla 5 presenta los recursos in situ contenidos dentro de las fases diseñadas. Estos se encuentran separados de acuerdo con el proceso donde

generen un mayor beneficio sin considerar el costo de minado. Cuando el beneficio sea menor a la ley de corte los bloques son considerados sin valor económico, por tanto, son enviados al depósito de desmonte. Solo aquellos bloques categorizados como medidos o indicados son asignados a un proceso, los demás son considerados estéril.

Tabla 5

Tonelaje de mineral y desmonte por fase

FASES	ÓXIDOS (Mt)	SULFUROS (Mt)	DESMONTE (Mt)	TOTAL (Mt)
3	2.2	17.2	29.2	48.6
4	15.1	12.7	61.3	89.1
5	11.0	0.2	21.2	32.4
6	7.4	0.0	25.2	32.6
7	25.1	0.3	45.7	71.1
8	9.0	5.8	81.6	96.3
9	5.1	0.1	29.1	34.2
10	1.7	16.2	118.9	136.8
11	2.1	4.2	65.5	71.7
12	8.6	19.5	113.3	141.4
Total	87.3	76.2	590.9	754.4

Fuente: Área de planeamiento mina

3.1.3.2 Extracción mina. A partir del 2024 son extraídas de la mina un total de 754 Mt durante 11 años de operación.

Estas se dividen en 5901 Mt de estéril, 87 Mt de óxidos y 76 Mt de sulfuros. La máxima extracción corresponde a 85 Mt, la cual se requiere del 2026 al 2029, posteriormente la capacidad de minado disminuye conforme se produce el agotamiento de las reservas en el tajo.

En la Tabla 6 se muestra las toneladas y leyes del plan de extracción detallado por periodo; asimismo, en la figura 9 se muestra la producción mina total y la relación estéril/mineral (REM) por periodo, la cual alcanza 6.9 en el año 2030 en su máximo nivel.

Tabla 6

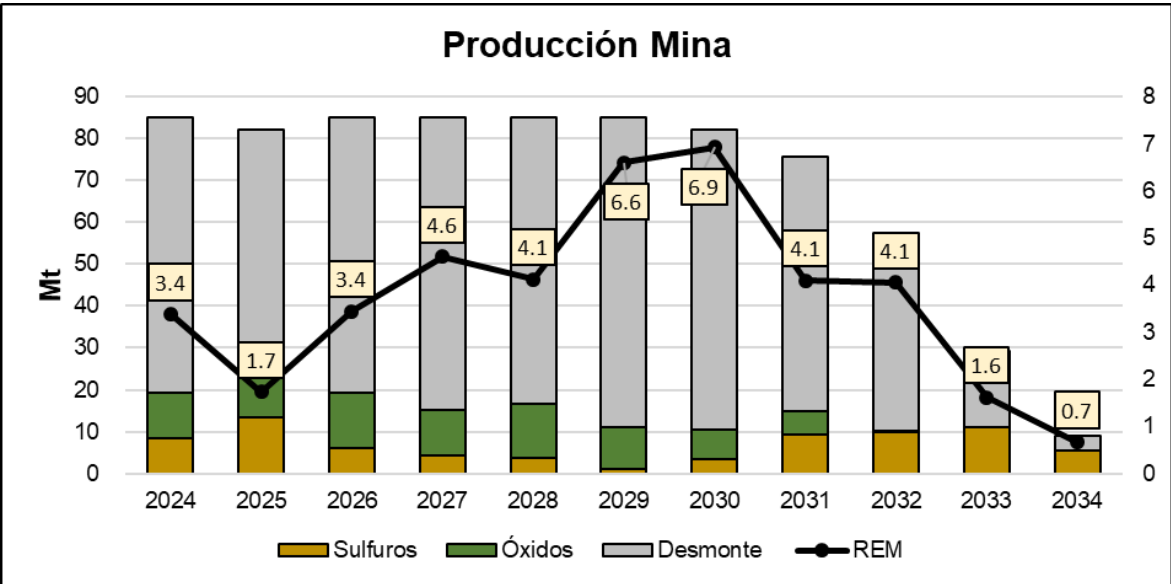
Plan anual de extracción mina

PERIODO	ÓXIDOS			SULFUROS		DESMONTE	TOTAL
	Kt	Cut (%)	Cuas (%)	Kt	Cut (%)	Kt	Kt
2024	11.0	0.45	0.38	8.4	0.86	65.6	85.0
2025	16.6	0.58	0.46	13.5	1.08	52.1	82.2
2026	13.1	0.68	0.58	6.0	0.97	65.9	85.0
2027	10.7	0.53	0.43	4.4	0.90	69.8	85.0
2028	12.9	0.54	0.46	3.7	0.74	68.4	85.0
2029	10.2	0.55	0.47	1.0	0.73	73.8	85.0
2030	6.9	0.43	0.34	3.5	1.12	71.7	82.0
2031	5.7	0.41	0.32	9.2	0.48	60.9	75.8
2032	0.2	0.30	0.23	9.9	0.65	41.0	51.1
2033	0.0			11.2	0.56	18.0	29.2
2034	0.0			5.5	0.81	3.6	9.1
Total	87.3	0.54	0.45	76.2	0.79	590.9	754.4

Fuente: Área de planeamiento mina

Figura 9

Producción mina

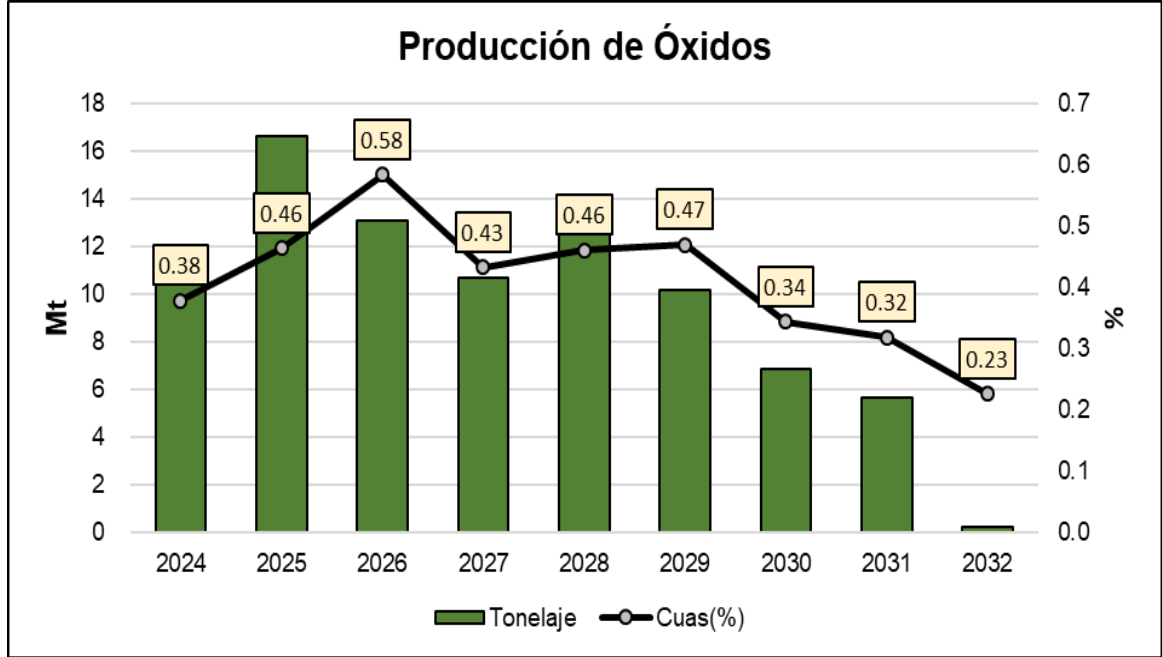


Fuente: Área de planeamiento mina

La figura 10 muestra el mineral de óxidos extraído con su ley promedio de cobre soluble, la cual se mantiene en un rango de 0.23% a 0.58%.

Figura 10

Producción de óxidos

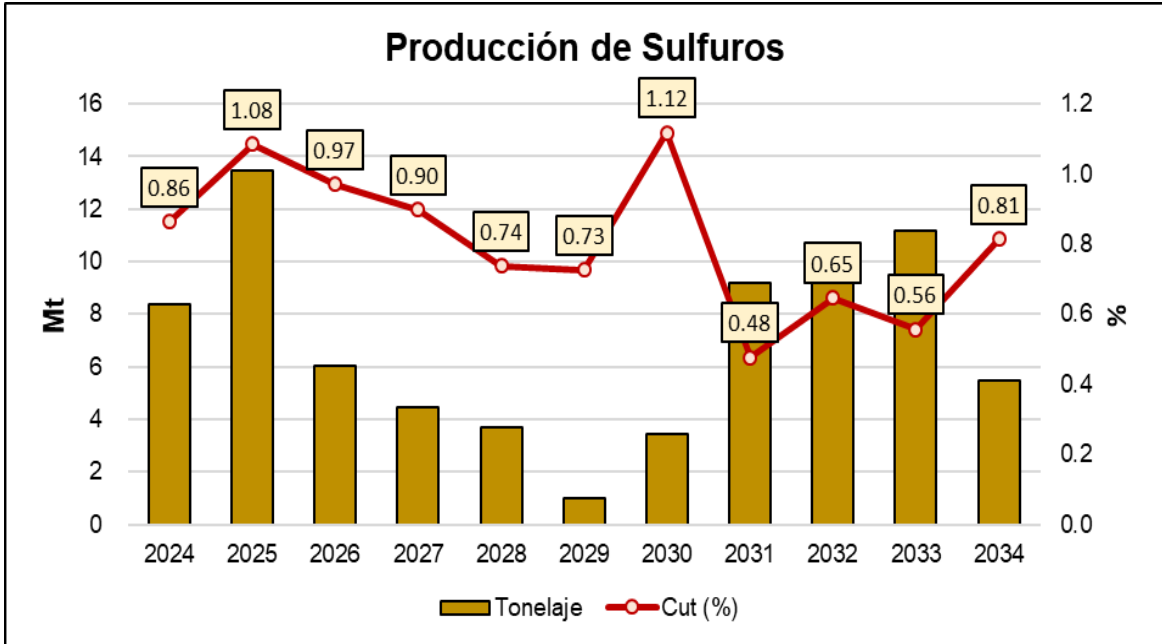


Fuente: Área de planeamiento mina

La figura 11 muestra la extracción de mineral de sulfuros con la ley promedio de cobre total, se observa un comportamiento decreciente en la ley debido al agotamiento de las reservas conforme avanza el minado de las fases.

Figura 11

Producción de sulfuros



Fuente: Área de planeamiento mina

Asimismo, en la Tabla 7 se presenta el plan de producción mina asociado a la secuencia de minado de las fases. Se observa un máximo número de 5 fases activas por periodo limitadas a una capacidad de extracción máxima de 85 Mt/a.

Tabla 7

Plan de producción por fase

Periodo	Fase 3	Fase 4	Fase 5	Fase 6	Fase 7	Fase 8	Fase 9	Fase 10	Fase 11	Fase 12	Total
2024	35.1	40	10								85
2025	13	30	17	8			13				82
2026		13	5	23		23	20				85
2027		5		1	17	60	1				85
2028					32	13		8	33		85
2029					19			38	29		85
2030					4			50	11	18	82
2031								31		45	76
2032								11		40	51
2033								0		29	29
2034										9	9
Total	49	89	32	33	71	96	34	137	72	141	754

Fuente: Área de planeamiento mina

3.1.3.3 Movimiento de material. El movimiento de material de la operación está conformado por los siguientes flujos:

- Mineral directo de mina a plantas
- Mineral de mina a acopios
- Mineral de acopio a plantas
- Estéril a depósitos de desmonte
- Ripios a depósito de ripios

El tonelaje de cada flujo está programado según los objetivos de cumplimiento en tonelaje y ley requeridos por los procesos y las restricciones propias de la operación. Los flujos de material del inciso “a” hasta la “d” corresponden al movimiento del material fresco que se extrajo del tajo, el inciso “e” corresponde al movimiento del mineral que fue procesado en la planta de óxidos (ripio) para su disposición final en el depósito de ripios.

3.1.3.3.1 Alimentación a planta. A partir del 2024 se alimentan 143.3 Mt a la Planta de óxidos para producir 518 Kt de cobre en cátodos a lo largo de 12 años de operación, de estos hasta el 2027 se produce por encima de 55 Kt de cobre fino en cátodos luego de lo cual la producción cae debido a una disminución en la ley de alimentación.

Tabla 8

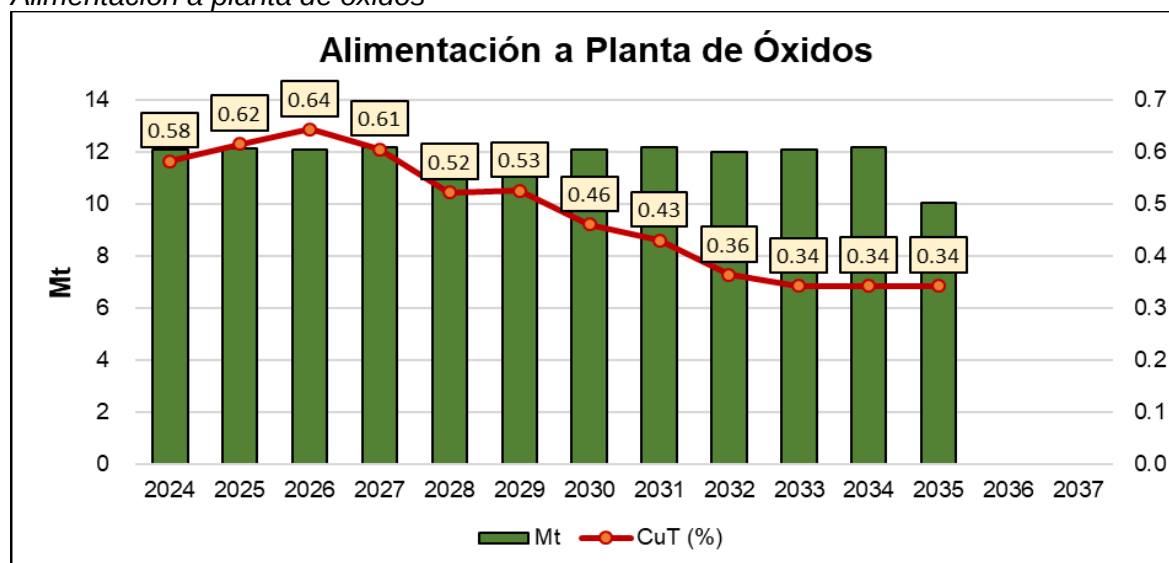
Alimentación a planta

PERIODO	ÓXIDOS				SULFUROS			TOTAL
	Kt	CuT (%)	CuAS (%)	Cobre Fino (tmf)	Kt	CuT (%)	Cobre Fino (tmf)	Cobre Fino (tmf)
2024	12.1	0.58	0.50	54,255	6.6	1.28	74,401	128,657
2025	12.1	0.62	0.51	56,030	6.7	1.67	101,610	157,640
2026	12.1	0.64	0.53	57,989	6.6	1.05	59,656	117,645
2027	12.2	0.61	0.52	56,785	6.5	0.81	45,249	102,034
2028	12.0	0.52	0.43	46,477	6.5	0.63	33,571	80,048
2029	12.2	0.53	0.45	49,383	6.4	0.49	23,666	73,049
2030	12.1	0.46	0.38	41,856	6.7	0.85	40,860	82,716
2031	12.2	0.43	0.35	38,700	6.3	0.55	30,357	69,058
2032	12.0	0.36	0.29	31,039	6.5	0.83	48,387	79,426
2033	12.1	0.34	0.27	29,908	6.4	0.76	43,647	73,555
2034	12.2	0.34	0.27	30,269	6.5	0.78	42,807	73,076
2035	10.0	0.34	0.27	24,886	6.1	0.31	15,113	40,000
2036					6.3	0.36	14,428	14,428
2037					1.1	0.40	2,497	2,497
Total	143.4	0.48	0.40	517,579	85.3	0.77	576,248	1,093,827

Fuente: Área de planeamiento mina

Figura 12

Alimentación a planta de óxidos



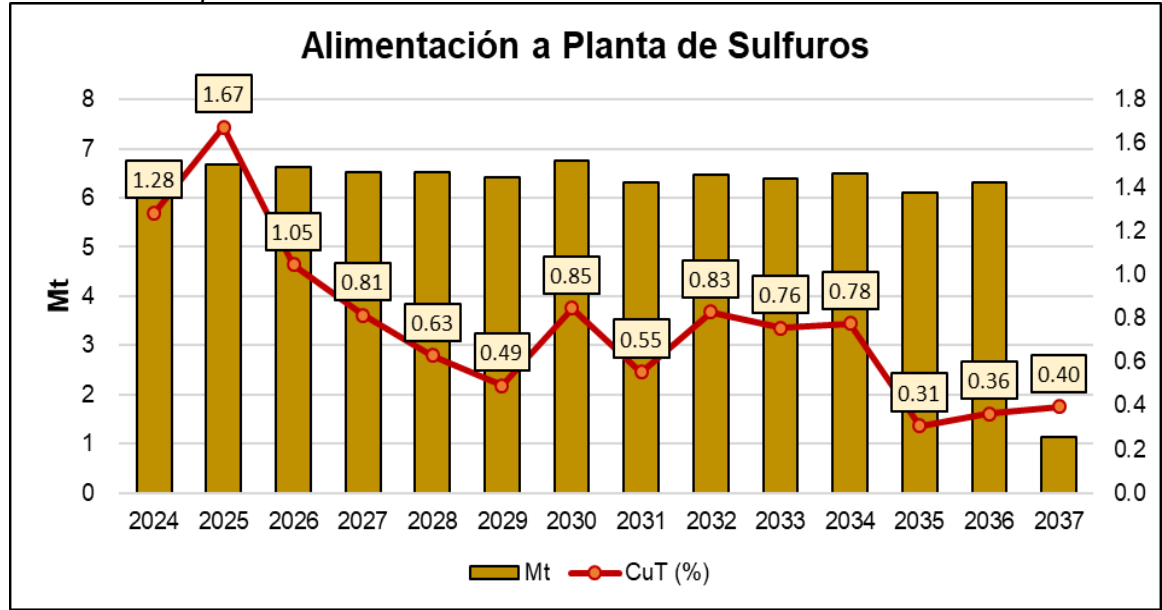
Fuente: Área de planeamiento mina

A partir del 2024, la Planta de sulfuros produce 576 Kt de cobre fino contenido en concentrados producto de procesar 85 Mt de mineral en 13 años de operación.

Respecto a la producción total de cobre fino, el 53% del cobre producido corresponde al proceso de sulfuros y el 47% restante al proceso de óxidos. En la figura 14 se muestran los valores de producción de cobre de ambas Plantas.

Figura 13

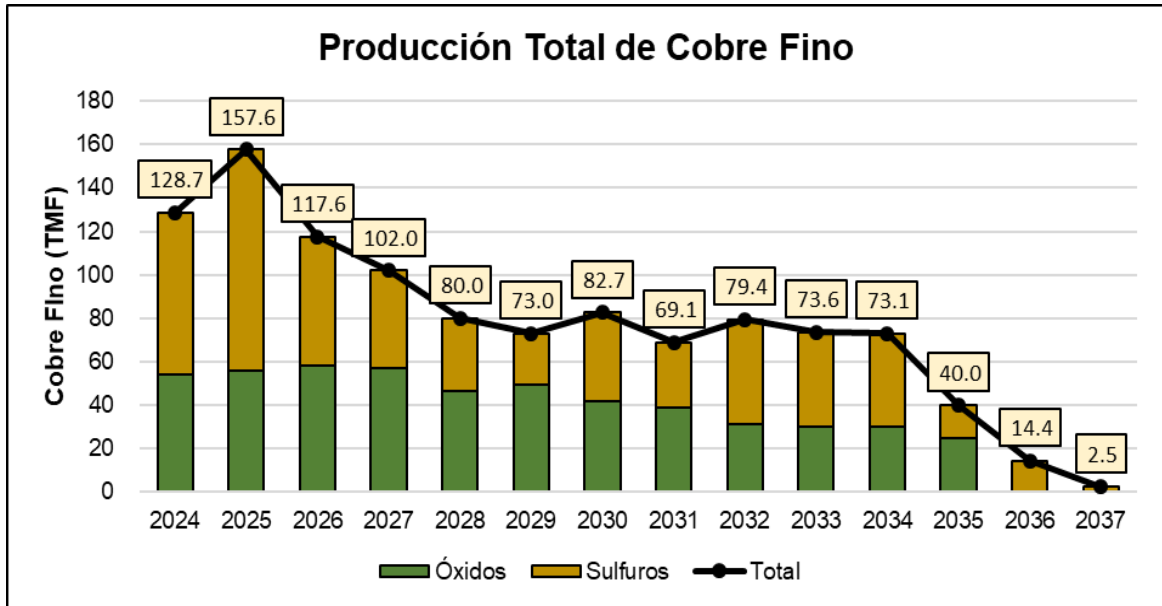
Alimentación a planta de sulfuros



Fuente: Área de planeamiento mina

Figura 14

Producción de cobre fino total

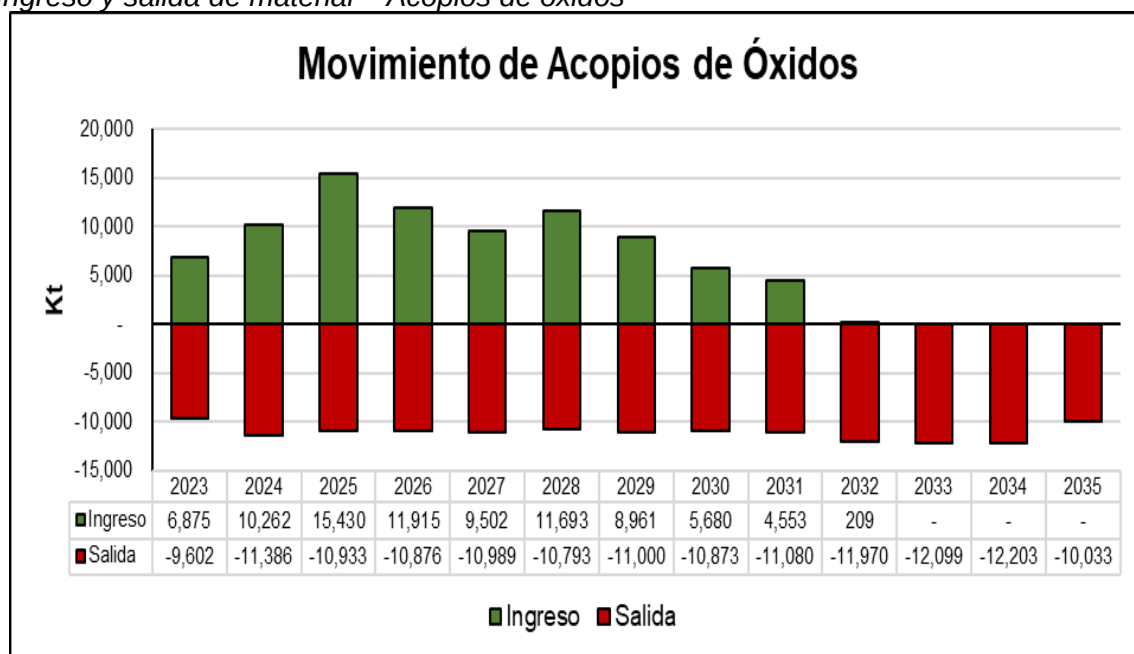


Fuente: Área de planeamiento mina

3.1.3.3.2 Manejo de acopios. En la figura 15 se presenta el flujo de ingreso y salida de los acopios de óxidos en base a lo requerido para alcanzar los objetivos de alimentación al proceso de lixiviación en términos de tonelaje, ley de cabeza y ley máxima de alimentación. Se observa que en cada periodo hay ingreso y salida simultánea de todos los tipos de stock, lo cual demuestra la necesidad de manejar plataformas de acopio dinámicas en el tiempo. Asimismo, se observa que a partir del 2032 ya no se produce ingreso a los acopios debido al agotamiento de las reservas de óxidos en el tajo.

Figura 15

Ingreso y salida de material – Acopios de óxidos



Fuente: Área de planeamiento mina

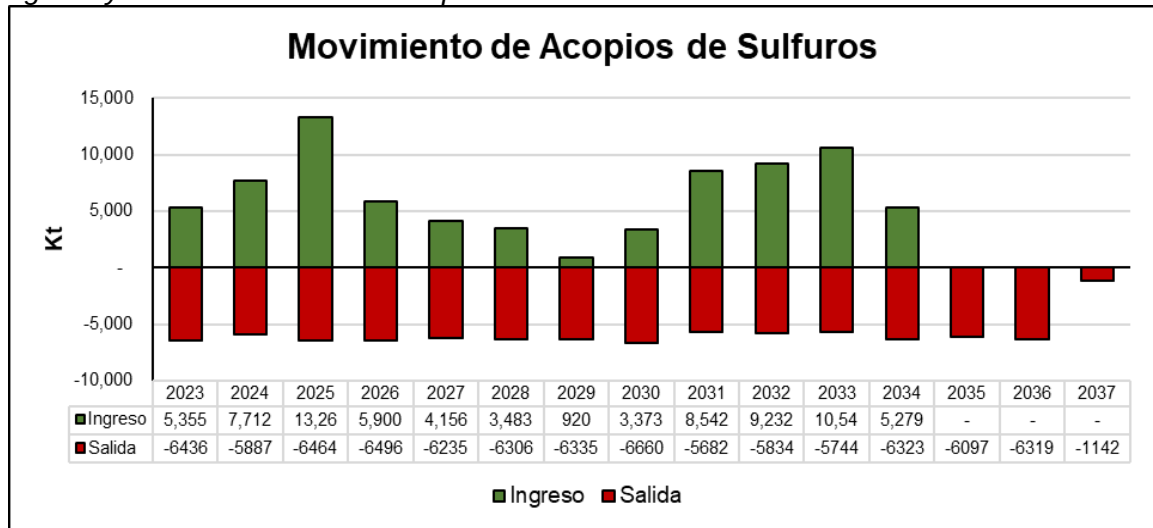
De manera similar, en la figura 16 se muestra el ingreso y salida de material de los acopios de sulfuros.

Se observa el mismo comportamiento dinámico de los acopios de óxidos con ingreso y salidas simultáneas.

En este caso a partir del 2035 se muestra solo salida de los acopios dado el agotamiento de las reservas de sulfuros en el tajo desde este año.

Figura 16

Ingreso y salida de material – Acopios de sulfuros



Fuente: Área de planeamiento mina

3.2 Procesamiento de la información

3.2.1 Modelo por regresión (inicial)

El modelo inicial utilizado para estimar el consumo planificado de combustible en camiones CAT 793 se basaba en una regresión lineal múltiple. Este modelo permitía proyectar el requerimiento de combustible en función de diversas variables operativas, mediante una ecuación matemática de la siguiente forma:

$$\text{Numero de Galones} = C_0 - C_1 * (\text{ciclos}) + C_2 * (\text{hras ready}) + C_3 * (\text{hras delay}) + C_4 * (\text{EFH cargado}) - C_5 * (\text{EFH vacío}) \quad (4)$$

Los coeficientes se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 9

Coeficientes para modelo por regresión

PARÁMETROS	COEFICIENTES REGRESIÓN LINEAL
C_0	14,239
C_1 : ciclos	-2.77
C_2 : horas ready	5.71
C_3 : horas Delay	28.50
C_4 : EFH cargado	3.33
C_5 : EFH vacío	-0.18

Fuente: Elaboración propia

Para poder determinar los parámetros necesarios para aplicarlos en la ecuación (4), se requiere información de los indicadores de productividad de los camiones, distancias recorridas y la eficiencia del transporte. Donde se aplican las siguientes ecuaciones para determinarlos.

$$\#ciclos = 1000 * toneladas movidas (kton)/payload nominal (ton) \quad (5)$$

$$hras ready = horas horometro (hrs) * utilizacion \quad (6)$$

$$hras delay = horas horometro (hrs) * (1 - utilizacion) \quad (7)$$

$$EFH cargado = \#ciclos * Km - eq cargado \quad (8)$$

$$EFH vacio = \#ciclos * Km - eq vacio \quad (9)$$

En las siguientes tablas y figuras se muestran el cálculo de parámetros necesarios para determinar la estimación de consumo de combustible de camiones CAT 793, durante el periodos enero 2021 – junio 2024.

Tabla 10

Indicadores de productividad – 2021

INDICADORES	UND	21-m1	21-m2	21-m3	21-m4	21-m5	21-m6	21-m7	21-m8	21-m9	21-m10	21-m11	21-m12
PRODUCTIVIDAD TRANSPORTE													
Toneladas movidas	Kt	5,128	5,240	8,029	7,809	8,131	8,088	8,290	7,869	8,112	8,050	8,634	7,607
Horas horómetro	horas	8,742	8,849	13,380	13,954	14,673	14,439	14,964	15,020	14,929	15,401	15,603	14,943
Productividad Transporte	tph	629	639	648	614	604	615	601	562	581	559	595	545
DISTANCIAS													
Distancia Cargado	Km	2.70	2.83	2.55	2.61	2.38	2.32	2.38	2.43	2.46	2.58	2.68	2.84
Distancia Vacío	Km	2.78	2.76	2.54	2.57	2.40	2.36	2.41	2.46	2.51	2.57	2.69	2.81
EFH Cargado	Km-eq	4.30	3.92	3.81	4.13	4.13	4.06	4.22	4.47	4.40	4.46	4.31	4.98
EFH Vacío	Km-eq	4.13	4.34	4.11	4.33	4.42	4.20	4.43	4.61	4.36	4.74	4.31	4.53
EFICIENCIA TRANSPORTE													
Eficiencia Transporte Cargado (TKPH)	tkph	4,787	5,372	5,044	4,690	4,191	4,217	4,172	4,081	4,206	4,347	4,584	4,204
Eficiencia Transporte Vacío (TKPH)	tkph	6,805	6,590	6,482	6,455	6,136	6,274	6,203	5,959	6,202	6,131	6,472	6,483

Fuente: Elaboración propia

Tabla 11*Parámetros para el cálculo – 2021*

PARAMETROS	21-m1	21-m2	21-m3	21-m4	21-m5	21-m6	21-m7	21-m8	21-m9	21-m10	21-m11	21-m12
Uso (Efecto por Demoras)	0.94	0.94	0.93	0.92	0.92	0.92	0.92	0.94	0.94	0.94	0.93	0.94
Payload Nominal	234	234	234	234	234	234	234	234	234	234	234	234
Ciclos = Tonelaje/Payload Nominal	21914	22394	34313	33371	34746	34563	35427	33628	34669	34400	36896	32509
Ready	8,242	8,318	12,427	12,772	13,498	13,220	13,832	14,050	13,991	14,438	14,578	13,993
Delay	500	532	953	1,182	1,175	1,219	1,133	970	938	962	1,025	950
EFH Cargado	94,159	87,711	130,572	137,789	143,643	140,381	149,370	150,262	152,425	153,344	159,186	161,999
EFH Vacio	90,429	97,180	140,943	144,474	153,591	145,230	157,110	154,963	151,253	163,009	159,072	147,236

Fuente: Elaboración propia

Tabla 12*Cálculo de consumo de combustible – 2021*

RESULTADOS	21-m1	21-m2	21-m3	21-m4	21-m5	21-m6	21-m7	21-m8	21-m9	21-m10	21-m11	21-m12
Galones Modelo	311,834	289,172	426,345	460,834	478,808	469,619	496,039	500,973	504,710	509,646	525,468	543,637
Gal/hr Modelo	35.67	32.68	31.87	33.03	32.63	32.52	33.15	33.35	33.81	33.09	33.68	36.38
Galones Real	343,299	320,632	456,129	490,142	504,558	505,366	534,961	532,791	551,453	546,344	558,181	576,674
Gal/hr Real	39.27	36.23	34.09	35.13	34.39	35.00	35.75	35.47	36.94	35.48	35.77	38.59
Real - Calculo Modelo	3.6	3.6	2.2	2.1	1.8	2.5	2.6	2.1	3.1	2.4	2.1	2.2

Fuente: Elaboración propia

Tabla 13

Indicadores de productividad – 2022

INDICADORES	UND	22-m1	22-m2	22-m3	22-m4	22-m5	22-m6	22-m7	22-m8	22-m9	22-m10	22-m11	22-m12
PRODUCTIVIDAD TRANSPORTE													
Toneladas movidas	Kt	7,676	7,677	9,292	9,352	9,382	8,714	9,131	8,553	8,388	8,727	8,537	8,082
Horas horómetro	horas	14,257	14,059	16,217	16,558	16,943	15,589	16,634	16,533	16,170	16,910	16,023	14,748
Productividad Transporte	tph	576	583	613	601	591	601	595	561	556	553	573	589
DISTANCIAS													
Distancia Cargado	Km	2.78	2.72	2.73	2.83	2.70	2.62	2.64	2.76	2.69	2.85	2.59	2.46
Distancia Vacío	Km	2.77	2.75	2.66	2.85	2.78	2.63	2.70	2.83	2.74	2.86	2.63	2.55
EFH Cargado	Km-eq	4.53	4.50	4.15	4.43	4.51	3.73	3.92	4.26	4.45	4.49	4.19	4.03
EFH Vacío	Km-eq	4.25	4.19	3.99	4.26	4.30	4.02	4.03	4.28	4.37	4.42	4.16	4.10
EFICIENCIA TRANSPORTE													
Eficiencia Transporte Cargado (TKPH)	tkph	4,540	4,519	5,061	4,998	4,802	5,421	5,268	4,969	4,526	4,745	4,563	4,552
Eficiencia Transporte Vacío (TKPH)	tkph	6,761	6,862	6,985	6,930	6,781	6,838	6,849	6,658	6,470	6,706	6,595	6,662

Fuente: Elaboración propia

Tabla 14*Parámetros para el cálculo – 2022*

PARAMETROS	22-m1	22-m2	22-m3	22-m4	22-m5	22-m6	22-m7	22-m8	22-m9	22-m10	22-m11	22-m12
Uso (Efecto por Demoras)	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.93	0.93	0.93	0.94	0.94	0.93	0.94
Payload Nominal	234	234	234	234	234	234	234	234	234	234	234	234
Ciclos = Tonelaje/Payload Nominal	32802	32808	39708	39966	40093	37241	39022	36552	35848	37294	36484	34538
Ready	13,385	13,223	15,232	15,599	15,920	14,559	15,432	15,351	15,135	15,872	14,977	13,804
Delay	872	836	986	959	1,023	1,031	1,202	1,182	1,034	1,038	1,046	945
EFH Cargado	148,446	147,487	164,916	177,114	180,779	139,032	152,795	155,843	159,675	167,518	152,722	139,331
EFH Vacío	139,303	137,552	158,498	170,276	172,392	149,809	157,286	156,577	156,665	164,908	151,652	141,458

Fuente: Elaboración propia

Tabla 15*Cálculo de consumo de combustible – 2022*

RESULTADOS	22-m1	22-m2	22-m3	22-m4	22-m5	22-m6	22-m7	22-m8	22-m9	22-m10	22-m11	22-m12
Galones Modelo	493,466	488,603	539,445	578,536	593,657	459,168	508,551	524,622	533,880	558,796	509,302	462,393
Gal/hr Modelo	34.61	34.75	33.26	34.94	35.04	29.45	30.57	31.73	33.02	33.05	31.79	31.35
Galones Real	521,230	523,174	576,469	610,417	631,314	498,171	545,031	556,844	564,425	586,579	536,223	500,381
Gal/hr Real	36.56	37.21	35.55	36.87	37.26	31.96	32.77	33.68	34.91	34.69	33.47	33.93
Real - Calculo Modelo	1.9	2.5	2.3	1.9	2.2	2.5	2.2	1.9	1.9	1.6	1.7	2.6

Fuente: Elaboración propia

Tabla 16

Indicadores de productividad – 2023

INDICADORES	UND	23-m1	23-m2	23-m3	23-m4	23-m5	23-m6	23-m7	23-m8	23-m9	23-m10	23-m11	23-m12
PRODUCTIVIDAD TRANSPORTE													
Toneladas movidas	Kt	7,340	7,822	8,719	8,612	9,089	9,053	9,567	9,596	9,459	9,926	9,889	9,669
Horas horómetro	horas	13,656	15,099	17,202	16,824	17,190	16,960	17,501	17,671	17,741	18,363	17,812	17,613
Productividad Transporte	tph	580	559	544	549	566	573	584	584	578	583	600	591
DISTANCIAS													
Distancia Cargado	Km	2.46	2.62	2.64	2.71	2.49	2.56	2.63	2.89	2.85	2.89	2.83	2.83
Distancia Vacío	Km	2.53	2.73	2.77	2.80	2.59	2.65	2.66	2.90	2.94	3.02	2.96	2.90
EFH Cargado	Km-eq	4.06	4.43	4.47	4.54	4.21	4.20	4.04	4.16	4.03	4.12	4.21	4.14
EFH Vacío	Km-eq	4.06	4.28	4.25	4.36	4.24	4.20	4.01	3.61	3.57	3.78	3.65	3.62
EFICIENCIA TRANSPORTE													
Eficiencia Transporte Cargado (TKPH)	tkph	4,462	4,409	4,263	4,402	4,304	4,456	4,807	5,238	5,213	5,202	5,016	5,111
Eficiencia Transporte Vacío (TKPH)	tkph	6,535	6,629	6,511	6,522	6,213	6,402	6,452	6,861	6,981	7,007	7,109	7,138

Fuente: Elaboración propia

Tabla 17

Parámetros para el cálculo – 2023

PARAMETROS	23-m1	23-m2	23-m3	23-m4	23-m5	23-m6	23-m7	23-m8	23-m9	23-m10	23-m11	23-m12
Uso (Efecto por Demoras)	0.94	0.93	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.93	0.93	0.93	0.93
Payload Nominal	234	234	234	234	234	234	234	234	234	234	234	234
Ciclos = Tonelaje/Payload Nominal	31367	33429	37259	36802	38844	38688	40887	41007	40422	42418	42260	41321
Ready	12,808	14,091	16,127	15,817	16,109	15,940	16,450	16,552	16,467	17,076	16,544	16,411
Delay	848	1,008	1,075	1,007	1,081	1,020	1,051	1,118	1,273	1,286	1,268	1,202
EFH Cargado	127,390	148,190	166,586	167,014	163,492	162,661	165,072	170,665	162,890	174,903	178,085	171,092
EFH Vacio	127,231	143,117	158,395	160,514	164,842	162,382	163,785	148,117	144,251	160,427	154,162	149,508

Fuente: Elaboración propia

Tabla 18*Cálculo de consumo de combustible – 2023*

RESULTADOS	23-m1	23-m2	23-m3	23-m4	23-m5	23-m6	23-m7	23-m8	23-m9	23-m10	23-m11	23-m12
Galones Modelo	425,577	498,089	559,478	558,062	543,689	539,104	544,581	568,168	548,544	583,921	592,501	570,047
Gal/hr Modelo	31.16	32.99	32.52	33.17	31.63	31.79	31.12	32.15	30.92	31.80	33.26	32.36
Galones Real	454,577	525,275	624,304	589,118	567,018	565,602	590,967	607,307	604,536	645,608	640,783	632,999
Gal/hr Real	33.29	34.79	36.29	35.02	32.98	33.35	33.77	34.37	34.08	35.16	35.97	35.94
Real - Calculo Modelo	2.1	1.8	3.8	1.8	1.4	1.6	2.7	2.2	3.2	3.4	2.7	3.6

Fuente: Elaboración propia

Tabla 19*Indicadores de productividad – 2024 (junio)*

INDICADORES	UND	24-m1	24-m2	24-m3	24-m4	24-m5	24-m6
Toneladas movidas	Kt	7,340	7,822	8,719	8,612	9,089	9,053
Horas horómetro	horas	13,656	15,099	17,202	16,824	17,190	16,960
Productividad Transporte	tph	580	559	544	549	566	573
Distancia Cargado	Km	2.46	2.62	2.64	2.71	2.49	2.56
Distancia Vacío	Km	2.53	2.73	2.77	2.80	2.59	2.65
EFH Cargado	Km-eq	4.06	4.43	4.47	4.54	4.21	4.20
EFH Vacío	Km-eq	4.06	4.28	4.25	4.36	4.24	4.20
Eficiencia Transporte Cargado (TKPH)	tkph	4,462	4,409	4,263	4,402	4,304	4,456
Eficiencia Transporte Vacío (TKPH)	tkph	6,535	6,629	6,511	6,522	6,213	6,402

Fuente: Elaboración propia

Tabla 20*Parametros para el cálculo – 2024 (junio)*

PARAMETROS	24-m1	24-m2	24-m3	24-m4	24-m5	24-m6
Uso (Efecto por Demoras)	0.94	0.93	0.94	0.94	0.94	0.94
Payload Nominal	234	234	234	234	234	234
Ciclos = Tonelaje/Payload Nominal	31367	33429	37259	36802	38844	38688
Ready	12,808	14,091	16,127	15,817	16,109	15,940
Delay	848	1,008	1,075	1,007	1,081	1,020
EFH Cargado	127,390	148,190	166,586	167,014	163,492	162,661
EFH Vacío	127,231	143,117	158,395	160,514	164,842	162,382

Fuente: Elaboración propia

Tabla 21*Cálculo de consumo de combustible – 2024 (junio)*

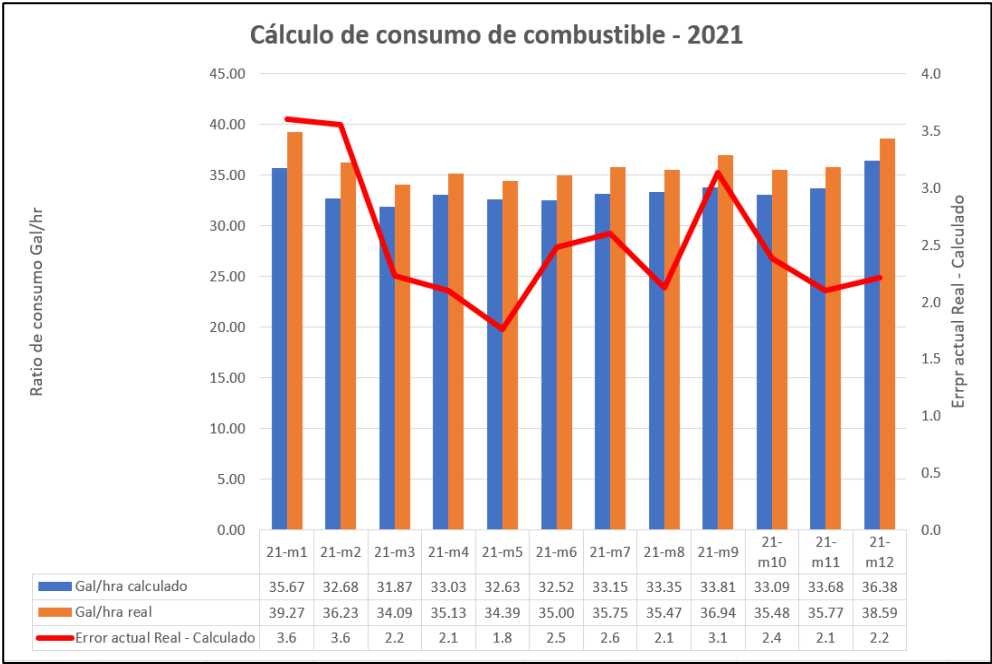
RESULTADOS	24-m1	24-m2	24-m3	24-m4	24-m5	24-m6
Galones Modelo	425,577	498,089	559,478	558,062	543,689	539,104
Gal/hr Modelo	31.16	32.99	32.52	33.17	31.63	31.79
Galones Real	454,577	525,275	624,304	589,118	567,018	565,602
Gal/hr Real	33.29	34.79	36.29	35.02	32.98	33.35
Real - Calculo Modelo	2.1	1.8	3.8	1.8	1.4	1.6

Fuente: Elaboración propia

De lo anterior mostrado se obtuvo una variación entre lo real versus lo planificado, se obtuvo un error de +2.2 Galones por hora. Este error de cálculo signifió una variación de galones totales en el año 2021 de 403,447 galones, en el año 2022 de 399,836 galones, en el año 2023 de 516,334 galones y el 2024 hasta junio de 282,664 galones .

Figura 17

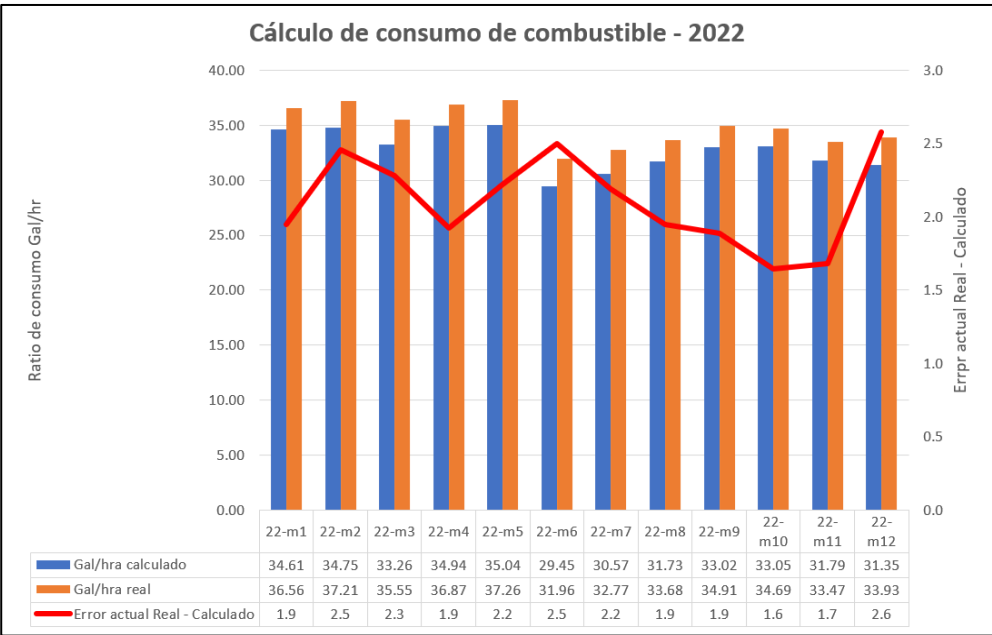
Resultados del ratio de consumo – 2021



Fuente: Elaboración propia

Figura 18

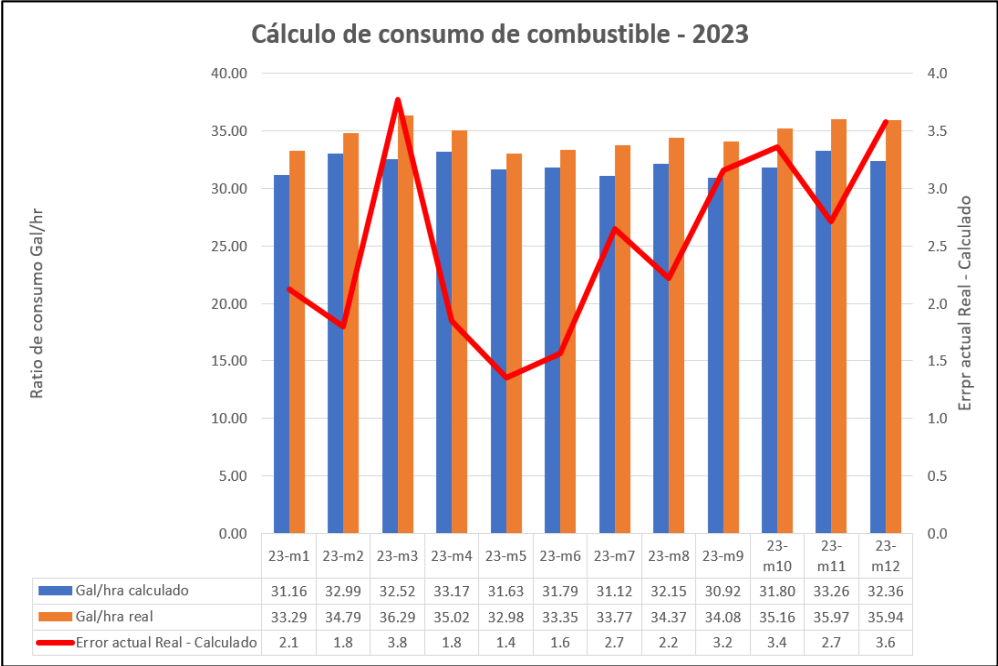
Resultados del ratio de consumo – 2022



Fuente: Elaboración propia

Figura 19

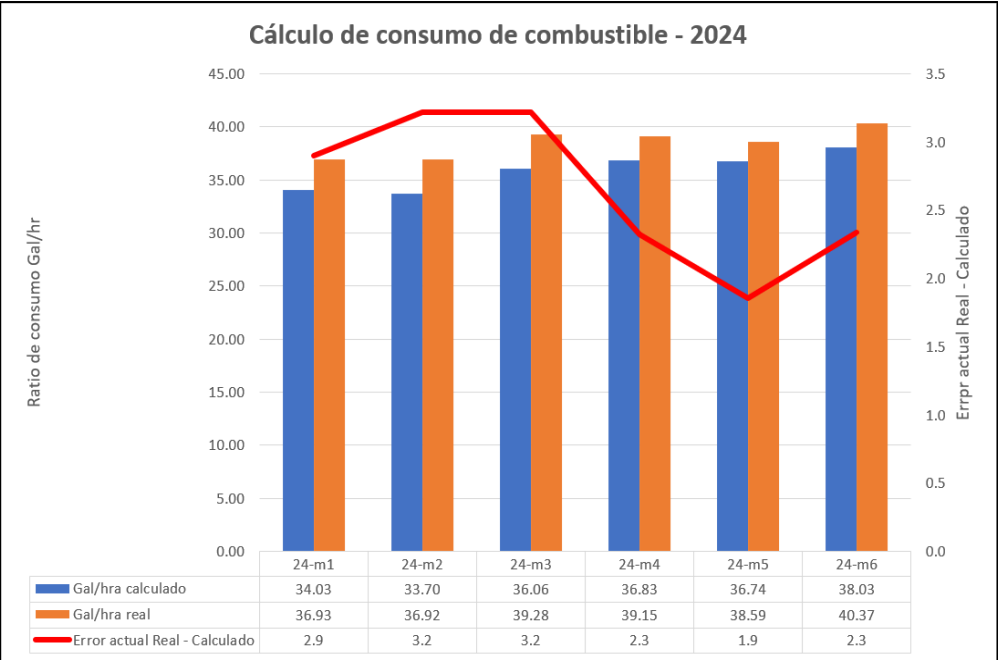
Resultados del ratio de consumo – 2023



Fuente: Elaboración propia

Figura 20

Resultados del ratio de consumo – 2024 (junio)



Fuente: Elaboración propia

3.2.2 Modelo por rutas

Para poder determinar un modelo de cálculo de consumo de combustible, se propuso un modelo por rutas de acarreo.

Este modelo contempla como parámetros de cálculo el tonelaje planificado por tipo de material acarreado, la unidad minera mueve cinco tipos de material (sulfuros, óxidos, desmonte, remanejo y ripios).

Tabla 22

Tonelaje planificado por material – 2024 (desde julio)

Material	Unidad	24m07	24m08	24m09	24m10	24m11	24m12
SULFURO	mTon	1,911	1,466	1,554	1,509	2,073	1,636
OXIDO	mTon	138	246	434	660	493	662
DESMONTE	mTon	3,995	4,921	4,334	4,276	3,537	4,071
REMANEJO	mTon	1,312	1,366	1,354	1,350	1,411	1,462
RIPIOS	mTon	964	927	986	974	1,030	1,065

Fuente: Elaboración propia

Tabla 23

Tonelaje planificado por material – 2025

MATERIAL	UNIDAD	25m01	25m02	25m03	25m04	25m05	25m06
SULFURO	mTon	1,509	1,748	691	642	722	542
OXIDO	mTon	552	506	554	287	433	566
DESMONTE	mTon	4,920	4,489	6,109	4,701	6,003	5,349
REMANEJO	mTon	1,434	1,277	1,527	1,390	1,442	1,682
RIPIOS	mTon	1,099	863	1,098	1,066	1,045	1,058
MATERIAL	UNIDAD	25m07	25m08	25m09	25m10	25m11	25m12
SULFURO	mTon	847	541	760	1,136	647	1,079
OXIDO	mTon	468	740	800	884	835	1,110
DESMONTE	mTon	3,982	5,355	5,022	4,923	5,154	4,666
REMANEJO	mTon	1,647	1,472	1,620	1,650	1,525	1,580
RIPIOS	mTon	1,100	992	1,083	1,106	999	1,122

Fuente: Elaboración propia

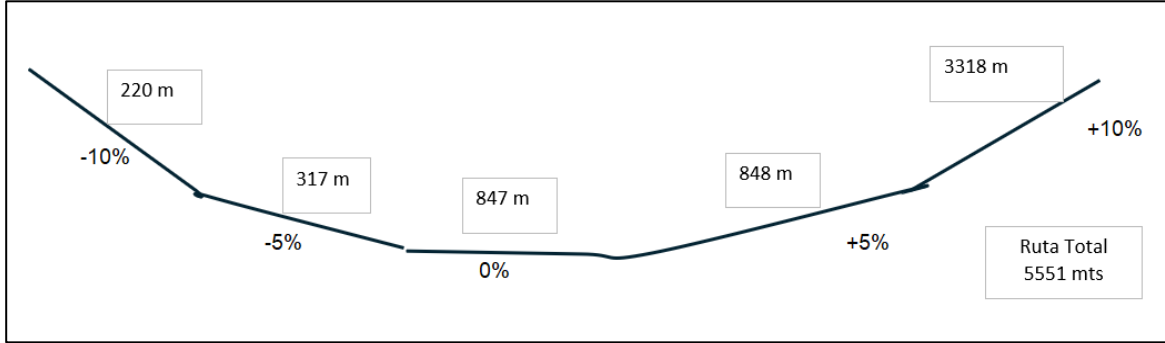
Otro factor a considerar son las distancias de acarreo por cada tipo de material y por pendiente de rampa, para este caso se consideró adecuado agrupar los grados de pendiente en cinco grupos.

- -10%: considera los tramos desde -12% hasta -8%.
- -5%: considera los tramos desde -7% hasta -3%.
- 0%: considera los tramos desde -2% hasta 2%.
- 5%: considera los tramos desde 3% hasta 7%.
- 10% considera los tramos desde 8% hasta 12%.

Esto se hace para facilitar los cálculos y evitar generar un modelo engorroso.

Figura 21

Longitud de segmento de ruta



Fuente: Elaboración propia

Similar a la figura anterior se calcula para cada material y por cada mes.

Tabla 24

Distancias por material y pendiente – 2024 (desde julio)

SULFURO	Ruta	24m07	24m08	24m09	24m10	24m11	24m12
-10%	metros	3	4	2	2	11	19
-5%	metros	218	273	270	257	347	388
0%	metros	670	866	815	900	974	968
5%	metros	959	946	879	921	875	763
10%	metros	2,693	2,863	2,704	3,001	2,828	2,882
OXIDO	Ruta	24m07	24m08	24m09	24m10	24m11	24m12
-10%	metros	-	44	-	-	-	-
-5%	metros	115	198	146	148	254	265
0%	metros	569	610	542	1,016	533	796
5%	metros	313	291	331	288	269	274
10%	metros	720	897	935	1,013	1,267	1,357
DESMONTE	Ruta	24m07	24m08	24m09	24m10	24m11	24m12
-10%	metros	184	176	118	115	74	57
-5%	metros	493	676	676	606	628	555
0%	metros	1,140	1,181	1,179	1,531	1,418	1,427
5%	metros	405	327	387	338	281	303
10%	metros	1,635	1,230	1,157	1,253	1,195	1,419
REMANEJO	Ruta	24m07	24m08	24m09	24m10	24m11	24m12
-10%	metros	226	228	144	113	108	103
-5%	metros	392	398	320	303	295	292
0%	metros	581	551	524	489	492	477
5%	metros	477	445	370	307	301	316
10%	metros	86	80	68	51	52	53
RIPIOS	Ruta	24m07	24m08	24m09	24m10	24m11	24m12
-10%	metros	801	789	773	834	811	734
-5%	metros	294	289	291	297	297	286
0%	metros	446	353	385	468	418	417
5%	metros	114	102	112	109	118	112
10%	metros	14	16	14	15	13	14

Fuente: Elaboración propia

Tabla 25

Distancias por material y pendiente – 2024 (desde julio)

SULFURO	Ruta	25m01	25m02	25m03	25m04	25m05	25m06	25m07	25m08	25m09	25m10	25m11	25m12
-10%	metros	220.1	220.1	220.1	220.1	-	-	218.9	-	104.1	157.1	-	145.4
-5%	metros	317.6	267.1	331.1	269.5	283.1	466.0	394.0	466.9	386.8	439.3	490.9	454.1
0%	metros	847.1	731.6	914.7	830.4	815.1	1,170.8	1,265.1	1,166.4	1,198.5	1,284.0	1,302.4	1,320.6
5%	metros	848.3	907.5	859.1	950.5	926.1	609.8	785.5	668.7	798.4	732.6	640.5	720.6
10%	metros	3,318.6	3,374.2	3,112.4	3,543.7	3,561.1	1,810.4	1,932.1	2,108.5	2,040.4	2,221.2	2,299.7	2,304.0
OXIDO	Ruta	25m01	25m02	25m03	25m04	25m05	25m06	25m07	25m08	25m09	25m10	25m11	25m12
-10%	metros	-	-	195.3	205.5	196.4	194.3	218.9	214.3	216.9	214.9	215.3	216.4
-5%	metros	165.6	120.9	343.3	981.0	986.3	1,030.9	748.2	1,299.5	1,051.0	1,017.3	1,381.7	1,140.6
0%	metros	819.3	792.8	906.3	1,006.2	854.3	920.9	984.5	1,053.2	1,065.6	1,103.6	1,168.4	1,100.3
5%	metros	839.4	679.5	587.8	521.4	946.4	545.5	385.3	499.9	679.8	394.6	717.8	385.5
10%	metros	1,232.3	1,393.4	1,473.7	729.3	754.6	654.0	1,226.1	533.7	953.7	917.4	678.1	847.9
DESMONTE	Ruta	25m01	25m02	25m03	25m04	25m05	25m06	25m07	25m08	25m09	25m10	25m11	25m12
-10%	metros	149.9	160.5	281.2	229.5	277.3	276.6	246.3	283.1	275.6	203.5	254.6	237.9
-5%	metros	550.7	435.1	844.1	1,140.6	1,122.8	1,136.6	1,271.1	1,043.6	1,410.8	1,288.2	1,087.6	1,097.5
0%	metros	1,267.3	832.4	1,225.5	1,100.4	1,356.7	1,250.3	1,156.4	1,129.3	1,472.9	1,212.6	887.9	1,014.3
5%	metros	464.6	392.0	465.4	561.5	365.4	360.7	330.8	426.9	870.3	434.4	476.8	433.3
10%	metros	1,382.8	1,512.6	1,344.3	785.2	755.7	793.2	738.1	930.9	781.1	977.8	1,322.9	1,322.2
REMANEJO	Ruta	25m01	25m02	25m03	25m04	25m05	25m06	25m07	25m08	25m09	25m10	25m11	25m12
-10%	metros	190.1	190.9	203.8	166.9	255.4	238.0	163.0	135.4	179.9	167.7	170.3	172.0
-5%	metros	280.6	260.0	273.7	336.1	362.0	334.7	285.9	242.4	316.2	320.3	316.4	321.0
0%	metros	498.8	493.0	476.0	522.0	490.7	468.4	554.4	520.4	532.6	536.9	505.0	495.0
5%	metros	377.9	354.7	352.7	487.3	445.9	513.7	471.6	484.8	477.0	433.8	466.0	419.1
10%	metros	136.1	136.1	136.1	136.1	137.3	136.2	136.4	136.1	136.1	136.1	136.1	136.1
RIPIOS	Ruta	25m01	25m02	25m03	25m04	25m05	25m06	25m07	25m08	25m09	25m10	25m11	25m12
-10%	metros	468.6	708.7	498.3	723.6	723.3	728.1	732.0	719.2	715.4	686.0	719.4	756.8
-5%	metros	324.6	308.5	316.1	286.2	279.1	279.6	279.2	278.9	274.4	271.7	278.9	283.0
0%	metros	454.9	493.2	498.1	473.1	447.2	376.3	418.5	433.0	464.3	477.9	457.7	459.7
5%	metros	121.2	127.0	116.7	110.7	103.6	104.5	104.0	101.8	100.0	96.0	101.8	107.9
10%	metros	34.5	34.5	36.4	34.5	34.5	34.5	34.5	34.5	36.7	36.3	34.5	34.5

Fuente: Elaboración propia

El factor más importante en este modelo es el ratio de consumo en gal/hr por pendiente. estos valores son el promedio cuando el camión está cargado y vacío pero a esa condición de pendiente.

Ejm: el camión consume a una pendiente de -10% en promedio 2.1 gal/hr (este promedio es considerando que el camión paso cargado y regreso vacío en esa misma condición de pendiente), en nuestro histórico para llegar a este valor se realizó pruebas desde que el camión ingresa a esa pendiente y sale, tanto para condición de cargado y vacío, al promediar ambos consumos nos da el 2.1 gal/hr, si esto lo lleváramos a lo estricto por cada condición en cargado el camión consumiría 3.16 gal/hrs y en Vacío 1.08 gal/hrs, pero estadísticamente el promedio aplica por que se asume que el camión va y regresa por la misma ruta.

Para determinar estos ratios, se realizaron pruebas durante tres meses en los distintos grupos de pendientes.

Aquí se pondera los Ratios de gal/hr por pendiente con la longitud de cada segmento por pendiente en cada tipo de material y se divide entre la suma de cada segmento por material, lo cual nos resulta un gal/hr por tipo de material.

$$\text{Ratio por material} = \frac{\sum(\text{Ratio pendiente}) * (\text{Dist. pendiente} \times \text{material})}{\sum(\text{Dist. pendiente} \times \text{material})} \quad (10)$$

Luego para calcular el galón/hr promedio equivalente de la flota de camiones volvemos a ponderar el gal/hr por material por el tonelaje que se mueve por cada tipo de material y lo dividimos entre la suma de tonelaje. Siempre se busca calcular el equivalente por un tema de facilidad de interpretación y comparación por periodos.

$$\text{Ratio por hora} = \frac{\sum(\text{Ratio material}) * (\text{Tonelaje planificado} \times \text{material})}{\sum(\text{Tonelaje planificado} \times \text{material})} \quad (11)$$

Luego para calcular el total de galones simplemente se multiplica el gal/hr por las horas operativas planificadas para tener el total de galones a presupuestar.

$$\text{Galones planificados} = \text{Ratio hora} * \text{Horas op. plan.} \quad (12)$$

Aquí se multiplica los galones por el precio de cada galón, se tomó 3.5 US\$/gal como precio referencial planificado.

Después de realizar las pruebas para determinar el ratio de consumo por pendiente, se obtuvo los siguientes resultados.

Tabla 26

Ratios de consumo por pendiente

		1er Prueba	2da Prueba	3era Prueba
Ratios Gal/hr por pendiente		24m07	24m08	24m09
-10%	galón/hora	2.7	2.3	2.1
-5%	galón/hora	6.5	7.5	8.7
0%	galón/hora	29.4	26.5	27.2
5%	galón/hora	41.9	46.9	45.3
10%	galón/hora	73.4	75.3	77.5

Fuente: Elaboración propia

Para futuros cálculos de consumo se optó por los ratios de la tercera prueba. Aplicamos la ecuación (10) para determinar los ratios de consumo por material. Los resultados se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 27

Ratios de consumo por material – 2024 (desde julio)

MATERIAL	UNIDAD	24m07	24m08	24m09	24m10	24m11	24m12
SULFURO	galón/hora	57.01	57.57	58.62	59.21	57.23	57.28
OXIDO	galón/hora	48.60	48.51	52.94	48.85	54.67	52.56
DESMONTE	galón/hora	45.18	40.32	41.31	41.50	41.56	44.51
REMANEJO	galón/hora	26.41	26.43	27.60	26.94	27.09	27.52
RIPIOS	galón/hora	13.78	12.48	13.17	13.44	13.28	13.73

Fuente: Elaboración propia

Tabla 28

Ratios de consumo por material – 2025

MATERIAL	UNIDAD	25m01	25m02	25m03	25m04	25m05	25m06
SULFURO	galón/hora	57.95	59.11	56.68	58.98	61.30	50.22
OXIDO	galón/hora	51.42	54.01	48.14	33.80	35.71	32.80
DESMONTE	galón/hora	43.95	48.51	40.00	33.15	31.53	32.01
REMANEJO	galón/hora	29.69	29.73	29.30	30.37	28.28	29.53
RIPIOS	galón/hora	17.32	15.54	17.35	15.07	14.76	14.16
MATERIAL	UNIDAD	25m07	25m08	25m09	25m10	25m11	25m12
SULFURO	galón/hora	48.63	52.01	50.87	50.53	52.14	50.81
OXIDO	galón/hora	41.01	28.97	36.09	35.14	31.05	33.43
DESMONTE	galón/hora	30.76	34.55	31.75	34.00	39.25	38.88
REMANEJO	galón/hora	30.91	32.27	30.29	30.04	30.41	29.89
RIPIOS	galón/hora	14.47	14.65	15.00	15.26	14.84	14.66

Fuente: Elaboración propia

Con estos ratios de consumo por material se determina el ratio de consumo por hora usando la ecuación (11). Cuyo valor sirve para determinar los galones totales usando la ecuación (12). Al multiplicar por el precio de 3.5 US\$/galón obtenemos el presupuesto planificado. Se comparan los valores calculados con ambos modelos.

En las siguientes tablas se muestran los resultados obtenidos:

Tabla 29

Galones planificados por modelos – 2024 (desde julio)

	24m07	24m08	24m09	24m10	24m11	24m12
MODELO POR RUTAS						
Ratio de consumo por hora	41.36	38.36	39.65	39.74	40.32	40.98
Hrs Camión Planificadas	17,583	17,747	16,541	16,838	16,469	17,142
Galones Planificados	727,167	680,854	655,910	669,214	664,079	702,441
Costo Planificado – US\$	2,545,086	2,382,988	2,295,686	2,342,249	2,324,277	2,458,542
MODELO POR REGRESIÓN						
Ratio de consumo por hora	39.10	37.43	36.23	39.06	39.02	39.08
Hrs Camión Planificadas	17,583	17,747	16,541	16,838	16,469	17,142
Galones Planificados	687,453	664,320	599,231	657,681	642,686	669,965
Costo Planificado – US\$	2,406,086	2,325,121	2,097,308	2,301,882	2,249,402	2,344,876
Variación	2.26	0.93	3.43	0.68	1.30	1.89

Fuente: Elaboración propia

Tabla 30

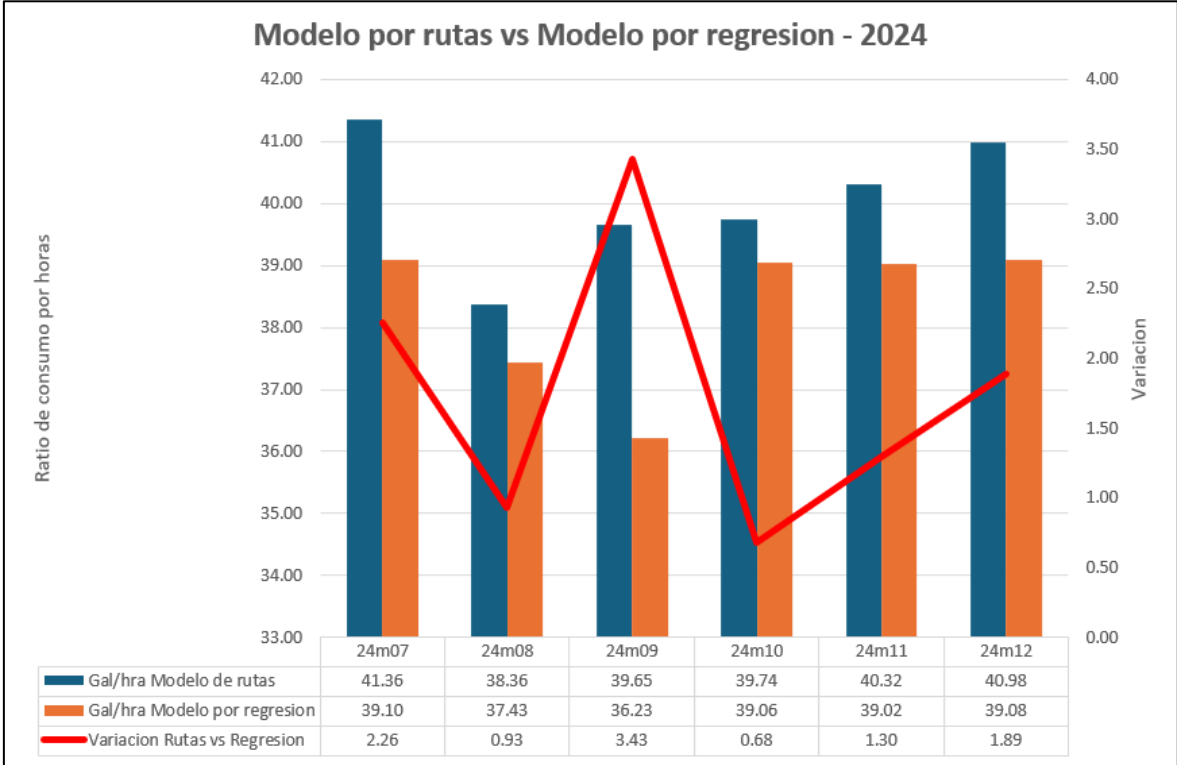
Galones planificados por modelos – 2025

	25m01	25m02	25m03	25m04	25m05	25m06	25m07	25m08	25m09	25m10	25m11	25m12
MODELO POR RUTAS												
Ratio de consumo por hora	41.38	45.00	37.48	32.36	31.64	30.62	31.04	32.60	31.48	33.23	35.28	35.27
Hrs Camión Planificadas	18,390	16,540	18,123	15,978	17,887	15,871	15,210	16,215	17,897	17,320	16,988	17,606
Galones Planificados	761,016	744,377	679,205	517,045	566,023	486,049	472,138	528,553	563,471	575,572	599,300	620,901
Costo Planificado – US\$	2,663,556	2,605,321	2,377,217	1,809,659	1,981,082	1,701,171	1,652,485	1,849,935	1,972,149	2,014,501	2,097,549	2,173,154
MODELO POR REGRESIÓN												
Ratio de consumo por hora	40.84	42.19	37.70	37.59	36.24	33.35	34.26	35.30	38.31	36.84	38.91	38.53
Hrs Camión Planificadas	18,390	16,540	18,123	15,978	17,887	15,871	15,210	16,215	17,897	17,320	16,988	17,606
Galones Planificados	751,045	697,856	683,293	600,577	648,267	529,333	521,085	572,412	685,626	638,095	661,024	678,377
Costo Planificado – US\$	2,628,658	2,442,495	2,391,526	2,102,021	2,268,933	1,852,664	1,823,797	2,003,441	2,399,692	2,233,334	2,313,583	2,374,318
Variación	0.54	2.81	-0.23	-5.23	-4.60	-2.73	-3.22	-2.70	-6.83	-3.61	-3.63	-3.26

Fuente: Elaboración propia

Figura 22

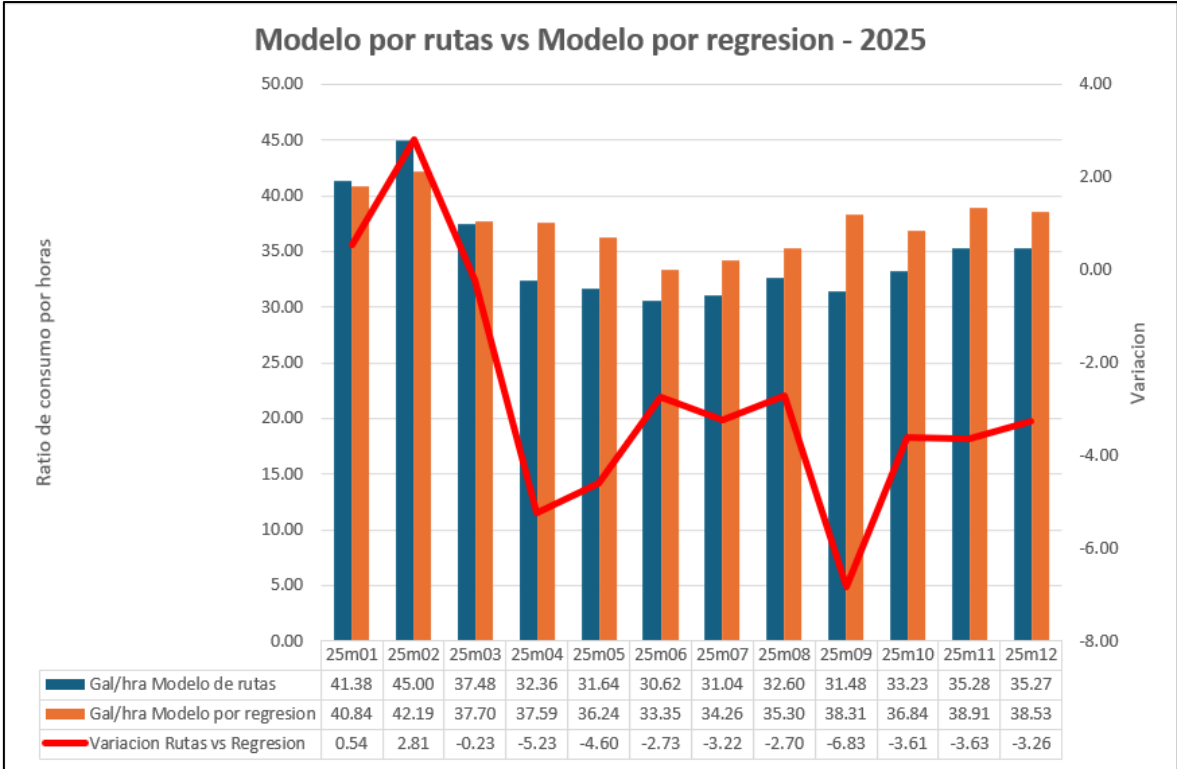
Galones planificados por modelos – 2024 (desde julio)



Fuente: Elaboración propia

Figura 23

Galones planificados por modelos – 2025



Fuente: Elaboración propia

Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados

4.1 Análisis de resultados

Para poder visualizar los resultados del cálculo de consumo de combustible para camiones CAT 793 aplicando el modelo por rutas, se hará un comparativo entre el ratio de consumo real versus los ratios calculados con ambos modelos.

Tabla 31

Consumo de galones reales (julio 2024 – marzo 2025)

PERIODO	RATIO DE CONSUMO REAL GAL/HRA	HRS CAMIÓN REALES	GALONES REALES	COSTO REAL US\$
24m07	40.19	18,612	748,076	2,618,266
24m08	38.95	17,681	688,727	2,410,544
24m09	39.05	17,496	683,280	2,391,479
24m10	39.33	17,721	696,901	2,439,154
24m11	40.30	16,632	670,216	2,345,756
24m12	40.73	16,499	671,943	2,351,801
25m01	40.99	17,672	724,453	2,535,584
25m02	44.61	16,096	717,985	2,512,947
25m03	37.36	17,991	672,167	2,352,585
Promedio	40.17	17,378	697,083	2,439,791

Fuente: Elaboración propia

En la siguiente tabla se muestra el comparativo entre el ratio real versus ratios calculados, además se muestra la variación y el porcentaje de error.

Tabla 32

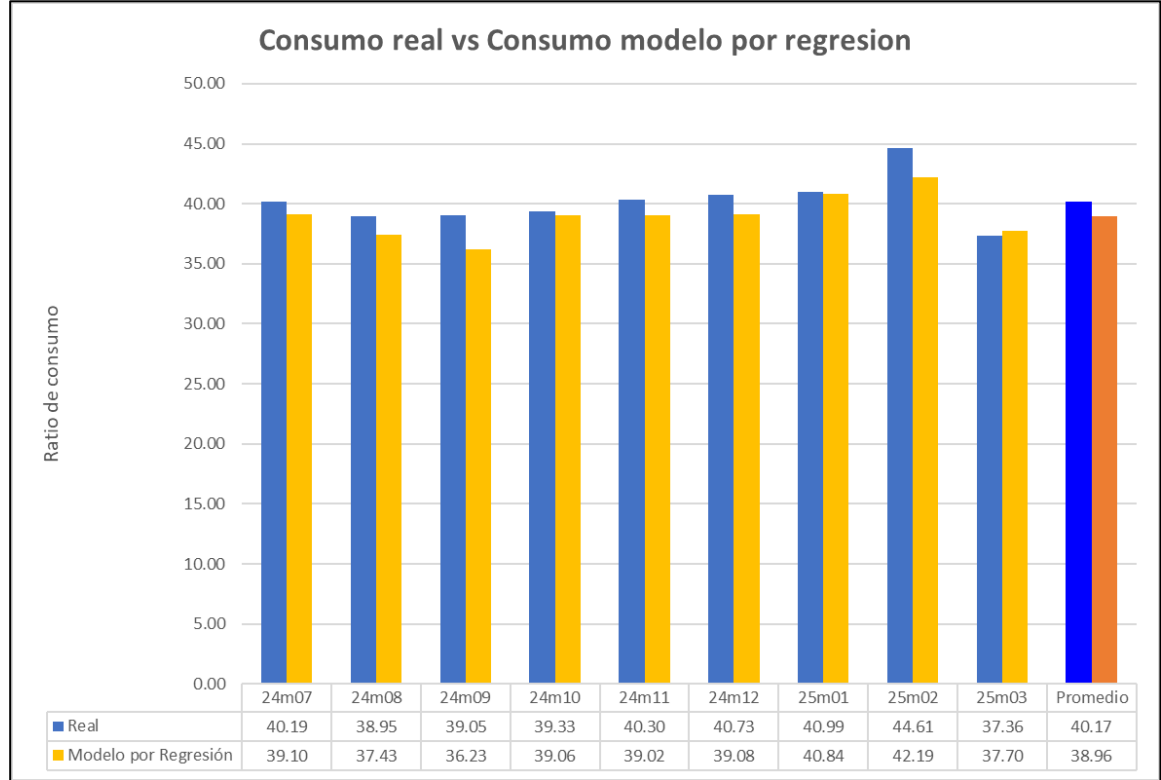
Comparación de consumo real vs consumo calculado

PERIODO	Real Gal/hra	Modelo por Rutas Gal/hra	Modelo por Regresión Gal/hra	Variación Real - Calculado por rutas Gal/hra	Variación Real - Calculado por regresión Gal/hra	Porcentaje de error – Rutas %	Porcentaje de error – Regresión %
24m07	40.19	41.36	39.10	-1.16	1.10	-2.89%	2.73%
24m08	38.95	38.36	37.43	0.59	1.52	1.51%	3.90%
24m09	39.05	39.65	36.23	-0.60	2.83	-1.54%	7.24%
24m10	39.33	39.74	39.06	-0.42	0.27	-1.06%	0.68%
24m11	40.30	40.32	39.02	-0.03	1.27	-0.07%	3.16%
24m12	40.73	40.98	39.08	-0.25	1.64	-0.62%	4.03%
25m01	40.99	41.38	40.84	-0.39	0.16	-0.94%	0.38%
25m02	44.61	45.00	42.19	-0.40	2.41	-0.89%	5.41%
25m03	37.36	37.48	37.70	-0.12	-0.34	-0.31%	-0.91%
Promedio	40.17	40.48	38.96	-0.31	1.21	-0.76%	2.96%

Fuente: Elaboración propia

Figura 24

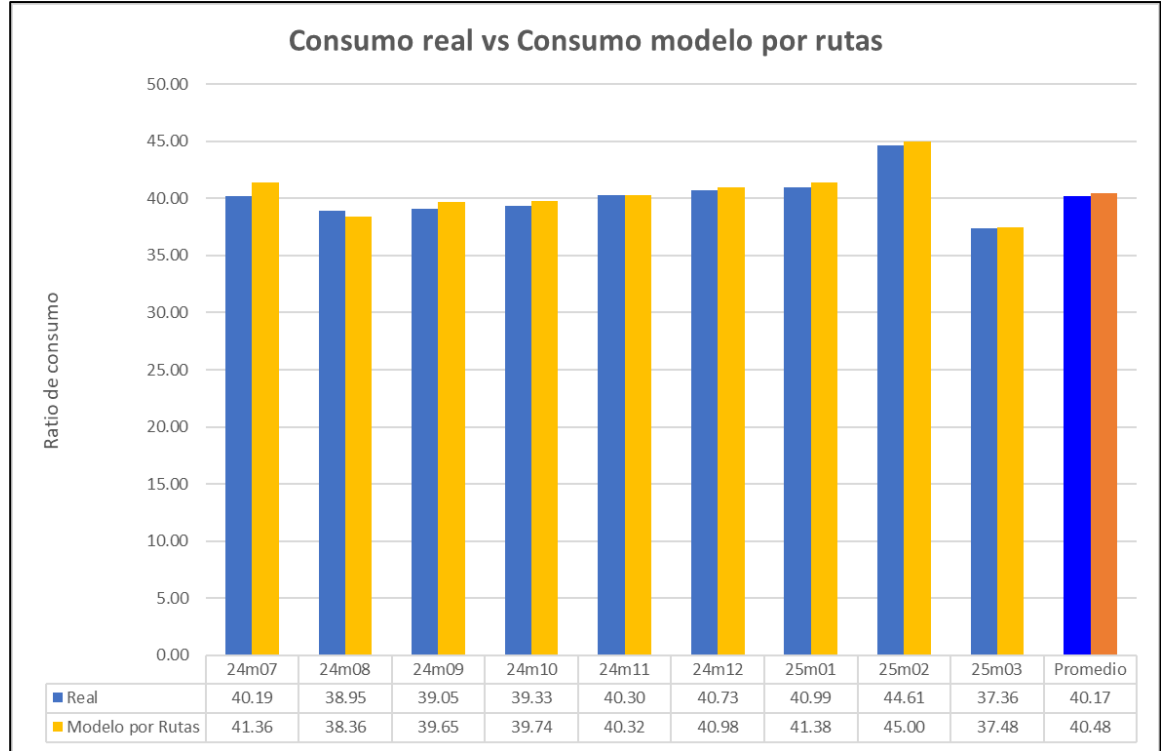
Consumo real vs Consumo calculado por regresión



Fuente: Elaboración propia

Figura 25

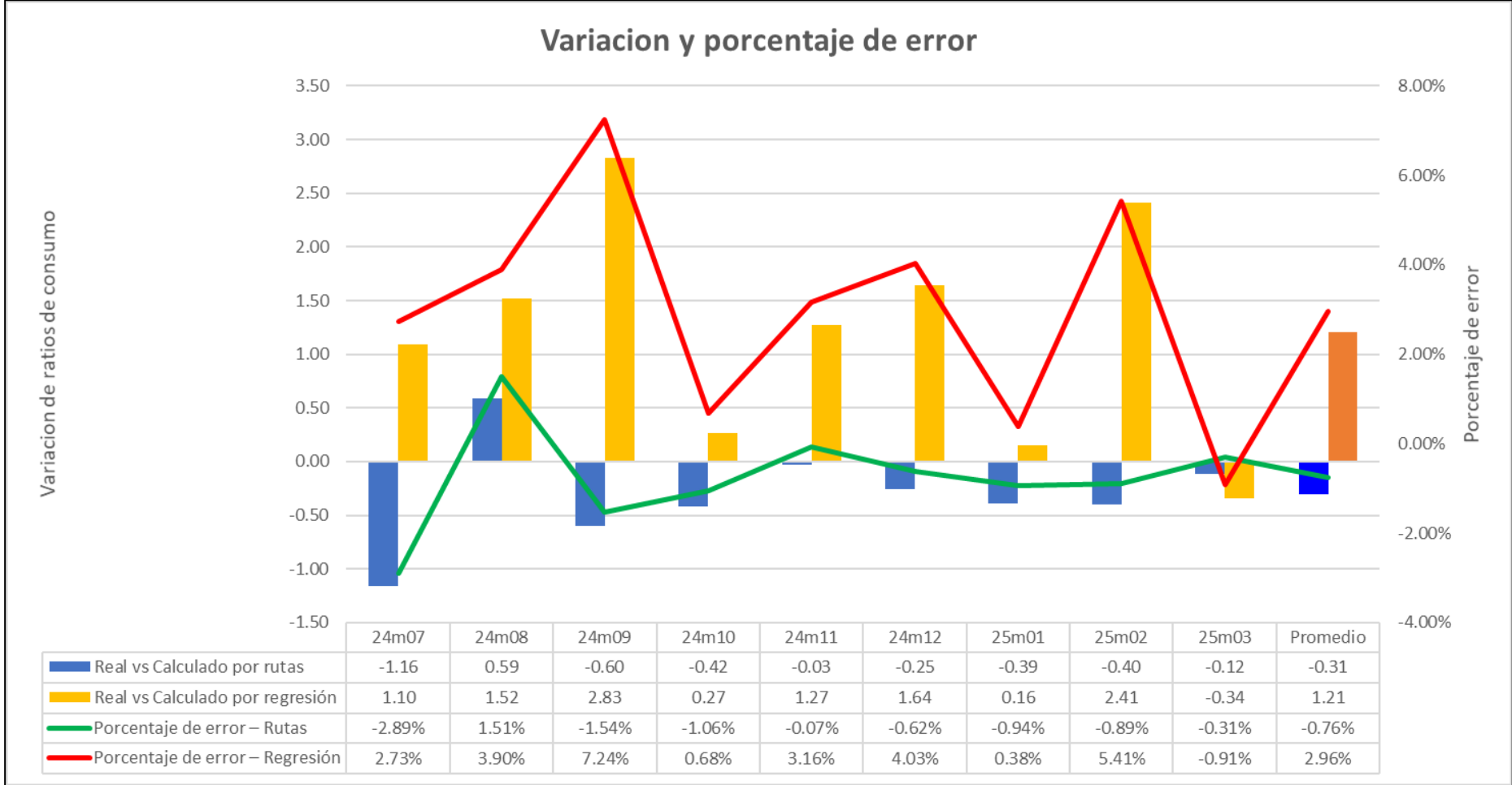
Consumo real vs Consumo calculado por rutas



Fuente: Elaboración propia

Figura 26

Variación y porcentaje de error



Fuente: Elaboración propia

En las figuras 23 y 24, se muestra la tendencia de lo calculado respecto a lo real, el modelo de rutas tiende a generar valores más cercanos a la realidad en comparación con el modelo por regresión, estos valores tienden a ser ligeramente mayores al real, lo que desde un punto de vista empresarial no se estarían generando sobrecostos por una buena planificación.

En la figura 26, se muestra un comparativo entre la variación de lo real versus lo calculado y el respectivo porcentaje de error que estas variaciones generan. Usando el nuevo modelo por rutas se logró reducir el margen de error de 2.96% hasta -0.76%. Ese porcentaje negativo se complementa con lo mencionado en el párrafo anterior.

4.2 Validación de hipótesis

Para poder validar la hipótesis de la investigación, empezamos planteando una hipótesis nula, y la respectiva hipótesis alternativa. Tenemos:

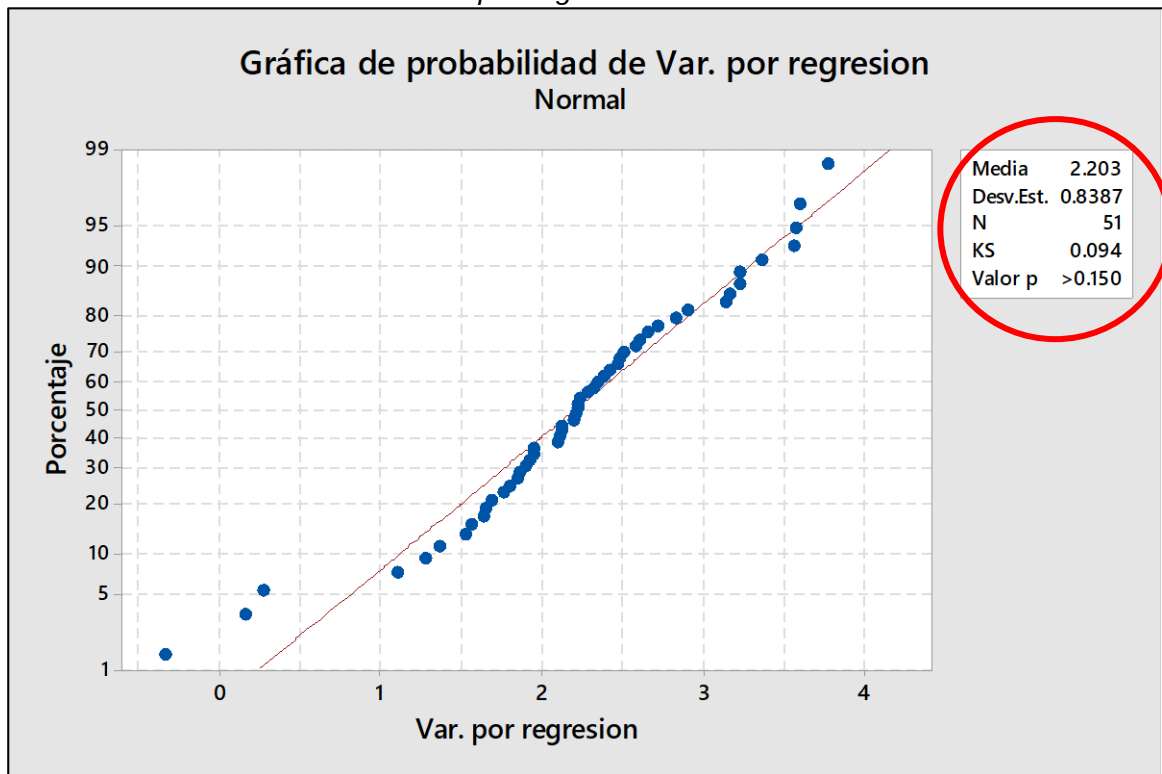
- H0: Un adecuado modelo por rutas para el cálculo de ratio de consumo de combustible en camiones CAT 793, no permitirá reducir la variabilidad entre lo calculado y lo real.
- HA: Un adecuado modelo por rutas para el cálculo de ratio de consumo de combustible en camiones CAT 793, permitirá reducir la variabilidad entre lo calculado y lo real.

Como primer paso se determina la normalidad de los datos de variabilidad mostrados en capítulos anteriores, nos ayudaremos del software Minitab para determinar la normalidad de los datos.

La prueba de normalidad nos arrojará un valor de p, para poder afirmar que la muestra de datos es normal, este valor debe ser mayor a 0.05. Tenemos:

Figura 27

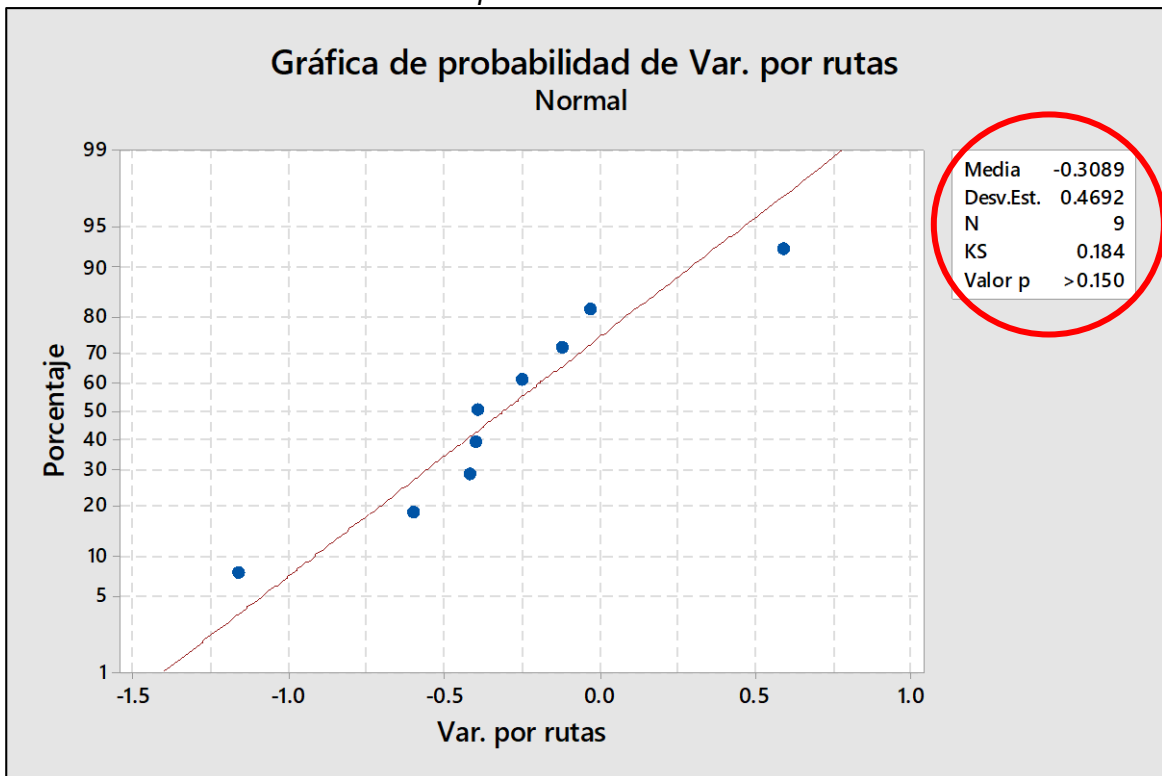
Prueba de normalidad – variabilidad por regresión



Fuente: Elaboración propia con software Minitab

Figura 28

Prueba de normalidad – variabilidad por rutas



Fuente: Elaboración propia con software Minitab

De las figuras anteriores se puede concluir que ambas muestras tienen una distribución normal, debido a que el valor de p es mayor a 0.05 en ambos casos.

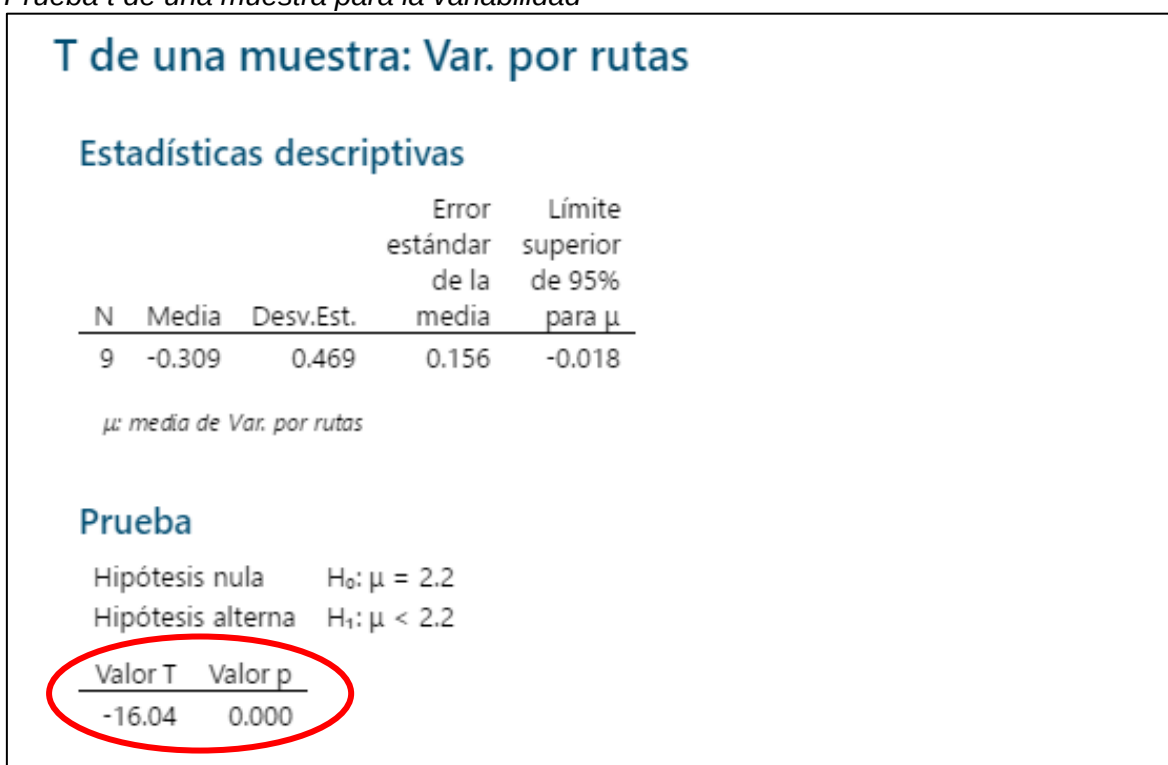
Una vez determinado la normalidad, procedemos a realizar la prueba t (número de datos < 30) donde se comparará la variabilidad del modelo por rutas respecto a la media de los datos de variabilidad del récord del modelo por regresión.

- Se tendrá un nivel de confianza de 95%.
- Para rechazar la hipótesis nula se debe obtener un valor de p menor a 0.05.
- La cantidad de muestras es $N = 9$ (los datos de variabilidad usando el modelo por rutas).
- La media hipotética será de 2.2 según se determinó en la figura 26.

Realizando la prueba t de una muestra tenemos:

Figura 29

Prueba t de una muestra para la variabilidad



Fuente: Elaboración propia con software Minitab

Como se puede apreciar en la figura anterior el valor de p de la prueba t nos genera un valor menor a 0.05, por lo podemos rechazar la hipótesis nula y aceptamos la hipótesis alternativa.

Se concluye del estudio que “Un adecuado modelo por rutas para el cálculo de ratio de consumo de combustible en camiones CAT 793, permitirá reducir la variabilidad entre lo calculado y lo real”.

Conclusiones

La implementación del modelo por rutas permitió mejorar significativamente la precisión en la planificación del consumo de combustible, reduciendo la variabilidad entre el consumo planificado y el real, lo que contribuye directamente a una gestión más eficiente de los costos operativos.

A diferencia del modelo por regresión múltiple, el modelo por rutas demostró mayor versatilidad y adaptabilidad, facilitando su ajuste ante cambios en las condiciones operativas, como modificaciones en las distancias de acarreo o variaciones en la pendiente de las rutas.

El modelo por rutas permitió reducir significativamente la variabilidad del ratio de consumo promedio de combustible, pasando de una sobreestimación de +2.2 gal/h a una subestimación controlada de -0.31 gal/h, mejorando así la precisión en la planificación operativa.

Como resultado de la aplicación del modelo por rutas, el porcentaje de error en la estimación del consumo se redujo de un 2.96% (con el modelo por regresión) a -0.76%, evidenciando una mejora sustancial en la confiabilidad de la estimación y una disminución en los sobrecostos por subestimación del requerimiento de combustible.

Esta mejora en la precisión del cálculo del consumo también fortalece la planificación presupuestal mensual, alineando los costos reales con los planificados y generando un mayor control y predictibilidad para la toma de decisiones operativas y financieras.

Recomendaciones

Actualizar regularmente las bases de datos de rutas, incluyendo cambios en las distancias, pendientes y condiciones de acarreo, con el fin de mantener la confiabilidad del modelo y anticipar desviaciones operativas.

Implementar un sistema de monitoreo continuo del consumo real versus el planificado, que permita identificar rápidamente desviaciones y retroalimentar el modelo con datos actualizados.

Evaluar periódicamente el desempeño del modelo comparando sus estimaciones con los resultados reales, con el fin de detectar oportunidades de mejora en la formulación del modelo o en los factores que lo alimentan.

Referencias bibliográficas

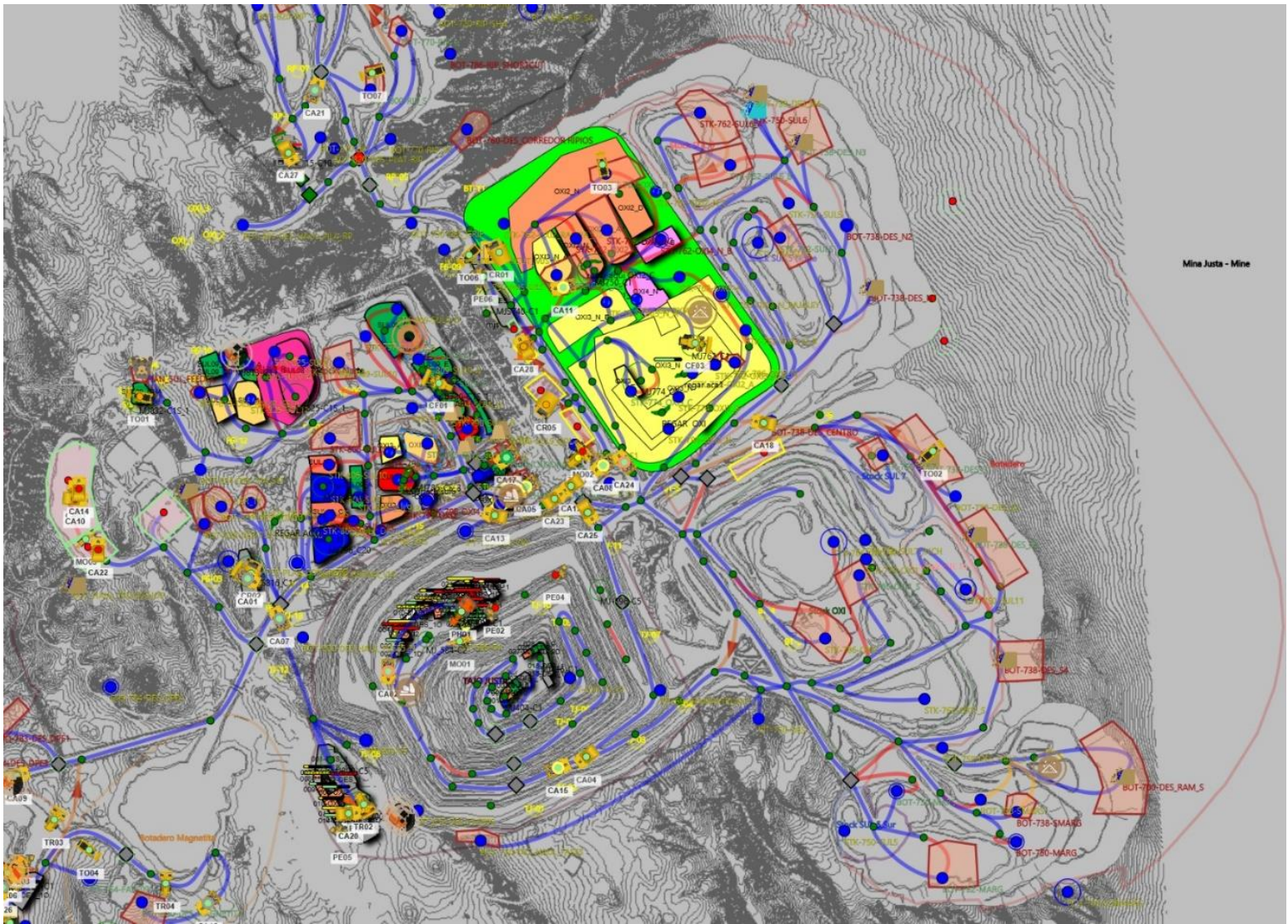
- Bagheri, A. et al. (2022) *Application of machine learning techniques to predict haul truck fuel consumption in open-pit mines*.
- Caterpillar. (2022) *Improving Fuel Efficiency with Cat® VIMS Data. Technical White Paper*.
- Dindarloo, S.R. et al (2016) *Determinants of fuel consumption in mining trucks*.
- EPA. (2022). *Greenhouse Gas Emissions from a Typical Passenger Vehicle*. United States Environmental Protection Agency.
- Gusman, M. (2021) *Effect of total resistance and speed on fuel consumption of dump truck HD 465-7 in coal mining*.
- Komatsu. (2021) *Operator efficiency and fuel saving: Best practices in mining*. Technical Bulletin.
- Lucano, W. (2014) *Mejoramiento del cálculo de consumo de combustible en acarreo en las operaciones mina de Sociedad Minera Cerro Verde S.A.A.*
- Meneses, D. et al (2023) *Modeling productivity reduction and fuel consumption in open-pit mining trucks by considering the temporary deterioration of mining roads through discrete-event simulation*.
- Nieto, J. et al (2020). *Estimación y control del consumo de combustible en operaciones mineras*. Revista Ingeniería y Desarrollo, 35(2), 102–117.
- OECD. (2023). *Improving sustainability in mining: energy and emission reductions*. OECD Publishing.
- Orkhontuul, B. et al. (2024) *Determination of fuel consumption of dump trucks depending on mining and technical conditions*.
- Peña, L. (2021) *Análisis de las variables de rendimiento operacional en camiones mineros Komatsu 730E*.
- Peña, L. (2021). *Análisis de las variables de rendimiento operacional en camiones mineros Komatsu 730E*.

- Quijada, C. (2019) *Reducción de consumo de combustible a través de análisis del desempeño de camiones 6x2.*
- Tejsi, T. (2019) *Estudio del consumo de combustible e implementación de un módulo de información en el sistema Dispatch para los camiones de la Cia Minera Antapaccay - Espinar – Cusco.*
- Valdivieso, L. (2015) *Cálculo de camiones para el transporte de mineral y desmonte en Sociedad Minera Cerro Verde S.A.A.*

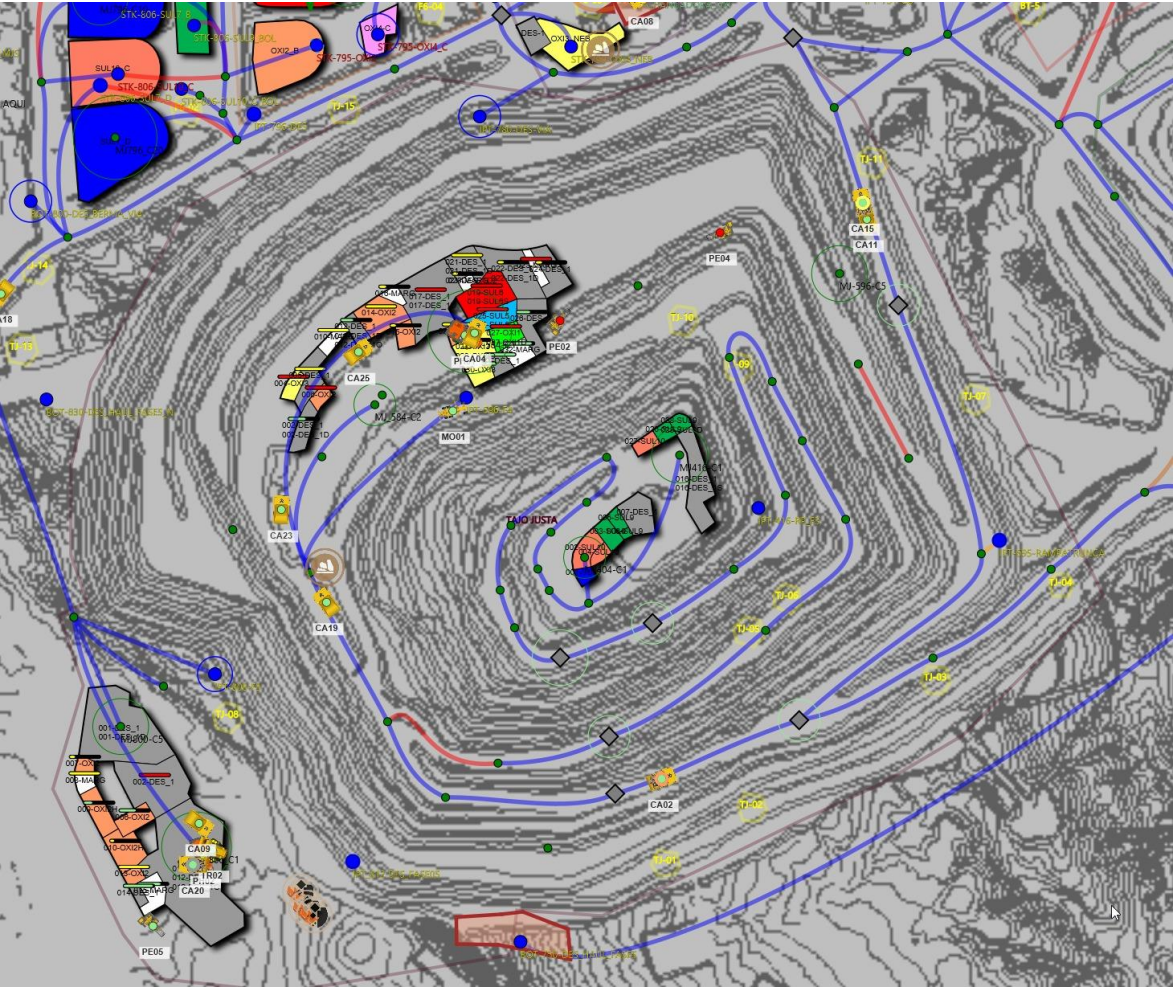
Anexos

	Pág.
Anexo 1: Modelo de rutas – Vista general de la mina	1
Anexo 2: Modelo de rutas – Tajo mina Justa	2
Anexo 3: Modelo de rutas – Stock de óxidos	3
Anexo 4: Modelo de rutas – Stock de sulfuros	4
Anexo 5: Modelo de rutas – Zona presa de relaves	5
Anexo 6: Modelo de rutas – Botadero de ripios.....	6

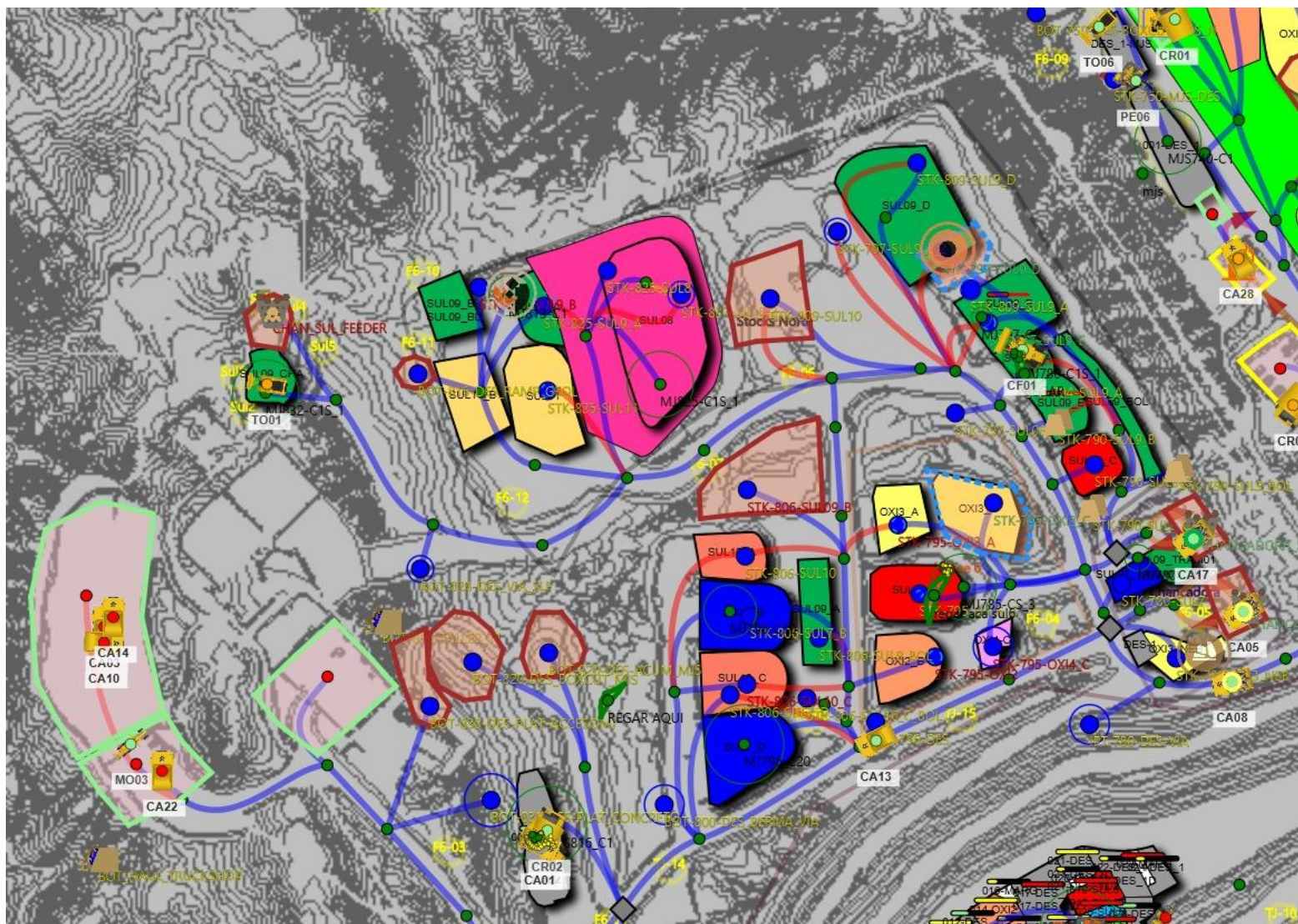
Anexo 1: Modelo de rutas – Vista general de la mina



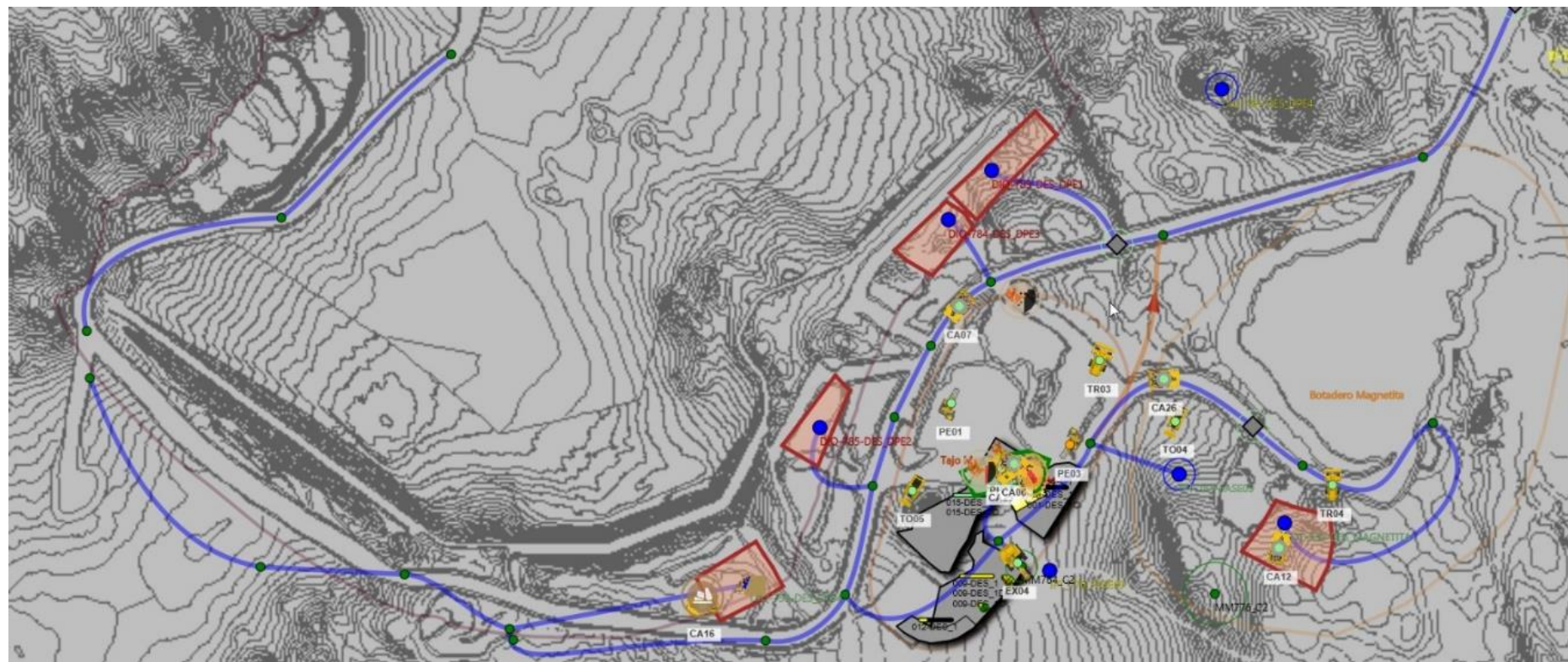
Anexo 2: Modelo de rutas – Tajo mina Justa



Anexo 4: Modelo de rutas – Stock de sulfuros



Anexo 5: Modelo de rutas – Zona presa de relaves



Anexo 6: Modelo de rutas – Botadero de rípios

