

Universidad Nacional de Ingeniería
Facultad de Ingeniería Geológica Minera y Metalúrgica



TESIS

**Optimización de la asignación de camiones en mina tajo abierto
mediante simulación estocástica y determinística para el
cumplimiento de metas de producción**

Para obtener el título profesional de Ingeniero de Minas

Elaborado por

Jaime Gerardo Yupanqui Sánchez

 [0009-0002-6692-2414](https://orcid.org/0009-0002-6692-2414)

Asesor

M.Sc. Jose Antonio Corimanya Mauricio

 [0000-0003-1078-4155](https://orcid.org/0000-0003-1078-4155)

LIMA – PERÚ

2025

Citar/How to cite	Yupanqui Sánchez [1]
Referencia/Reference	[1] J. Yupanqui Sánchez, “Optimización de la asignación de camiones en mina tajo abierto mediante simulación estocástica y determinística para el cumplimiento de metas de producción” [Tesis de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2025.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

Citar/How to cite	(Yupanqui, 2025)
Referencia/Reference	Yupanqui, J. (2025). <i>Optimización de la asignación de camiones en mina tajo abierto mediante simulación estocástica y determinística para el cumplimiento de metas de producción</i> . [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

*A Dios por las oportunidades que me brinda y a mis padres,
esposa e hijos por siempre estar conmigo y la por la
confianza depositada en mi persona.*

Agradecimientos

A mi Alma Mater, la UNI.

Resumen

La presente investigación desarrolla un modelo de optimización de la asignación de camiones en minería a tajo abierto, aplicando un enfoque combinado de simulación determinística y estocástica para evaluar la eficiencia del sistema de acarreo. El estudio busca mejorar la productividad, reducir los tiempos de ciclo y minimizar los costos operativos asociados al transporte interno de mineral y desmonte.

Se construyeron modelos complementarios mediante Minehual (simulación determinística) y Orchestra (simulación estocástica), calibrados con información operativa real proveniente de registros de velocidad, disponibilidad mecánica, utilización y tiempos fijos de los equipos. La metodología comprendió la caracterización del sistema pala–camión, la definición de escenarios de asignación de flota y la ejecución de simulaciones Monte Carlo para representar la variabilidad operativa.

Los resultados mostraron que el modelo determinístico reprodujo con una desviación menor al ± 2 % los valores reales de minado total, tiempos de ciclo y colas, mientras que el modelo estocástico permitió cuantificar la dispersión e incertidumbre operativa. El análisis de sensibilidad identificó un punto óptimo de saturación de seis camiones, a partir del cual la productividad marginal disminuye y las colas aumentan significativamente.

La optimización de la asignación de flota permitió mantener la producción global con una reducción del costo unitario de acarreo del 1–2 %, mejorando la eficiencia energética mediante un menor consumo de combustible por tonelada transportada. La investigación confirma que la simulación híbrida constituye una herramienta técnica eficaz para la toma de decisiones operativas y la optimización del acarreo en minería a tajo abierto.

Palabras clave — Simulación determinística, simulación estocástica, optimización de flota, acarreo minero, costos unitarios, eficiencia operativa.

Abstract

This research develops a model for optimizing truck allocation in open-pit mining, applying a combined deterministic and stochastic simulation approach to evaluate the efficiency of the haulage system. The study aims to improve productivity, reduce cycle times, and minimize operating costs associated with internal material transportation.

Complementary models were developed using Minehual (deterministic simulation) and Orchestra (stochastic simulation), calibrated with real operational data including truck speeds, mechanical availability, utilization rates, and fixed operating times. The methodology involved characterizing the shovel–truck system, defining fleet allocation scenarios, and performing Monte Carlo simulations to represent operational variability.

Results showed that the deterministic model reproduced actual performance indicators with less than ± 2 % deviation in total mined tonnage, cycle times, and queues, while the stochastic model quantified the dispersion and uncertainty of these variables. The fleet sensitivity analysis identified an optimal saturation point of six trucks, beyond which marginal productivity decreases and waiting times increase significantly.

The optimization of truck allocation allowed the operation to maintain overall production while reducing haulage unit costs by 1–2 %, improving energy efficiency through lower specific fuel consumption per ton transported. The findings confirm that hybrid simulation models represent an effective decision-support tool for optimizing haulage operations, providing a predictive and data-driven approach to enhance operational efficiency and economic sustainability in open-pit mining.

Keywords — Deterministic simulation, stochastic simulation, truck allocation, haulage optimization, unit cost, operational efficiency.

Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen	v
Abstract	vi
Introducción	xiv
Capítulo I. Parte introductoria del trabajo	1
1.1 Descripción del problema de investigación.....	1
1.2 Objetivo.....	4
1.2.1 Objetivo general	4
1.2.2 Objetivos específicos	4
1.3 Hipótesis	4
1.3.1 Hipótesis general	4
1.3.2 Hipótesis específicas.....	4
1.4 Operacionalización de variables.....	5
1.4.1 Variable independiente (V.I).....	5
1.4.2 Variable dependiente (V.D)	5
1.5 Antecedentes referenciales	7
1.5.1 Antecedentes internacionales	7
1.5.2 Antecedentes nacionales	9
Capítulo II. Marcos teórico y conceptual.....	11
2.1 Marco Teórico	11
2.1.1 Fundamentos de la gestión de flota en minería a tajo abierto.....	11
2.1.2 Simulación aplicada a la minería a tajo abierto.....	15
2.1.3 Integración de simulación con despacho dinámico y optimización	19
2.1.4 Modelos de optimización y despacho en minería a tajo abierto.....	23
2.1.5 Indicadores de desempeño (KPIs) y criterios de evaluación de eficiencia.....	29
2.2 Marco conceptual.....	33
2.2.1 Simulación	34

2.2.2 Simulación determinística	34
2.2.3 Simulación estocástica.....	34
2.2.4 Carguío	34
2.2.5 Acarreo	34
2.2.6 Ciclo de acarreo	35
2.2.7 Despacho dinámico.....	35
2.2.8 Optimización	35
2.2.9 Eficiencia operativa	35
2.2.10 Costo unitario de acarreo	36
2.2.11 Productividad de flota.....	36
2.2.12 Disponibilidad mecánica.....	36
2.2.13 Utilización de equipos	36
2.2.14 Simulación híbrida o mixta	36
2.2.15 Indicador clave de desempeño (KPI).....	37
Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación	38
3.1 Recopilación de información	38
3.1.1 Unidad de estudio	38
3.2 Caracterización del sistema de acarreo.....	39
3.3 Metodología general de modelado	40
3.4 Modelos de simulación estocástica y determinística.....	41
3.4.1 Modelo determinístico (Minehaul).....	41
3.4.2 Modelo estocástico (Orchestra).....	43
3.5 Definición de escenarios simulados	44
3.6 Análisis de sensibilidad y políticas de despacho	45
3.6.1 Análisis de sensibilidad al número de camiones.....	45
3.6.2 Políticas de despacho y reglas de asignación	46
3.7 Validación de modelos	46
3.8 Supuestos y limitaciones.....	46

3.9	Procesamiento de resultados y evaluación técnico–económica	47
3.9.1	Evaluación técnica del rendimiento	47
3.9.2	Evaluación técnica y económica	47
	Capítulo IV. Análisis e interpretación de resultados	50
4.1	Resultados comparativos de producción y tiempos de ciclo	50
4.2	Análisis de sensibilidad de flota.....	52
4.3	Desempeño técnico: utilización, disponibilidad y tiempos.....	53
4.3.1	Utilización y disponibilidad.....	54
4.3.2	Tiempos de cola y eficiencia de despacho	54
4.4	Evaluación económica y energética	55
4.5	Evaluación integral del desempeño (KPI compuestos).....	55
4.6	Prueba de hipótesis.....	55
4.7	Discusión global de resultados	58
	Conclusiones	59
	Recomendaciones	61
	Referencias bibliográficas	63
	Anexos	65

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 : Matriz de consistencia.....	6
Tabla 2 : Camiones mineros típicos.....	12
Tabla 3 : Distribuciones recomendadas por tipo de variable	18
Tabla 4 : Métodos de resolución de la asignación pala-camión	27
Tabla 5 : Parámetros operativos utilizados en el modelo determinístico	42
Tabla 6 : Tiempos fijos y pérdidas operativas	43
Tabla 7 : Parámetros de calibración del modelo (Minehual – Orchestra)	43
Tabla 8 : Resultados de simulación: producción y tiempos de ciclo	44
Tabla 9 : Análisis de sensibilidad al número de camiones	45
Tabla 10: Resultados comparativos de escenarios determinísticos y estocásticos	50
Tabla 11: Análisis de sensibilidad de flota.....	53
Tabla 12: Comparación técnica entre escenario base y configuración optimizada.....	53
Tabla 13: Comparativo económico y energético entre escenario base y optimizado.....	55
Tabla 14: Indicadores integrales de desempeño técnico–económico (KPI compuestos). 55	
Tabla 15: Resultados de la prueba t de dos muestras para la productividad promedio ...	56
Tabla 16: Resultados de la prueba t de dos muestras para el costo unitario de acarreo. 57	

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 : Sistema pala–camión en minería a tajo abierto.....	14
Figura 2 : Esquema de frentes de carga y descarga.....	24
Figura 3 : Diagrama de modelo integrado de simulación y optimización	29
Figura 4 : Ajuste de modelo de distribución de una pala	44
Figura 5 : Comparativo de cumplimiento de producción por pala y destino de acarreo – Escenario I.....	51
Figura 6 : Comparativo de cumplimiento de producción por pala y destino de acarreo – Escenario II.....	51
Figura 7 : Comparativo de cumplimiento de producción por pala y destino de acarreo – Escenario III.....	52
Figura 8 : Comparativo de cumplimiento de producción por pala y destino de acarreo – Escenario IV.....	52
Figura 9 : Histograma de productividad (t/h) al 95% de confianza.....	56
Figura 10: Histograma de costo unitario (USD/t) al 95% de confianza I	57

Glosario

A_m : Disponibilidad mecánica.

Porcentaje del tiempo total en que un equipo se encuentra operativo respecto a su tiempo programado.

C_u : Costo unitario de acarreo.

Indicador económico que expresa el costo medio por tonelada transportada (USD/t).

F: Factor de llenado.

Relación entre la carga efectiva del camión y su capacidad nominal; refleja la eficiencia del proceso de carguío.

T_t : Tiempo total de ciclo.

Duración promedio de un ciclo completo de transporte, incluyendo carga, tránsito, descarga y retorno vacío.

U_e : Utilización efectiva.

Porcentaje del tiempo total disponible en el que un equipo está realizando trabajo productivo.

P10–P90:

Intervalo de confianza estadístico que representa el rango de variabilidad donde se ubican el 80 % de los resultados simulados.

Minehual:

Software de simulación determinística empleado para modelar el sistema de acarreo bajo condiciones fijas.

Orchestra:

Software de simulación estocástica utilizado para incorporar la variabilidad operativa y calcular intervalos de confianza.

KPI: Key

Performance Indicator (Indicador Clave de Desempeño). Métrica utilizada para evaluar la productividad, eficiencia o costo del sistema.

MC (Monte Carlo):

Método estadístico basado en iteraciones aleatorias, empleado para estimar la dispersión e incertidumbre de los resultados de simulación.

SSO: Seguridad y Salud Ocupacional.

Disciplina que establece los procedimientos para prevenir accidentes y enfermedades ocupacionales.

t: Tiempo de ciclo.

Duración total del proceso de perforación, carguío, ventilación y limpieza.

VAC: Valor Actual de Costos.

Indicador económico que calcula el valor presente de los costos proyectados de operación, considerando una tasa de descuento

Introducción

La minería a tajo abierto moderna enfrenta el desafío constante de incrementar la eficiencia productiva y optimizar el uso de sus recursos, manteniendo a la vez elevados estándares de seguridad y sostenibilidad. En este contexto, los sistemas de carguío y acarreo constituyen una de las fases más críticas del ciclo minero, no solo por su influencia directa en la continuidad de la producción, sino también por representar entre el 45 % y 60 % del costo operativo total. La adecuada gestión de la flota de camiones es, por tanto, un factor decisivo para asegurar el cumplimiento de las metas de producción y la rentabilidad global de la operación.

Tradicionalmente, la asignación de camiones en operaciones a tajo abierto se ha realizado mediante métodos determinísticos o empíricos basados en la experiencia del personal de supervisión. Si bien estos enfoques pueden resultar funcionales en la planificación diaria, no logran capturar la variabilidad real del proceso minero, asociada a factores como disponibilidad mecánica, congestión de rutas, pendientes, distancias de acarreo o fluctuaciones en los tiempos de carga y descarga. Como consecuencia, se generan desviaciones entre la producción programada y la real, cuellos de botella en los puntos de carga y un uso subóptimo de los equipos de transporte.

En los últimos años, la aplicación de modelos de simulación discreta de eventos ha emergido como una herramienta avanzada para representar la complejidad operativa del acarreo y evaluar de manera realista distintos escenarios de asignación de flota. La integración de simulación determinística y estocástica permite, por un lado, establecer líneas base de operación con parámetros controlados, y por otro, incorporar la incertidumbre y la variabilidad inherente al proceso. Esta aproximación híbrida ofrece una visión integral del desempeño operativo y posibilita la cuantificación de impactos técnicos y económicos derivados de la optimización.

El presente trabajo de investigación se enfoca en evaluar y optimizar la asignación de camiones en un sistema de acarreo a tajo abierto, mediante la aplicación combinada de

simulación determinística y estocástica, con el propósito de mejorar la eficiencia operativa, garantizar la continuidad del flujo mina–planta y reducir los costos unitarios de transporte interno. Asimismo, se busca demostrar que la optimización de flota contribuye de manera significativa a la productividad global y al ahorro energético del sistema, sin modificar la infraestructura ni la capacidad instalada.

La tesis se estructura en cuatro capítulos principales, organizados de forma secuencial para brindar una comprensión completa del problema, los fundamentos teóricos, la metodología aplicada y los resultados obtenidos:

Capítulo I presenta la parte introductoria del trabajo, abordando las generalidades de la minería a tajo abierto y la importancia estratégica del proceso de carguío y acarreo. Se describe el problema de investigación asociado a la ineficiencia en la asignación de flota, se formulan los objetivos general y específicos, y se plantean las hipótesis de trabajo, que postulan que la aplicación de modelos de simulación híbrida permitirá optimizar la producción y reducir los costos unitarios del sistema de transporte. Finalmente, se incluyen los antecedentes nacionales e internacionales que sustentan el marco referencial del estudio.

Capítulo II desarrolla el marco teórico y conceptual, exponiendo los fundamentos de la gestión de flota en minería a tajo abierto, los principios del carguío y acarreo, y los conceptos de simulación determinística y estocástica. Asimismo, se detallan los indicadores clave de desempeño (KPIs) empleados para evaluar la productividad, los tiempos de ciclo, la utilización de equipos y los costos unitarios.

Capítulo III presenta el desarrollo del trabajo de investigación, describiendo la unidad de estudio, la recopilación y procesamiento de los datos operativos, así como la metodología empleada para la construcción y calibración de los modelos de simulación. Se explican los escenarios simulados, el análisis de sensibilidad al número de camiones, las políticas de despacho y la evaluación técnico–económica que permite cuantificar el impacto de la optimización sobre los costos y el consumo energético.

Capítulo IV expone el análisis y la discusión de los resultados, comparando el comportamiento operativo entre el escenario base y los escenarios optimizados. Se incluyen tablas y gráficos que muestran los indicadores de producción, tiempos de ciclo y costos, además de la validación estadística de las hipótesis mediante pruebas de significancia realizadas en Minitab. Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones derivadas del estudio, demostrando la viabilidad técnica y económica de la optimización de flota mediante simulación híbrida.

Capítulo I. Parte introductoria del trabajo

1.1 Descripción del problema de investigación

La minería peruana a tajo abierto constituye uno de los pilares más relevantes de la economía nacional, siendo fuente principal de inversión, empleo y generación de divisas. Su sostenibilidad depende, en gran medida, de la eficiencia de sus operaciones productivas y del uso racional de los recursos energéticos y tecnológicos. En este contexto, el sistema de carguío y acarreo representa uno de los procesos más determinantes del costo total de operación, pudiendo llegar a representar hasta el 60 % de los costos operativos directos.

La correcta asignación de camiones dentro del circuito de acarreo es esencial para mantener la continuidad operativa y cumplir las metas de producción planificadas. Una distribución ineficiente de la flota genera cuellos de botella en los puntos de carga y descarga, incremento de los tiempos de ciclo, subutilización de equipos y sobrecostos logísticos y energéticos. Estos efectos se acentúan cuando las distancias de transporte son variables, las pendientes son pronunciadas o cuando existe interacción entre varios frentes de minado con capacidades y condiciones operativas distintas.

En la operación analizada, las actividades de carguío y acarreo se desarrollan principalmente en dos zonas de producción denominadas Tajo A y Tajo B que comparten la misma chancadora primaria y una red común de rampas de transporte. El Tajo A corresponde al frente objeto de optimización en esta investigación. Se caracteriza por rampas de acarreo de aproximadamente 3,0 a 3,5 km de longitud y pendientes de 7 % a 9 %, lo que permite tiempos de ciclo promedio de 37 a 39 minutos. Los camiones operan con capacidades nominales cercanas a 230 t, alcanzando velocidades medias de 25 km/h cargados y 30 km/h vacíos. Los equipos de carguío palas eléctricas y cargadores frontales presentan productividades de 45 a 55 kilotoneladas por día, con disponibilidad mecánica del 91 % y utilización efectiva del 86 %. Sin embargo, esta zona enfrenta limitaciones

temporales por ventanas de voladura y evacuaciones de seguridad, que interrumpen la continuidad de transporte y reducen la estabilidad de producción.

Por otro lado, el Tajo B constituye el frente de referencia o apoyo. Posee rampas de 5,0 a 5,5 km, con pendientes de 9 % a 11 %, y concentra el mayor volumen de material transportado hacia la planta. Sus tiempos de ciclo son más prolongados entre 46 y 48 minutos y su operación presenta un flujo constante de camiones con altas tasas de utilización. Las limitaciones principales de este frente se asocian al mayor recorrido de acarreo, la congestión en rampas y las demoras en los puntos de descarga, que influyen en el rendimiento global del sistema.

Ambos tajos forman parte de un sistema de transporte integrado mina-planta, en el cual la asignación dinámica de camiones busca equilibrar la alimentación de mineral y optimizar la utilización de la flota disponible. En condiciones normales, el Tajo B aporta la mayor proporción de mineral alimentado a la planta, mientras que el Tajo A funciona como frente complementario cuya eficiencia depende de la disponibilidad de camiones y de la coordinación con el frente principal. No obstante, las diferencias geométricas, de distancia y de capacidad operativa entre ambos tajos generan desequilibrios en la asignación de flota y limitan el cumplimiento sostenido de las metas de producción. Esta situación plantea la necesidad de analizar, mediante herramientas de simulación, distintos escenarios de operación que permitan identificar la configuración óptima de camiones y las políticas de asignación que garanticen un desempeño eficiente del sistema de acarreo.

A pesar del impacto económico del transporte interno, en muchas operaciones la planificación de flota se sigue realizando mediante modelos determinísticos simples o decisiones basadas en la experiencia del personal, sin incorporar la variabilidad real de la operación. Este enfoque tiende a subestimar los tiempos de espera, la disponibilidad mecánica, la congestión en rutas y los efectos de topografía variable, generando desviaciones entre la producción planificada y la real.

En los últimos años, la simulación discreta de eventos ha demostrado ser una herramienta efectiva para analizar y optimizar el acarreo minero, permitiendo representar

de manera realista la interacción entre variables técnicas y logísticas. La combinación de modelos determinísticos que reproducen condiciones planificadas con modelos estocásticos que incorporan la variabilidad operativa y la incertidumbre posibilita evaluar de forma integral la productividad, los tiempos de ciclo y los costos de transporte.

Sin embargo, en el ámbito nacional la aplicación de estas metodologías sigue siendo limitada, y son escasos los estudios que validen su utilidad bajo condiciones reales de mina. Esta brecha de conocimiento impide cuantificar con precisión los beneficios económicos derivados de la optimización de flota.

En este contexto, la presente investigación tiene como finalidad optimizar la asignación de camiones en el Tajo A mediante la aplicación combinada de simulación determinística y estocástica, con el propósito de mejorar la eficiencia operativa, garantizar la continuidad de alimentación a planta y reducir los costos unitarios de acarreo.

De manera específica, surgen las siguientes interrogantes que orientan el desarrollo del estudio:

¿Cómo influye la aplicación de modelos de simulación determinística y estocástica en la eficiencia del sistema de acarreo respecto al método tradicional de asignación fija de camiones?

¿En qué medida la optimización de la asignación de flota contribuye a reducir los tiempos de ciclo y las colas en los puntos de carga y descarga, mejorando la continuidad de la operación?

¿Qué impacto económico genera la optimización de la asignación de camiones en los costos unitarios de acarreo, considerando la disponibilidad mecánica, el consumo de combustible y la productividad global del sistema?

Responder a estas interrogantes permitirá determinar, con evidencia técnica y bajo condiciones reales de mina, si la aplicación de modelos híbridos de simulación constituye una alternativa viable, eficiente y económicamente sostenible para optimizar el sistema de acarreo en la minería a tajo abierto peruana.

1.2 Objetivo

1.2.1 Objetivo general

Optimizar la asignación de camiones en el Tajo A, priorizando zonas de alta ley, para asegurar el cumplimiento de la producción mediante la aplicación de simulación estocástica y determinística.

1.2.2 Objetivos específicos

Evaluar la productividad actual de los tajos A y B, identificando limitaciones y oportunidades de mejora en la asignación de camiones.

Implementar modelos de simulación estocástica y determinística para evaluar escenarios de asignación de camiones y su impacto en la producción.

Cuantificar el impacto económico de las estrategias de asignación de camiones, estimando el potencial ahorro en costos operativos asociados al acarreo mediante la optimización de rutas, reducción de tiempos muertos y mejora en el rendimiento de la flota.

1.3 Hipótesis

1.3.1 Hipótesis general

La aplicación de modelos de simulación estocástica y determinística en la asignación de camiones permitirá optimizar la producción del Tajo A, logrando cumplir las metas físicas de producción, mediante un mejor aprovechamiento del rendimiento y disponibilidad de los equipos de carguío y acarreo.

1.3.2 Hipótesis específicas

- La evaluación individual de los tajos A y B permitirá identificar los principales cuellos de botella que afectan la asignación de camiones y la producción.
- La aplicación de simulación estocástica y determinística permitirá analizar la variabilidad de los ciclos de acarreo y generar escenarios más eficientes de asignación de camiones.
- La optimización de la asignación de camiones reducirá los costos operativos unitarios del acarreo, mejorando la rentabilidad y sostenibilidad económica de la operación minera.

1.4 Operacionalización de variables

1.4.1 *Variable independiente (V.I)*

X1: Estrategia de asignación de camiones mediante modelos de simulación.

1.4.2 *Variable dependiente (V.D)*

- Y1: Rendimiento horario (t/h)
- Y2: Tiempo total de ciclo (min/viaje)
- Y3: Costo de acarreo (USD/t)

Tabla 1

Matriz de consistencia

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLE	INDICADORES
<p>Problema general ¿De qué manera la actual asignación de camiones en el Tajo A limita el cumplimiento sostenido de la producción de finos en la operación minera?</p>	<p>Objetivo general Optimizar la asignación de camiones en el Tajo A, priorizando zonas de alta ley, para cumplir la meta de producción mediante simulación determinística y estocástica.</p>	<p>Hipótesis general La aplicación de modelos de simulación determinística y estocástica en la asignación de camiones permitirá optimizar la producción del Tajo A y cumplir las metas físicas de 320 kt de Cu fino.</p>	<p>Y0: Dependiente / Efecto</p> <p>Producción de finos (kt) y productividad global de la operación.</p>	<p>Producción de finos (kt)</p> <p>Variación entre producción real y simulada</p>
<p>Problema específico 1 ¿Qué deficiencias presenta la productividad de los Tajos A y B y qué restricciones operativas influyen en la ineficiencia del sistema de acarreo?</p>	<p>Objetivo específico 1 Evaluar la productividad actual de los tajos A y B, identificando limitaciones y oportunidades de mejora en la asignación de camiones.</p>	<p>Hipótesis específico 1 La evaluación individual de los tajos A y B permitirá identificar los principales cuellos de botella que afectan la asignación de camiones y la producción.</p>	<p>X1: Independiente / Causa</p> <p>Estrategias de asignación de camiones mediante modelos de simulación.</p>	<p>Y1: Dependiente / Efecto</p> <p>Productividad de camiones: toneladas movidas por día y rendimiento (t/h).</p> <p>Rendimiento promedio de camiones (t/h)</p>
<p>Problema específico 2 ¿Qué limitaciones existen en el análisis de escenarios de asignación de camiones que dificultan la toma de decisiones operativas en el sistema de acarreo?</p>	<p>Objetivo específico 2 Implementar modelos de simulación determinística y estocástica para analizar escenarios de asignación y su impacto en la producción y utilización de la flota.</p>	<p>Hipótesis específico 2: La aplicación de simulación determinística y estocástica permitirá analizar la variabilidad de los ciclos de acarreo y generar escenarios de asignación más eficientes.</p>	<p>Y2: Dependiente / Efecto</p> <p>Eficiencia operativa de los escenarios simulados: tiempos de ciclo, colas y utilización de equipos.</p>	<p>% de reducción de tiempos muertos</p> <p>% de utilización de equipos de carguío y acarreo</p>
<p>Problema específico 3 ¿Cómo la inadecuada asignación de camiones incide en el incremento del costo operativo del acarreo y en la eficiencia económica de la operación minera?</p>	<p>Objetivo específico 3 Cuantificar el impacto económico de las estrategias de asignación de camiones, estimando el ahorro en costos operativos asociado al acarreo mediante la optimización de rutas y reducción de tiempos muertos.</p>	<p>Hipótesis específico 3 La optimización de la asignación de camiones reducirá los costos operativos unitarios del acarreo, mejorando la rentabilidad y sostenibilidad económica de la operación.</p>	<p>Y3: Dependiente / Efecto</p> <p>Costo operativo unitario del acarreo (USD/t transportada).</p>	<p>Costo unitario de acarreo (USD/t)</p> <p>Ahorro porcentual respecto al escenario base</p>

Nota: Fuente elaboración propia.

1.5 Antecedentes referenciales

1.5.1 Antecedentes internacionales

Yeganejoua, Hashemzadeh y Moradzadeh (2022). "Integration of Simulation and Dispatch Systems for Open-Pit Fleet Productivity". Los autores integraron modelos de simulación discreta de eventos con sistemas de despacho dinámico para optimizar la productividad de flotas en minas a cielo abierto. El estudio comparó criterios de asignación basados en prioridad y disponibilidad de equipos, demostrando que la asignación dinámica puede reducir los tiempos de espera en más del 12 % y disminuir las distancias recorridas en vacío. Este antecedente evidencia que las reglas adaptativas de despacho tienen un impacto directo en la eficiencia de acarreo, enfoque adoptado también en el presente trabajo.

Instituto de Investigación Minera de Irán (2024). "Dynamic Truck Allocation through Discrete Event Simulation". La investigación desarrolló un modelo dinámico de asignación de camiones basado en simulación discreta, comparando escenarios de asignación fija frente a dinámica e incorporando factores estocásticos como disponibilidad de equipos y tiempos variables de carga y descarga. Los resultados mostraron que la asignación dinámica incrementó la eficiencia operativa en más del 10 %, demostrando la utilidad de la simulación como herramienta para la toma de decisiones bajo incertidumbre, principio considerado en esta tesis.

Ghahremani, Jalali y Ataei (2018). "Optimization of Truck–Shovel System Using Simulation and Metaheuristic Algorithms". El estudio aplicó simulación discreta combinada con algoritmos metaheurísticos para optimizar el sistema pala–camión en la mina de cobre Songun. Los autores integraron un modelo de simulación con técnicas de búsqueda tabú y enjambre de partículas, logrando un aumento de 9 % en la producción y una reducción de 6 % en los costos operativos. Este antecedente respalda la efectividad de combinar simulación y optimización matemática, enfoque metodológico que adopta la presente investigación.

Smith (2018). "Discrete Event Simulation for Shovel–Truck System Efficiency in Coal Mining". El autor evaluó la eficiencia del sistema pala–camión en una mina de carbón mediante simulación discreta, analizando la relación entre tamaño de flota, tiempos de ciclo y rendimiento horario. Concluyó que la simulación puede reemplazar los métodos determinísticos tradicionales, al capturar la variabilidad de los procesos y generar mejoras de entre 8 % y 12 % en productividad. Este trabajo valida la utilidad de la simulación como herramienta para optimizar la planificación operativa.

Zhang, Li y Torres (2020). "Hybrid Simulation and Genetic Algorithms for Truck Allocation in Large-Scale Copper Mines". Los autores desarrollaron un modelo híbrido que combina simulación estocástica y algoritmos genéticos para la asignación óptima de camiones. Consideraron parámetros de disponibilidad, tiempos de mantenimiento y condiciones variables de tráfico, logrando incrementos de eficiencia de hasta 15 %. Este antecedente demuestra que la incorporación de técnicas evolutivas mejora la robustez del modelo, línea metodológica empleada también en el presente estudio.

Brown, Johnson y Miller (2021). "Stochastic Simulation for Operational Uncertainty in Open-Pit Haulage Systems". El estudio aplicó simulación estocástica a variables críticas del acarreo, como tiempos de tránsito, disponibilidad mecánica y velocidades de desplazamiento. Los autores concluyeron que los modelos puramente determinísticos subestiman la variabilidad operativa, mientras que los estocásticos permiten estimar intervalos de confianza en la producción y cuantificar riesgos operativos. Este antecedente sustenta conceptualmente la necesidad de incorporar la incertidumbre en el modelamiento de sistemas mineros, como plantea esta tesis.

Díaz, P., & Rojas, F. (2021). "Modelo integrado de simulación y optimización para planes mineros de mediano plazo en minería a cielo abierto." Los autores desarrollaron un modelo híbrido que combina simulación discreta y optimización matemática para mejorar la confiabilidad de los planes mineros en operaciones a tajo abierto. El enfoque permite representar la variabilidad operativa (tiempos de ciclo, disponibilidad de equipos y condiciones geotécnicas) y ajustar de manera dinámica la asignación de flota y la

secuencia de extracción. Los resultados mostraron una reducción del 8 % en la desviación producción planificada–real, evidenciando que la integración entre simulación y optimización incrementa la eficiencia del sistema y la continuidad mina–planta. Este estudio respalda la aplicación de metodologías híbridas en la optimización de flotas bajo condiciones variables, línea metodológica que adopta la presente investigación.

1.5.2 Antecedentes nacionales

Bujaico Morante y Huayanca Escobar (2023). “Simulación discreta para la optimización de flotas de acarreo en minería a tajo abierto”. El estudio aplicó simulación discreta de eventos para estimar el número óptimo de camiones requeridos en una operación de cobre a cielo abierto. Utilizando Arena Simulation, los autores modelaron tiempos de carga, descarga y tránsito, concluyendo que la simulación permite capturar la variabilidad de los ciclos y anticipar necesidades reales de flota. Este antecedente refuerza el uso de la simulación como herramienta de análisis y optimización, fundamento del presente trabajo.

Pérez (2019). “Determinación del número óptimo de camiones en operaciones mineras mediante simulación discreta”. El autor modeló el proceso de acarreo considerando distancias, capacidades de carga y velocidades promedio, identificando los puntos de saturación de las palas y colas en los puntos de descarga. Sus resultados mostraron que una relación equilibrada pala–camión puede incrementar la productividad global en 12 % y reducir los tiempos de espera. Este antecedente guarda relación directa con el objetivo de optimizar la asignación de flota planteado en la presente investigación.

Vargas (2020). “Análisis de rutas y distancias de acarreo en la productividad de camiones mineros mediante simulación”. El autor evaluó, mediante simulación, distintos escenarios de transporte en función de pendientes, radios de giro y puntos de congestión. Determinó que la redistribución de camiones según la longitud y condición de las vías puede mejorar la eficiencia operativa hasta en 8 %. Este trabajo resalta la importancia de la gestión dinámica de rutas, criterio incorporado en la simulación de escenarios de esta tesis.

García y Huamán (2021). “Aplicación de simulación estocástica para la evaluación de la confiabilidad operativa en flotas de acarreo minero”. El estudio empleó simulación estocástica para modelar la variabilidad de los tiempos de carga, descarga y tránsito en una flota de acarreo. Los autores lograron analizar el impacto de la incertidumbre sobre la producción diaria y la continuidad de alimentación a planta, demostrando que esta metodología permite evaluar la confiabilidad y estabilidad operativa del sistema. Este antecedente valida el uso combinado de simulación determinística y estocástica adoptado en la presente investigación.

Capítulo II. Marcos teórico y conceptual

2.1 Marco Teórico

2.1.1 *Fundamentos de la gestión de flota en minería a tajo abierto*

La gestión de flota en minería a tajo abierto comprende el conjunto de actividades destinadas a planificar, coordinar y controlar el uso de los equipos de carguío y acarreo, con el fin de garantizar la continuidad operativa, maximizar la productividad y minimizar los costos unitarios de transporte. Dentro del ciclo de minado, estas operaciones son determinantes para el cumplimiento de los planes de producción, pues constituyen el vínculo directo entre la extracción y el procesamiento del mineral.

En términos generales, el sistema de transporte mina–planta está conformado por dos etapas principales:

- El carguío, encargado de extraer y depositar el material en las unidades de transporte.
- El acarreo, responsable del traslado del material hasta los puntos de descarga definidos (chancadora, botadero o stockpile).

Ambas etapas están estrechamente interrelacionadas: una deficiencia en cualquiera de ellas repercute directamente en la otra. Por ello, la sincronización entre los equipos de carguío y acarreo es uno de los factores críticos para lograr una operación eficiente.

2.1.1.1 Operación de carguío. El carguío consiste en la remoción y carga del material fragmentado producto de la voladura hacia las unidades de transporte. Se realiza con equipos de gran capacidad diseñados para altas tasas de producción, como palas eléctricas de cable, palas hidráulicas o cargadores frontales de neumáticos.

Los principales parámetros que determinan el rendimiento del carguío son:

- Capacidad nominal de la cuchara o balde (m^3).
- Factor de llenado efectivo (0.8–0.9 en promedio), que indica el porcentaje real de aprovechamiento del balde.

- Tiempo de ciclo de carga (30–45 segundos en palas eléctricas; 40–60 segundos en palas hidráulicas).
- Tasa de producción por equipo (5 000 – 12 000 t/h, dependiendo del tipo y tamaño del equipo y la densidad del material).

Las palas eléctricas de cable se utilizan comúnmente en minas de gran escala debido a su alta capacidad y bajo costo operativo por tonelada movida. Las palas hidráulicas, aunque de menor tamaño, ofrecen mayor movilidad y rapidez en la maniobra, siendo ideales para zonas de geometría variable o tajos múltiples. Los cargadores frontales complementan las operaciones de carguío en labores auxiliares, como el manejo de mineral de alta ley, el repaso de taludes o el carguío de material en rampas estrechas.

La eficiencia de un equipo de carguío se mide por su utilización efectiva (porcentaje de tiempo realmente dedicado a cargar camiones respecto al tiempo total disponible), que en operaciones modernas oscila entre 70 % y 85 %. Los factores que reducen la eficiencia incluyen tiempos de espera por camiones, mantenimiento no planificado y demoras en la conformación del frente de carga.

2.1.1.2 Operación de acarreo. El acarreo es la etapa de transporte del material cargado desde el frente de minado hasta el destino final. Constituye la operación más costosa dentro del ciclo minero, pudiendo representar hasta el 60 % del costo total de operación (Moradi-Afrapoli & Askari-Nasab, 2017). Se realiza principalmente mediante camiones mineros de gran capacidad, que varían según la escala de la operación:

Tabla 2

Camiones mineros típicos

TIPO DE CAMIÓN	CAPACIDAD NOMINAL (t)	APLICACIÓN TÍPICA	VELOCIDAD PROMEDIO (km/h)
Rígido mediano: (Komatsu HD785, CAT 777)	90–100	Operaciones medianas, rampas cortas	25–35
Rígido grande: (Komatsu 830E, CAT 793)	200–240	Operaciones de gran escala	30–40
Ultra-class: (Komatsu 930E, CAT 797F, Liebherr T284)	290–400	Grandes minas de cobre u oro	35–45

Nota: Fuente elaboración propia.

El rendimiento del acarreo depende del tiempo de ciclo, compuesto por:

- Tiempo de carga (T_1) – duración del proceso de llenado del camión.
- Tiempo de acarreo cargado (T_2) – desplazamiento del material hacia el punto de descarga.
- Tiempo de descarga (T_3) – vaciado del material en chancadora o botadero.
- Tiempo de retorno vacío (T_4) – regreso del camión al frente de carga.

La suma de estos componentes define el tiempo total de ciclo ($T_t = T_1 + T_2 + T_3 + T_4$). Un camión promedio en una operación de cobre a cielo abierto puede realizar 5 a 7 ciclos por hora, dependiendo de la distancia (1.5–5.0 km), la pendiente y la congestión de las vías.

El rendimiento horario (Qh) se expresa mediante la ecuación:

$$Qh = \frac{C \times F \times N}{Tt}$$

Donde:

C = Capacidad nominal del camión (t).

F = Factor de llenado (0.85–0.95).

N = Número de ciclos por hora.

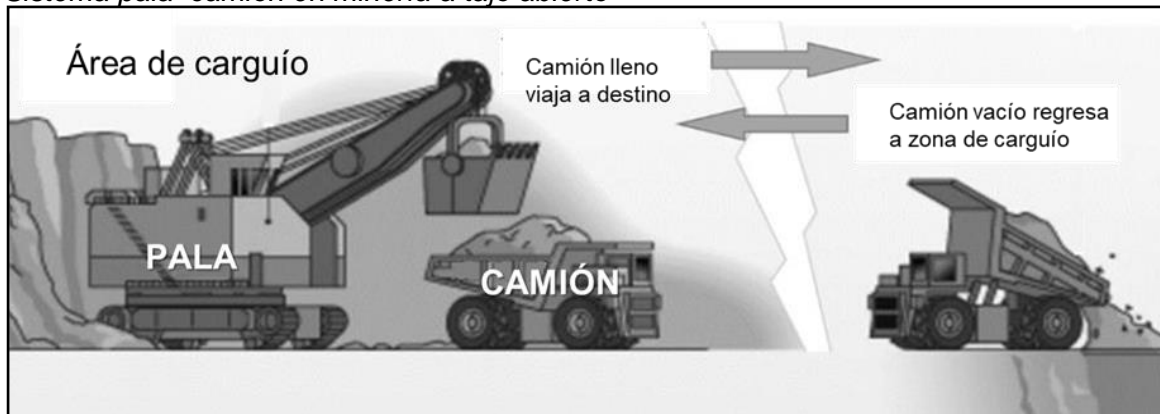
Tt = Tiempo total del ciclo (h).

La productividad efectiva de la flota se maximiza cuando se logra una relación óptima pala–camión, usualmente en el rango de 4 a 6 camiones por pala, según el tipo de equipo y las distancias de transporte. Un exceso de camiones genera esperas innecesarias; una cantidad insuficiente, tiempos muertos en las palas.

El factor de utilización de flota (tiempo operativo / tiempo disponible) suele encontrarse entre 75 % y 90 % en operaciones de alto rendimiento. La disponibilidad mecánica de los camiones modernos (CAT 793, Komatsu 830E, Liebherr T284) supera el 90 %, gracias a programas de mantenimiento predictivo y monitoreo telemático.

Figura 1

Sistema pala–camión en minería a tajo abierto



Nota: Fuente proyecto minero.

2.1.1.3 Factores que condicionan la eficiencia del sistema pala–camión.

La eficiencia global del acarreo depende de la interacción entre los equipos de carguío y transporte. Los principales factores que la condicionan son:

- **Diseño geométrico de las rampas:**

Pendientes superiores al 10 % aumentan el consumo de combustible y reducen la velocidad media.

- **Longitud de acarreo:**

Distancias mayores a 4 km incrementan el tiempo de ciclo de manera no lineal.

- **Condición de las vías:**

La rugosidad y el mantenimiento deficiente pueden aumentar el tiempo de retorno en hasta 15 %.

- **Secuencia de minado:**

La disposición de los frentes de carga afecta la eficiencia de asignación de flota.

- **Tiempo de cola:**

Generado por la espera en puntos de carga o descarga, es uno de los principales responsables de pérdidas de productividad.

- **Disponibilidad de flota y paradas no programadas:**

Influyen directamente en la tasa de utilización.

La gestión moderna de flota se apoya en sistemas de despacho digital (Fleet Management Systems, FMS), que recopilan información en tiempo real de cada camión y pala mediante GPS, sensores de carga y telemetría. Esta información permite analizar los Key Performance Indicators (KPIs), entre ellos el tiempo de ciclo, utilización, consumo de combustible y eficiencia energética, facilitando la toma de decisiones en tiempo real.

2.1.1.4 Eficiencia energética y sostenibilidad. El acarreo es también la etapa de mayor consumo energético del proceso minero. Un camión ultra-class puede consumir entre 200 y 400 L/h de diésel, lo que representa un costo significativo y una fuente importante de emisiones de CO₂. En los últimos años, la tendencia hacia flotas híbridas o eléctricas ha cobrado fuerza, buscando reducir los costos de combustible y las emisiones ambientales.

Optimizar el tiempo de ciclo y minimizar los trayectos en vacío no solo mejora la productividad, sino que también disminuye el consumo de energía por tonelada transportada, contribuyendo a la sostenibilidad operativa. Este enfoque integral de eficiencia productiva y energética es coherente con los estándares ESG (Environmental, Social and Governance) que actualmente rigen la industria minera global.

2.1.2 Simulación aplicada a la minería a tajo abierto

La simulación es una herramienta de análisis que permite reproducir virtualmente el comportamiento dinámico de un sistema minero, utilizando modelos matemáticos y computacionales. En minería a tajo abierto, su principal aplicación radica en evaluar y optimizar los procesos de carguío y acarreo, permitiendo identificar cuellos de botella, estimar la productividad de la flota y predecir el impacto de modificaciones operativas sin interferir con la producción real.

El objetivo de un modelo de simulación es representar con fidelidad el flujo de materiales y recursos (camiones, palas, rampas, chancadora), capturando tanto los parámetros operativos promedio como la variabilidad natural de la operación. Esto hace posible analizar el desempeño del sistema bajo diferentes configuraciones de flota, distancias, pendientes y estrategias de asignación.

El objetivo de un modelo de simulación es representar con fidelidad el flujo de materiales y recursos (camiones, palas, rampas, chancadora), capturando tanto los parámetros operativos promedio como la variabilidad natural de la operación. Esto hace posible analizar el desempeño del sistema bajo diferentes configuraciones de flota, distancias, pendientes y estrategias de asignación.

2.1.2.1 Fundamentos de la simulación discreta de eventos. La simulación discreta de eventos (Discrete Event Simulation, DES) es la técnica más utilizada en minería, debido a que los procesos mineros ocurren de forma discontinua y están compuestos por un conjunto de eventos secuenciales (inicio de carga, fin de carga, inicio de acarreo, descarga, retorno, etc.). Cada evento ocurre en un instante específico de tiempo y cambia el estado del sistema.

El modelo de simulación discreta utiliza un reloj lógico de simulación que avanza de un evento a otro, registrando cambios en las colas, utilización de equipos y tiempos de espera. Este enfoque permite medir el rendimiento del sistema a lo largo del tiempo y analizar el comportamiento emergente que resulta de la interacción entre múltiples variables operativas.

Entre las ventajas de la simulación discreta destacan:

- Permite analizar sistemas complejos e interdependientes (pala–camión–chancadora).
- Evalúa el impacto de la variabilidad en la eficiencia operativa.
- Facilita el análisis de sensibilidad ante cambios en parámetros como distancias o número de equipos.
- Proporciona un entorno seguro para experimentar virtualmente sin afectar la operación real.

Por estas razones, la simulación discreta constituye el núcleo metodológico de la presente investigación, al ser la técnica que mejor representa la dinámica de los procesos de acarreo en minas a cielo abierto.

2.1.2.2 Tipos de simulación aplicados al acarreo. En la industria minera se emplean principalmente dos enfoques de simulación:

2.1.2.2.1 Simulación determinística. Modela el sistema bajo condiciones fijas y conocidas, utilizando valores promedio de los parámetros operativos. Su principal utilidad es construir un escenario base o planificado, que sirve como referencia para comparar escenarios alternativos. Aunque su precisión depende de la estabilidad del sistema, su ventaja radica en la facilidad de calibración y en que permite establecer relaciones causales directas entre las variables.

2.1.2.2.2 Simulación estocástica. Incorpora la incertidumbre operacional mediante la asignación de distribuciones de probabilidad a las variables clave del proceso, tales como los tiempos de carga, descarga, tránsito y paradas no programadas. Este enfoque genera un conjunto de resultados posibles no un único valor y permite calcular intervalos de confianza estadísticos.

La simulación estocástica es particularmente útil en la minería moderna, donde factores como el clima, las condiciones del terreno o la disponibilidad mecánica producen fluctuaciones inevitables en el rendimiento de la flota. Por ello, su incorporación permite estimar la variabilidad real de la operación y cuantificar el riesgo asociado a cada escenario (Huayanca et al., 2023).

2.1.2.3 Construcción, calibración y validación del modelo. El proceso de desarrollo de un modelo de simulación en minería se compone de tres etapas fundamentales:

2.1.2.3.1 Construcción del modelo conceptual. Se define la estructura lógica del sistema, identificando las entidades (camiones, palas, rutas, chancadora), los recursos y los flujos de material. Se determinan los parámetros de entrada y las relaciones de precedencia entre los eventos.

2.1.2.3.2 Calibración del modelo. Consiste en ajustar los parámetros del modelo de simulación para que los resultados representen fielmente el comportamiento real de la operación. Se utilizan datos históricos de la mina (tiempos promedio, distancias,

disponibilidad, rendimientos) y se comparan con los resultados simulados, ajustando iterativamente los valores hasta lograr coherencia operativa.

2.1.2.3.3 Validación del modelo. Una vez calibrado, el modelo se valida contrastando los resultados obtenidos con datos reales de producción, rendimiento o tiempos de ciclo. La validación confirma que el modelo reproduce el sistema real con un nivel aceptable de precisión, garantizando la confiabilidad de los resultados futuros.

Las métricas más comunes utilizadas en validación son la correlación estadística entre producción simulada y real, el error porcentual medio (MAPE), y la comparación gráfica de tendencias operativas.

2.1.2.4 Distribuciones de probabilidad utilizadas en minería. En la simulación estocástica, la selección de la distribución de probabilidad adecuada para cada variable es esencial para representar correctamente la variabilidad del sistema. En minería a tajo abierto, las más utilizadas son:

Tabla 3

Distribuciones recomendadas por tipo de variable

VARIABLE	DISTRIBUCIÓN RECOMENDADA	JUSTIFICACIÓN
Tiempos de carga y descarga	Normal o Lognormal	Representan variabilidad natural del operador y condiciones del frente.
Tiempos de tránsito (cargado y vacío)	Triangular o Beta	Permiten definir valores mínimo, máximo y más probable según topografía y tráfico.
Disponibilidad mecánica	Binomial o Bernoulli	Representa estados de operación (disponible/no disponible).
Retrasos por congestión o mantenimiento	Exponencial o Poisson	Modelan eventos aleatorios con frecuencia conocida.
Factor de llenado	Uniforme o Normal truncada	Simula variación del volumen cargado por ciclo.

Nota: Fuente elaboración propia.

La correcta caracterización estadística de estas variables garantiza que el modelo reproduzca con mayor precisión la dispersión observada en la operación real. En la práctica, estas distribuciones se definen a partir de históricos de flota y reportes de despacho, procesados mediante herramientas de ajuste estadístico como Arena Input Analyzer, Minitab o Stat Fit.

2.1.2.5 Beneficios y limitaciones de la simulación. Entre los principales beneficios de aplicar simulación en minería destacan:

- Permite analizar sistemas complejos sin interferir con la producción.
- Facilita la toma de decisiones operativas y estratégicas mediante la comparación de escenarios.
- Reduce costos al evitar pruebas empíricas costosas.
- Proporciona una base cuantitativa para la planificación de flota y evaluación de inversiones.

Sin embargo, la simulación presenta limitaciones asociadas a la calidad y disponibilidad de los datos de entrada, así como a la experiencia del modelador. Modelos excesivamente simplificados pueden subestimar la variabilidad del sistema, mientras que modelos demasiado complejos pueden ser difíciles de calibrar. Por ello, el éxito de una simulación depende del balance entre realismo y manejabilidad del modelo.

2.1.2.6 Aplicaciones prácticas en la industria minera. La simulación ha sido utilizada en diversos estudios para mejorar la eficiencia de la flota minera. Yeganejoua et al. (2022) integraron modelos de simulación y despacho dinámico para optimizar rutas y reducir tiempos muertos; Ghahremani et al. (2018) combinaron simulación con algoritmos de optimización metaheurística para maximizar la productividad; y Bujaico y Huayanca (2023) demostraron que los modelos discretos de simulación permiten ajustar la cantidad óptima de camiones requeridos para cumplir con la producción planificada.

En la actualidad, las minas de gran escala utilizan plataformas avanzadas de simulación como Arena, Talpac, SimMine, Minehual y Orchestra, integradas a sus sistemas de despacho (Fleet Management Systems). Estas herramientas permiten evaluar la sensibilidad de la producción frente a diferentes configuraciones operativas y probar estrategias de asignación de camiones antes de su implementación real.

2.1.3 Integración de simulación con despacho dinámico y optimización

La integración de la simulación con modelos de despacho dinámico y algoritmos de optimización representa uno de los avances más significativos en la gestión moderna de

flotas mineras. Este enfoque combina la capacidad de la simulación para representar el comportamiento real del sistema con la potencia analítica de la optimización, que busca determinar las decisiones operativas más eficientes en tiempo real.

En la minería a tajo abierto, el sistema de despacho dinámico actúa como el “cerebro operativo” de la flota, asignando y reasignando camiones a diferentes frentes o destinos en función de la demanda, la disponibilidad de equipos y el estado actual de las rutas. La simulación, en este contexto, permite evaluar cómo dichas decisiones impactan la productividad, la utilización de equipos y los costos de acarreo.

2.1.3.1 Principios del despacho dinámico. A diferencia de los sistemas tradicionales de asignación estática donde las rutas y destinos se planifican al inicio del turno, el despacho dinámico actualiza constantemente las decisiones de asignación de camiones con base en el estado instantáneo del sistema.

El proceso se sustenta en tres componentes principales:

- Adquisición de datos en tiempo real, mediante sensores, GPS y telemetría instalados en los equipos.
- Procesamiento de información en un sistema centralizado (Fleet Management System, FMS), que analiza la localización, disponibilidad, tiempos de carga, colas y distancias.
- Toma de decisiones automática, en la que el sistema determina a qué frente o destino debe dirigirse cada camión, priorizando la eficiencia global.

Entre los sistemas más utilizados en minería destacan:

- CAT MineStar (Caterpillar)
- Modular Mining Dispatch (Komatsu)
- Wenco FMS (Hitachi)
- Jigsaw (Hexagon Mining)

Estos sistemas optimizan el flujo de material, minimizan tiempos muertos y reducen la variabilidad entre el plan y la ejecución. En promedio, su implementación puede

incrementar la productividad entre 5 % y 15 %, dependiendo de la madurez operacional y la complejidad de la mina (Moradi-Afrapoli & Askari-Nasab, 2017).

2.1.3.2 Integración entre simulación y despacho dinámico. La simulación permite analizar y prever los efectos de las decisiones tomadas por el sistema de despacho antes de aplicarlas en campo. A través de un modelo virtual, es posible reproducir el comportamiento del sistema FMS bajo distintos criterios de asignación (por ejemplo, prioridad de chancadora, reducción de colas o maximización de la utilización de palas).

Esta integración se realiza de dos formas:

- **Simulación como entorno de prueba (offline simulation):**

El modelo replica el sistema real y evalúa los resultados de distintas estrategias de despacho antes de implementarlas.

- **Simulación en línea (online simulation):**

El modelo está conectado al FMS y recibe datos en tiempo real, ajustando sus parámetros continuamente para predecir el desempeño del sistema y recomendar acciones.

El valor de esta integración radica en su capacidad de validar las políticas de asignación de camiones sin afectar la operación real, permitiendo un aprendizaje continuo del sistema y la calibración de las reglas de despacho.

2.1.3.3 Enfoques de optimización aplicados a la asignación de camiones.

La optimización busca determinar la mejor configuración de asignación de flota que minimice los tiempos de ciclo y los costos, o maximice la producción total bajo un conjunto de restricciones (distancias, disponibilidad, capacidad, leyes del mineral, etc.).

Existen tres enfoques principales:

2.1.3.3.1 Optimización determinística. Se basa en algoritmos de programación lineal o entera mixta (MILP) que buscan una solución exacta al problema de asignación, considerando parámetros fijos. Su limitación es que requiere estabilidad en las condiciones del sistema, lo que rara vez ocurre en minería.

2.1.3.3.2 Optimización heurística. Utiliza reglas simples de asignación (“el camión más cercano al frente disponible”, “prioridad por ley del mineral”) que, aunque no garantizan la solución óptima, proporcionan respuestas rápidas y adaptativas. Este tipo de enfoque es el más común en sistemas de despacho comercial (MineStar, Modular, Wenco).

2.1.3.3.3 Optimización metaheurística. Aplica algoritmos inspirados en procesos naturales o sociales para explorar grandes espacios de soluciones. Entre los más utilizados destacan:

- Algoritmos genéticos (GA)
- Optimización por colonia de hormigas (ACO)
- Búsqueda tabú (Tabu Search)
- Optimización por enjambre de partículas (PSO)

Ghahremani et al. (2018) aplicaron algoritmos genéticos integrados a simulación para mejorar la asignación de camiones en la mina Songun, obteniendo incrementos del 9 % en productividad y reducciones del 6 % en costos operativos.

En el contexto de la presente investigación, la simulación desempeña el papel de entorno evaluador, mientras que las reglas de despacho y reasignación constituyen las variables de optimización. La comparación entre escenarios simulados permitirá identificar la combinación más eficiente de camiones, rutas y prioridades de descarga.

2.1.3.4 Integración operativa en la industria minera. Las minas de cobre de gran escala como Cerro Verde, Antamina y Las Bambas ya emplean la integración entre simulación y FMS para soportar decisiones operativas. Estas plataformas recogen más de 1 000 señales por camión (velocidad, posición, carga útil, consumo de combustible, paradas y tiempos de ciclo) que se procesan en centros de control.

Los modelos de simulación se utilizan para:

- Predecir el impacto de cambios en rutas o pendientes.
- Evaluar la eficiencia de asignaciones dinámicas frente a las planificadas.

- Calcular el riesgo de incumplimiento de producción bajo diferentes configuraciones de flota.

Esta sinergia entre simulación y despacho ha permitido lograr reducciones promedio del 10 % en tiempos de cola, 5 % en consumo de combustible y mejoras del 8–12 % en la utilización de camiones (Yeganejoua et al., 2022).

2.1.3.5 Ventajas de la integración simulación–despacho–optimización. Los beneficios de esta integración se resumen en los siguientes puntos:

- **Toma de decisiones basada en datos:**

La simulación valida empíricamente las decisiones generadas por el FMS antes de su implementación.

- **Reducción de la variabilidad operativa:**

El modelo estocástico ayuda a anticipar desviaciones por congestión o disponibilidad.

- **Aumento de la eficiencia global:**

La reasignación dinámica disminuye tiempos muertos y mejora la continuidad de alimentación a planta.

- **Evaluación económica inmediata:**

Permite cuantificar el ahorro en costos unitarios (USD/t) y analizar la rentabilidad de cada escenario.

- **Escalabilidad y replicabilidad:**

El modelo puede adaptarse a distintos tajos, flotas o condiciones operativas sin pérdida de precisión.

En suma, la integración de simulación, despacho dinámico y optimización constituye un pilar de la minería inteligente actual, al permitir operaciones más predecibles, eficientes y rentables.

2.1.4 Modelos de optimización y despacho en minería a tajo abierto

Los modelos de optimización y despacho buscan determinar la mejor configuración operativa para maximizar la productividad o minimizar los costos de acarreo en una

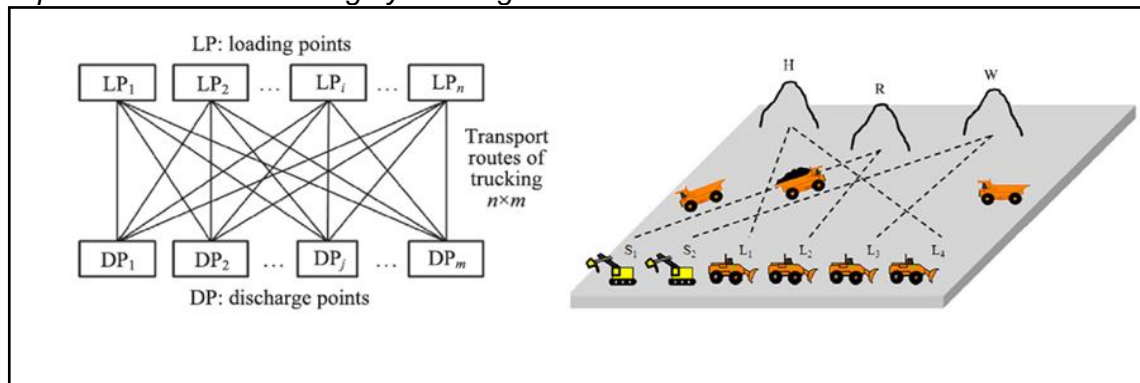
operación minera. Su aplicación en minería a tajo abierto permite definir cuántos camiones asignar a cada frente, qué rutas utilizar y cómo equilibrar la carga de trabajo de las palas, de manera que se logre una operación eficiente y sostenible.

En esencia, estos modelos se fundamentan en la teoría de la optimización combinatoria y la programación matemática, donde el sistema minero se representa mediante un conjunto de variables, parámetros y restricciones que describen las condiciones reales de la operación.

Esquema de frentes de carga y descarga.

Figura 2

Esquema de frentes de carga y descarga



Nota: Fuente proyecto minero.

2.1.4.1 Formulación general del problema de asignación de camiones. El

problema clásico de asignación óptima de camiones a frentes de carguío puede formularse como un modelo de programación lineal entera mixta (MILP), cuya estructura básica se define de la siguiente manera:

$$\text{Minimizar: } Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C_{ij} X_{ij}$$

Sujeto a:

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} = S_i \quad \forall i$$

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} = D_j \quad \forall j$$

$$X_{ij} \geq 0 \quad \text{y enteras}$$

Donde:

Z = Costo total del sistema de acarreo (objetivo a minimizar).

X_{ij} = Número de camiones asignados desde el frente i hacia el destino j .

C_{ij} = Costo unitario de transporte entre i y j (USD/t o USD/h).

S_i = Capacidad de producción del frente de carguío i (t/h).

D_j = Demanda de material del destino j (t/h).

Este modelo permite determinar la asignación óptima de flota bajo criterios económicos, considerando los costos asociados a la distancia, los tiempos de ciclo y la productividad de cada frente.

Cuando la función objetivo se orienta a maximizar la producción, se utiliza la siguiente formulación:

$$\text{Maximizar: } P = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n R_{ij} X_{ij}$$

Sujeto a las mismas restricciones, donde R_{ij} representa la tasa de producción (t/h) del par frente–destino.

2.1.4.2 Funciones objetivo en la optimización minera. En los modelos de optimización aplicados a la minería, las funciones objetivo más utilizadas son:

Minimización del costo total de acarreo (Z_1):

Considera los costos asociados al combustible, mantenimiento, neumáticos y horas de operación.

$$Z_1 = \sum_{i,j} C_{ij} X_{ij}$$

Maximización de la producción total (Z_2):

Busca lograr el mayor tonelaje transportado posible dentro de las restricciones operativas.

$$Z_2 = \sum_{i,j} R_{ij} X_{ij}$$

Minimización del tiempo total de ciclo (Z_3):

Permite mejorar la eficiencia del sistema y reducir la congestión.

$$Z_3 = \sum_{i,j} T_{ij} X_{ij}$$

Optimización multiobjetivo:

Considera los costos asociados al combustible, mantenimiento, neumáticos y horas de operación.

$$Z_1 = w_1 Z_1 - w_2 Z_2 + w_3 Z_3$$

Donde w_1, w_2, w_3 son pesos asignados a cada criterio según su prioridad.

2.1.4.3 Restricciones operativas del modelo. Para que un modelo de optimización represente fielmente una operación minera, debe incluir las restricciones técnicas y logísticas que limitan las decisiones de asignación:

Restricción de capacidad de carguío:

$$\sum_j X_{ij} \leq C_i$$

El número de camiones asignados a cada pala i no puede exceder su capacidad de carga por hora.

Restricción de disponibilidad de flota:

$$\sum_i \sum_j X_{ij} \leq N_t$$

Donde N_t es el número total de camiones disponibles durante el turno.

Restricción de demanda del destino:

$$\sum_i X_{ij} \geq D_j$$

Cada destino (chancadora o botadero) debe recibir un flujo mínimo de material.

Restricción de tiempo de ciclo:

$$T_{ij} = T_c + T_d + T_r$$

El tiempo total de ciclo depende de las etapas de carga (T_c), descarga (T_d) y retorno (T_r).

Restricciones espaciales y geotécnicas:

Consideran las longitudes de ruta, pendientes y condiciones de seguridad, que limitan el número máximo de camiones por vía o frente activo.

Restricciones de mantenimiento y disponibilidad mecánica:

Se modelan como parámetros de disponibilidad promedio (por ejemplo, $A_t=0.92$), ajustando la capacidad operativa efectiva de la flota.

Estas restricciones garantizan que el modelo proporcione soluciones viables y operativamente realistas.

2.1.4.4. Métodos de resolución. El problema de asignación de camiones es de tipo NP-duro, lo que significa que su complejidad crece exponencialmente con el número de equipos y frentes. Por ello, se utilizan distintos métodos de resolución según la escala del sistema:

Tabla 4

Métodos de resolución de la asignación pala-camión

TIPO DE MÉTODO	DESCRIPCIÓN	VENTAJAS	LIMITACIONES
Programación lineal entera (MILP)	Solución exacta del modelo mediante algoritmos simplex o branch & bound.	Precisión y reproducibilidad.	Escalabilidad limitada para grandes flotas.
Heurísticos basados en reglas	Asignación mediante reglas de prioridad (por ejemplo, "primer camión libre al frente más cercano").	Simplicidad, velocidad de cálculo.	No garantiza óptimo global.
Metaheurísticos (GA, ACO, PSO)	Búsqueda global inspirada en procesos naturales.	Capacidad de explorar soluciones complejas, cercanas al óptimo.	Requiere calibración de parámetros.
Optimización híbrida (Simulación + Heurística)	Evaluación iterativa mediante simulación y ajuste de reglas de despacho.	Alta representatividad y adaptabilidad.	Alto costo computacional.

Nota: Fuente elaboración propia.

En la presente investigación se adopta un enfoque híbrido, donde la simulación (Minehual–Orchestra) actúa como entorno evaluador y los criterios de asignación se ajustan iterativamente hasta alcanzar la combinación más eficiente entre productividad y costo operativo.

2.1.4.5 Aplicación de modelos de optimización en la industria minera. La aplicación de estos modelos se ha expandido ampliamente en la minería a tajo abierto moderna. Moradi-Afrapoli y Askari-Nasab (2017) analizaron distintos enfoques de

optimización en minas de cobre, concluyendo que la combinación de modelos de despacho dinámico y algoritmos heurísticos incrementa la eficiencia entre 8 % y 12 %. Yeganejoua et al. (2022) validaron la integración de simulación con despacho, mostrando reducciones del 10 % en tiempos de espera.

En Perú, Bujaico y Huayanca (2023) emplearon simulación discreta para determinar la cantidad óptima de camiones en una mina de cobre, logrando un mejor balance entre palas y destinos. Vargas (2020) incorporó parámetros de pendiente y longitud de ruta en su modelo, demostrando que pequeñas variaciones topográficas pueden alterar significativamente los tiempos de ciclo y el costo unitario.

Estos estudios evidencian que la optimización de flota mediante modelos de simulación y despacho no solo tiene un impacto técnico, sino también económico y estratégico, al proporcionar una herramienta de soporte para la toma de decisiones en planificación de corto y mediano plazo.

2.1.4.6 Integración de modelos de simulación y optimización en minería a cielo abierto. La integración entre modelos de simulación y optimización constituye un enfoque avanzado de apoyo a la toma de decisiones en minería a tajo abierto. Mientras la simulación permite representar de forma dinámica el comportamiento del sistema operativo incluyendo variaciones en tiempos de ciclo, disponibilidad de equipos y congestión, la optimización determina las configuraciones que maximizan o minimizan una función objetivo específica, como la productividad o el costo unitario de acarreo.

De acuerdo con el estudio Modelo Integrado de Simulación y Optimización para Planes Mineros de Mediano Plazo en Minería a Cielo Abierto (2021), la principal ventaja de este enfoque integrado radica en su capacidad para evaluar políticas de asignación y dimensionamiento de flota bajo condiciones de incertidumbre, reduciendo la brecha entre planificación y operación real.

En este contexto, la simulación estocástica reproduce la variabilidad diaria del proceso, mientras que los algoritmos de optimización ajustan las decisiones de despacho

y tamaño de flota con base en los resultados simulados. Este ciclo iterativo permite alcanzar un equilibrio operativo más eficiente, tanto en el corto como en el mediano plazo.

Figura 3

Diagrama de modelo integrado de simulación y optimización



Nota: Fuente proyecto minero.

2.1.5 Indicadores de desempeño (KPIs) y criterios de evaluación de eficiencia

Los indicadores clave de desempeño (Key Performance Indicators, KPIs) son métricas que permiten cuantificar la eficiencia y productividad del sistema de acarreo en minería a tajo abierto. Estos indicadores relacionan el rendimiento real de la operación con sus parámetros teóricos, proporcionando una base objetiva para la evaluación y comparación de escenarios simulados.

El análisis de KPIs es esencial tanto en la planificación minera como en el control operativo, ya que permite detectar desviaciones, identificar cuellos de botella y medir los

efectos de la optimización de flota en términos técnicos y económicos. En la presente investigación, los indicadores se agrupan en tres categorías: productividad, eficiencia operativa y desempeño económico.

2.1.5.1 Indicadores de productividad. Los indicadores de productividad reflejan la capacidad del sistema para mover material dentro de un periodo determinado, considerando tanto los equipos de carguío como los de acarreo.

2.2.5.1.1 Producción total (Q_t). Es el volumen total de material transportado en un periodo de tiempo (t/h o kt/mes).

$$Q_t = \frac{C \times F \times N_c \times H}{T_t}$$

Donde:

C = Capacidad nominal del camión (t),

F = Factor de llenado,

N_c = Número de camiones asignados

H = Horas operativas

T_t = Tiempo total de ciclo.

Este indicador permite comparar la producción planificada vs. simulada, validando la precisión del modelo.

2.2.5.1.2 Rendimiento horario del sistema (R_h). Representa la cantidad de material transportado por unidad de tiempo por la flota completa:

$$R_h = \sum_{i=1}^n \frac{C_i \times F_i \times N_i}{T_{ti}}$$

Es una métrica global de desempeño que resume la productividad combinada de todos los frentes activos.

2.2.5.1.3 Relación pala–camión (RPC): Indica el balance operativo entre equipos de carguío y transporte:

$$RPC = \frac{N_c}{N_p}$$

Valores óptimos se encuentran entre 4 y 6 camiones por pala, dependiendo de la distancia y los tiempos de ciclo. Relaciones fuera de ese rango indican desbalance o sobreasignación.

2.1.5.2 Indicadores de eficiencia operativa. Estos indicadores miden la capacidad del sistema para operar sin interrupciones o pérdidas de tiempo significativas. Su análisis permite identificar oportunidades de mejora en la coordinación de flota y en la gestión de mantenimiento.

- **Tiempo total de ciclo (T_t):**

Suma de los tiempos de carga, acarreo, descarga y retorno.

$$T_t = T_c + T_a + T_d + T_r$$

Este indicador define la frecuencia de los viajes y es clave para estimar la productividad potencial del sistema.

- **Utilización de equipos (U_e):**

Relación entre el tiempo en operación efectiva y el tiempo disponible.

$$U_e = \frac{T_{op}}{T_{disp}} \times 100$$

En operaciones eficientes, este valor oscila entre 75 % y 90 %.

- **Disponibilidad mecánica (D_m):**

Porcentaje de tiempo en que un equipo está disponible para operar, considerando mantenimientos y fallas.

$$D_m = \frac{T_{disp} - T_{mtto}}{T_{disp}} \times 100$$

Los camiones modernos suelen presentar disponibilidades superiores al 90 %, mientras que las palas alcanzan entre 85 % y 90 %.

- **Tiempo de cola (T_e):**

Representa los periodos en que los camiones esperan para cargar o descargar. Su reducción es uno de los objetivos principales de la optimización, dado que puede representar entre 10 % y 25 % del tiempo total del ciclo.

- **Factor de llenado (F):**

Relación entre el volumen de material realmente cargado y la capacidad nominal del camión:

$$F = \frac{Q_r}{Q_n}$$

Un valor promedio entre 0.85 y 0.95 indica eficiencia adecuada en la operación de carguío.

2.1.5.3 Indicadores económicos y energéticos. El análisis económico permite vincular la optimización técnica con su impacto en los costos operativos, que constituyen el objetivo final de eficiencia en la gestión minera. Los indicadores más relevantes son:

- **Costo unitario de acarreo (C_u):**

Representa el costo de transportar una tonelada de material, e integra los gastos de combustible, mantenimiento, neumáticos y depreciación.

$$C_u = \frac{C_{comb} + C_{mnt} + C_{neum} + C_{dep}}{Q_t}$$

Valores típicos en minas de cobre de gran escala oscilan entre 0.25 y 0.45 USD/t dependiendo de la distancia y el tipo de equipo.

- **Consumo específico de combustible (E^f):**

Expresa el consumo energético por tonelada transportada:

$$E^f = \frac{L}{Q_t}$$

Donde L es el consumo total de combustible (L/h). Camiones de clase 930E o 797F consumen entre 200 y 400 L/h, por lo que optimizar las rutas y reducir tiempos muertos puede generar ahorros significativos.

- **Costo horario de operación (C_h):**

Integra todos los costos variables y fijos asociados a un equipo en operación.

$$C_h = C_{comb} + C_{mnt} + C_{neum} + C_{MO}$$

Este indicador permite comparar escenarios simulados en términos de ahorro mensual y anual.

- **Ahorro porcentual por optimización (S):**

Mide el beneficio económico generado al aplicar las estrategias de reasignación de flota:

$$S = \frac{C_{base} - C_{opt}}{C_{base}} \times 100$$

Donde C_{base} es el costo unitario actual y C_{opt} el costo tras la simulación optimizada. Un ahorro superior al 5 % se considera económicamente relevante en minería a tajo abierto.

2.1.5.4 Interpretación integrada de KPIs. Los indicadores anteriores no deben evaluarse de forma aislada, sino como parte de un sistema de desempeño integrado. Por ejemplo:

- Un incremento en la utilización de equipos (U_e) debe reflejarse en una reducción de los tiempos de cola (T_e).
- Una disminución en el tiempo de ciclo (T_t) se traduce en mayores rendimientos horarios (R_h).
- La reducción del consumo específico de combustible (E_f) impacta directamente en el costo unitario (C_u) y en las emisiones de CO_2 .

La interpretación cruzada de estos indicadores permite identificar las causas raíz de las ineficiencias y cuantificar el efecto de las mejoras implementadas mediante simulación. Este enfoque integral asegura que los resultados no solo sean productivos, sino también económicamente sostenibles y ambientalmente coherentes.

2.2 Marco conceptual

El presente marco conceptual reúne los principales términos, categorías y conceptos operativos que sustentan la investigación. Cada definición se ha adaptado al contexto específico de la gestión de flota y simulación aplicada al acarreo en minería a tajo abierto, asegurando coherencia terminológica entre los capítulos teóricos y la metodología de análisis.

2.2.1 Simulación

Proceso analítico que permite reproducir virtualmente el comportamiento de un sistema real mediante modelos computacionales. En minería, la simulación se utiliza para representar operaciones como el carguío, transporte y descarga, evaluando su desempeño bajo distintas configuraciones de flota o condiciones operativas. Su aplicación posibilita experimentar sin riesgo ni interrupción de la producción real, facilitando la optimización de procesos complejos.

2.2.2 Simulación determinística

Tipo de simulación que asume condiciones constantes y controladas, sin variabilidad estadística. Los parámetros de entrada —como distancias, tiempos de carga, velocidades o capacidades de los equipos— permanecen fijos a lo largo del modelo. Proporciona un escenario de referencia o línea base, útil para evaluar el desempeño planificado del sistema y comparar escenarios alternativos.

2.2.3 Simulación estocástica

Modelo de simulación que incorpora la incertidumbre y variabilidad de la operación real mediante distribuciones de probabilidad aplicadas a las variables del sistema (tiempos de ciclo, demoras, disponibilidad, congestión, etc.). Permite generar intervalos de confianza y estimar la dispersión estadística de los resultados, proporcionando una visión más realista del comportamiento del sistema minero.

2.2.4 Carguío

Etapas del ciclo de minado que consiste en transferir el material fragmentado desde el frente de voladura hacia las unidades de transporte. Se realiza mediante equipos de gran capacidad como palas eléctricas, palas hidráulicas o cargadores frontales. Su eficiencia depende de la capacidad del balde, el factor de llenado, el tiempo de ciclo y la disponibilidad del frente de carga.

2.2.5 Acarreo

Operación que implica el transporte del material cargado desde el punto de extracción hasta el destino definido, ya sea la chancadora, un botadero o stockpile. Se

ejecuta principalmente mediante camiones de gran tonelaje (90–400 t), y constituye una de las fases de mayor costo energético y operativo del proceso minero. La eficiencia del acarreo depende del tiempo total de ciclo, la distancia, la pendiente y la condición de las vías.

2.2.6 Ciclo de acarreo

Secuencia completa de operaciones que realiza un camión durante un viaje típico. Está compuesto por cuatro fases: Carga, Acarreo cargado, Descarga, y Retorno vacío.

El tiempo total del ciclo (T_t) determina la frecuencia de los viajes y la productividad de la flota. Su reducción constituye uno de los principales objetivos de la optimización.

2.2.7 Despacho dinámico

Sistema de control automatizado que permite reasignar camiones en tiempo real según el estado del sistema: disponibilidad de equipos, condiciones de las rutas, colas o prioridades de alimentación. Los sistemas modernos de despacho como CAT MineStar, Modular Dispatch o Wenco integran GPS, sensores y algoritmos de optimización para mejorar la coordinación entre carguío y transporte, incrementando la utilización de equipos y reduciendo tiempos muertos.

2.2.8 Optimización

Proceso de búsqueda sistemática de la mejor solución posible dentro de un conjunto de alternativas viables, considerando restricciones técnicas, logísticas y económicas. En minería a tajo abierto, la optimización de flota busca maximizar la productividad o minimizar los costos de acarreo, determinando el número óptimo de camiones por pala, las rutas de transporte más eficientes y las políticas de asignación más rentables.

2.2.9 Eficiencia operativa

Relación entre la producción obtenida y los recursos utilizados en la operación minera. En el contexto de la gestión de flota, se expresa a través de indicadores como el tiempo de ciclo, la utilización de equipos, la disponibilidad mecánica y el factor de llenado.

Una alta eficiencia operativa implica que la flota trabaja con mínimos tiempos improductivos y máxima continuidad en el acarreo.

2.2.10 Costo unitario de acarreo

Indicador económico que refleja el costo total asociado al transporte de una tonelada de material, incluyendo consumo de combustible, mantenimiento, neumáticos, mano de obra y depreciación de equipos. Este costo constituye una de las métricas clave para evaluar el impacto financiero de la optimización, siendo objetivo directo de reducción en la presente investigación.

2.2.11 Productividad de flota

Cantidad total de material transportado por unidad de tiempo, considerando la capacidad efectiva de los equipos y la cantidad de viajes realizados. Se expresa comúnmente en toneladas por hora (t/h) o toneladas por día (t/día), y está influenciada por el número de camiones, los tiempos de ciclo y la eficiencia de carguío.

2.2.12 Disponibilidad mecánica

Porcentaje del tiempo calendario durante el cual un equipo está en condiciones de operar. Se calcula considerando los periodos de mantenimiento, reparación y falla. En camiones mineros modernos, los valores óptimos de disponibilidad mecánica oscilan entre 90 % y 95 %.

2.2.13 Utilización de equipos

Proporción del tiempo en que un equipo se encuentra efectivamente en operación respecto al tiempo disponible. Refleja la eficiencia en la programación y coordinación de la flota. En operaciones eficientes, este valor se mantiene entre 75 % y 90 %, dependiendo de la topografía y de la congestión operativa.

2.2.14 Simulación híbrida o mixta

Combinación de modelos determinísticos y estocásticos que permite analizar simultáneamente escenarios de referencia y escenarios con incertidumbre. Este enfoque proporciona una representación integral del sistema, equilibrando precisión analítica y realismo operativo. En esta investigación, la simulación híbrida constituye la base

metodológica para la evaluación y optimización del acarreo mediante las herramientas Minehual y Orchestra.

2.2.15 Indicador clave de desempeño (KPI)

Métrica cuantitativa que permite medir el rendimiento de una operación o proceso en relación con sus objetivos planificados. Los KPIs en minería de acarreo incluyen el tiempo de ciclo, la utilización de equipos, la disponibilidad mecánica, la producción de finos, el consumo de combustible y el costo unitario. Su análisis integral permite evaluar la eficacia de las estrategias de asignación y verificar la validez de los resultados simulados.

En conjunto, estos conceptos definen el marco teórico y operativo sobre el cual se estructura la investigación. Su comprensión integrada permite desarrollar un modelo de simulación y optimización que refleje las condiciones reales de la Unidad Minera X, asegurando que los resultados obtenidos sean técnicamente sólidos, económicamente rentables y metodológicamente reproducibles.

Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación

3.1 Recopilación de información

La presente investigación se centra en la optimización del sistema de acarreo en minería a tajo abierto, a partir de la simulación y análisis de escenarios de asignación de flota. El estudio tiene como propósito evaluar la productividad, eficiencia operativa y comportamiento económico de diferentes configuraciones de flota mediante modelos determinísticos y estocásticos, aplicados a un sistema pala–camión de alta capacidad.

El alcance comprende la modelación completa del ciclo de transporte: carga, acarreo cargado, descarga y retorno vacío, incluyendo los efectos de demoras operativas, disponibilidad mecánica, congestión de rutas y consumo energético.

Las fuentes de información utilizadas provienen de:

- Registros operativos técnicos de la empresa minera, incluyendo velocidades promedio, tiempos de ciclo, disponibilidades y utilización de equipos.
- Modelos internos de planificación y despacho, empleados para definir los parámetros de operación base.
- Datos estadísticos de rendimiento recopilados en sistemas de control de flota y reportes de producción, consolidados a nivel de operación.

Por motivos de confidencialidad, la información se presenta de forma agregada y anonimizada. Los valores numéricos utilizados para calibrar los modelos representan rangos promedios observados en operaciones de tajo abierto de gran escala, sin identificar fuentes específicas.

3.1.1 Unidad de estudio

La unidad de estudio corresponde a una operación minera metálica a tajo abierto de gran escala, dedicada a la extracción y procesamiento de minerales sulfurados con predominancia de cobre. La explotación se desarrolla mediante un método convencional de bancos descendentes, con un sistema de carguío mecánico y transporte en camiones de gran capacidad hacia plantas de chancado y almacenamiento intermedio.

El área operativa cuenta con:

- Frentes múltiples de minado, con variaciones topográficas que generan diferentes distancias y tiempos de acarreo.
- Infraestructura de transporte interno, conformada por rampas principales, vías auxiliares y botaderos.
- Sistema de control y monitoreo de flota, que registra en tiempo real las velocidades, colas y tiempos de ciclo de cada unidad.

El proceso de acarreo es uno de los componentes más críticos de la operación, dado que representa el mayor porcentaje del costo operativo total y condiciona la continuidad de alimentación hacia la planta concentradora.

La selección de esta unidad de estudio se justifica por:

- Su complejidad operativa, al manejar distancias variables y múltiples zonas de carga y descarga.
- Su disponibilidad de información técnica detallada, necesaria para la calibración del modelo de simulación.
- La relevancia del sistema de transporte como principal factor de optimización económica y energética dentro del ciclo minero.

De manera general, las condiciones de la operación son representativas de una mina de cobre a tajo abierto de la región andina, caracterizada por un clima estacional, topografía accidentada y rutas de acarreo de longitud media. Estas características permiten extrapolar los resultados obtenidos a otras operaciones de similares condiciones geológicas y operativas.

3.2 Caracterización del sistema de acarreo

El sistema analizado corresponde a una operación minera a tajo abierto con equipos de gran capacidad, compuesta por:

- Palas eléctricas e hidráulicas para el carguío principal.
- Camiones rígidos de alta capacidad (200–400 t) para el transporte de mineral y desmonte.

- Caminos de acarreo con longitudes variables entre 1,5 y 5 km, pendientes que oscilan entre 8 % y 12 %, y condiciones operativas mixtas según la topografía y el tipo de material.

El ciclo de acarreo incluye cuatro fases principales:

- Carga del material fragmentado con pala o cargador.
- Acarreo cargado hacia el punto de descarga (chancadora o botadero).
- Descarga controlada del material.
- Retorno vacío al frente de carga.

Los parámetros promedio observados en el sistema son:

- Velocidades efectivas de 20 a 24 km/h, ajustadas según la pendiente y tipo de vía.
- Disponibilidad mecánica de equipos entre 90 % y 93 %, dentro de los estándares internacionales.
- Utilización efectiva promedio del 85 % al 88 %.
- Tiempos de carga de 3,5 a 4 minutos y descarga de 1,5 a 2 minutos.
- Tiempos totales de ciclo en el rango de 45 a 48 minutos.

Estos valores representan las condiciones típicas de operación para una mina a tajo abierto de gran escala, y sirvieron como base para la calibración de los modelos de simulación.

3.3 Metodología general de modelado

El enfoque metodológico se fundamenta en el uso de simulación híbrida, integrando modelos determinísticos y estocásticos con el propósito de capturar tanto el comportamiento planificado como la variabilidad real del sistema de acarreo.

Etapas metodológicas:

- Caracterización del sistema operativo mediante recopilación de datos de velocidad, tiempos de ciclo, capacidad y disponibilidad de equipos.
- Diseño conceptual del modelo, definiendo entidades, flujos de materiales, colas y eventos del sistema pala–camión.

- Calibración determinística, ajustando el modelo a los valores promedio observados de producción, tiempos de ciclo y colas.
- Incorporación de variabilidad, mediante la asignación de distribuciones de probabilidad a las variables críticas.
- Ejecución de escenarios de simulación, con distintas configuraciones de flota y políticas de asignación.
- Validación técnica y estadística, comparando los resultados simulados con los registros operativos y rangos esperados del sistema.

El modelo busca representar la interacción entre disponibilidad de equipos, número de camiones, distancias de acarreo y tiempos de carga y descarga, permitiendo cuantificar su efecto sobre la productividad y los costos unitarios.

3.4 Modelos de simulación estocástica y determinística

3.4.1 Modelo determinístico (Minehaul)

El modelo determinístico se desarrolló utilizando una plataforma de simulación discreta de eventos, que permite modelar el flujo continuo de camiones entre puntos de carga y descarga bajo condiciones controladas. Su finalidad es establecer una línea base que represente el rendimiento promedio del sistema sin considerar fluctuaciones aleatorias.

3.4.1.1 Parámetros de calibración. Para la construcción del modelo determinístico se realizó una calibración de parámetros clave que reflejan el comportamiento real de la flota durante el periodo de análisis. Estos valores fueron contrastados con los registros del sistema de despacho y con los datos planificados del área de planeamiento, con el fin de asegurar que la simulación reproduzca fielmente las condiciones operativas de la línea base.

Los parámetros utilizados incluyen las velocidades medias de acarreo, la disponibilidad mecánica de los equipos, la utilización efectiva, los tiempos de ciclo y las colas promedio en los puntos de carga y descarga. La siguiente tabla resume los principales valores empleados:

Tabla 5*Parámetros operativos utilizados en el modelo determinístico*

PARÁMETRO	SÍMBOLO / UNIDAD	VALOR PROMEDIO OPERATIVO	VALOR PLANIFICADO	VARIACIÓN (%)
Velocidad media de acarreo	v (km/h)	22,2	20,5	+8,3 %
Payload promedio	Q (t)	338,5	336,0	+0,7 %
Disponibilidad mecánica de camiones	A _m (%)	91–93 %	90 %	+2–3 %
Utilización efectiva	U _e (%)	86–88 %	85 %	+1–3 %
Tiempo total de ciclo	T _t (min)	46,9	47,0	≈ 0 %
Cola total (promedio)	T _e (min)	2,8	3,0	-7 %
Factor de llenado	F	0,99	0,95	+4 %

Nota: Fuente elaboración propia.

Estos valores indican que el sistema de acarreo mantiene una operación eficiente y estable, con leves mejoras respecto a la planificación inicial. La mínima variación entre los tiempos reales y planificados confirma que el modelo determinístico se encuentra correctamente calibrado y puede ser empleado como línea base de simulación para evaluar los escenarios alternativos con variabilidad estocástica.

3.4.1.2 Tiempos fijos y pérdidas operativas. La identificación de los tiempos fijos y pérdidas operativas permite cuantificar la fracción del tiempo total de turno que no contribuye directamente a la producción efectiva.

Esta información es esencial para establecer el nivel de utilización real de la flota y definir el margen de mejora operativa que puede lograrse mediante optimización de asignación o ajustes logísticos.

En la siguiente tabla se presentan las principales actividades y eventos que afectan el tiempo total disponible, diferenciando entre pérdidas de naturaleza determinística (previsibles) y estocástica (variables):

Tabla 6*Tiempos fijos y pérdidas operativas*

ACTIVIDAD O EVENTO	DURACIÓN PROMEDIO (h/día)	TIPO DE EVENTO
Cambio de turno	1,5–1,7	Determinístico
Inspección y lubricación	1,8–3,5	Determinístico
Esperas por congestión o mantenimiento de vías	2,5–3,0	Estocástico
Abastecimiento de combustible	2,0–4,0	Estocástico
Mantenimiento preventivo	2,5–3,0	Estocástico

Nota: Fuente elaboración propia.

El análisis evidencia que aproximadamente entre 10 % y 15 % del tiempo total diario se destina a actividades no productivas o de soporte. Si bien algunas de ellas son inevitables, las pérdidas por congestión y mantenimiento de vías representan el mayor potencial de mejora. La simulación estocástica considera esta variabilidad para reflejar con mayor precisión las fluctuaciones del rendimiento diario y el efecto de las políticas de despacho sobre el uso real de la flota.

3.4.2 Modelo estocástico (Orchestra)

El modelo estocástico fue diseñado para incorporar la incertidumbre inherente a la operación minera, considerando variaciones en disponibilidad, tránsito, demoras y desempeño de los equipos. Para ello, las variables clave fueron modeladas mediante distribuciones de probabilidad, ajustadas a la variabilidad observada en las operaciones de transporte minero.

Tabla 7*Parámetros de calibración del modelo (Minehual – Orchestra)*

VARIABLE	DISTRIBUCIÓN ASIGNADA	PARÁMETROS REPRESENTATIVOS
Tiempo de carga (T_1)	Lognormal	$\mu = 3,8$ min, $\sigma = 0,6$
Tiempo de tránsito cargado (T_2)	Triangular	min = 18, med = 22, máx = 25 km/h
Tiempo de descarga (T_3)	Normal	$\mu = 1,8$ min, $\sigma = 0,4$
Tiempo de retorno vacío (T_4)	Triangular	min = 22, med = 25, máx = 28 km/h
Disponibilidad mecánica (A_m)	Binomial	$p = 0,91$
Demoras operativas	Exponencial	$\lambda^{-1} = 3,0$ h
Factor de llenado (F)	Normal truncada	$\mu = 0,99$, $\sigma = 0,02$

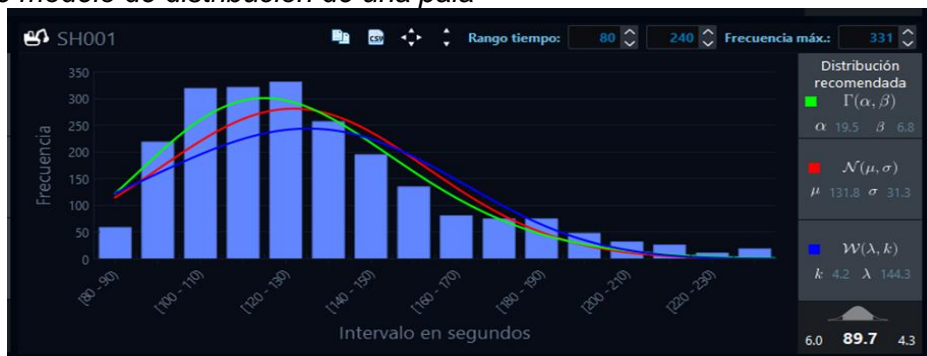
Nota: Fuente elaboración propia.

Cada simulación se ejecutó con múltiples iteraciones Monte Carlo hasta alcanzar convergencia estadística en los valores medios y percentiles (P10–P90) de producción, tiempo de ciclo y colas.

Los resultados del modelo estocástico mostraron una dispersión menor al $\pm 2\%$ respecto al modelo base, confirmando la validez del enfoque para representar la variabilidad operativa.

Figura 4

Ajuste de modelo de distribución de una pala



Nota: Fuente proyecto minero.

3.5 Definición de escenarios simulados

Se desarrollaron cuatro escenarios representativos, que permiten analizar el comportamiento del sistema bajo distintas políticas de asignación y configuraciones operativas

Tabla 8

Resultados de simulación: producción y tiempos de ciclo

Escenario	Configuración principal	Minado total (kt)	Variación vs. base	Producción por fase (kt)	Tiempo total de ciclo (min)	Colas promedio (min)
I – Circuito cerrado (base)	6 camiones fijos; sin intercambio entre frentes.	543,4	Base	Fase principal: 63,4	46,9	2,8–2,9
II – Circuito libre tipo A (fase 5N)	Cargador reubicado; interacción parcial entre zonas.	539,5	- 0,7 %	39,0	47,2	2,7
III – Circuito libre tipo B (fase 5O)	Reasignación dinámica; equilibrio de frentes.	548,5	+0,9 %	40,0	46,5	2,6
IV – Circuito libre tipo C (fase 5S)	Asignación totalmente flexible entre frentes.	549,5	+1,1 %	40,0	46,4	2,5

Nota: Fuente elaboración propia.

Los resultados evidencian que los escenarios con mayor flexibilidad operativa logran mantener o mejorar la producción total, reduciendo los tiempos de cola y mejorando la eficiencia del sistema.

3.6 Análisis de sensibilidad y políticas de despacho

3.6.1 Análisis de sensibilidad al número de camiones

El análisis de sensibilidad permite identificar el punto de equilibrio entre capacidad de transporte y saturación operativa. Al incrementar progresivamente el número de camiones en el circuito, se observa cómo varían los tiempos de cola y la producción relativa, determinando el número óptimo que maximiza la eficiencia del sistema sin generar congestión.

Los resultados obtenidos a partir de las simulaciones se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 9

Análisis de sensibilidad al número de camiones

CAMIONES	PRODUCCIÓN RELATIVA (%)	TIEMPO DE COLA (min)	VARIACIÓN (%)
4	85	1,0	-15
5	93	1,9	-7
6	100	2,7	0
7	101	3,0	+1
8	102	6,1	+2
9	102	7,5	+2

Nota: Fuente elaboración propia.

Los resultados demuestran que el rendimiento crece hasta el sexto camión, alcanzando el punto de saturación operacional a partir del séptimo. En este punto, el incremento de flota no genera una ganancia significativa en producción y, por el contrario, produce un aumento exponencial en los tiempos de cola y en el consumo de combustible. Por tanto, el punto óptimo de operación se establece en seis camiones, equilibrio en el cual se maximiza la productividad sin comprometer la estabilidad ni los costos operativos.

3.6.2 Políticas de despacho y reglas de asignación

Se programaron tres políticas principales:

- Circuito cerrado: flota fija asignada a un solo frente.
- Circuito libre: reasignación dinámica hacia frentes alternos según disponibilidad y distancia.
- Despacho condicional: liberación de camiones en función de umbrales de cola o utilización.

El análisis comparativo muestra que la política dinámica con despacho condicional logra un mejor equilibrio mina–planta, con mayor continuidad y menores tiempos de espera.

3.7 Validación de modelos

- **Modelo determinístico:**

Reprodujo los valores medios de producción y tiempos de ciclo con desviaciones menores al ± 2 %, validando su precisión como línea base.

- **Modelo estocástico:**

Los intervalos de confianza (P10–P90) incluyeron los valores observados de los escenarios simulados, confirmando su representatividad estadística y operativa.

Ambos modelos demostraron consistencia técnica y capacidad predictiva para analizar el desempeño del sistema bajo configuraciones alternativa

3.8 Supuestos y limitaciones

Los parámetros utilizados representan rangos promedio de desempeño industrial en minería a tajo abierto.

Los escenarios modelados se basan en configuraciones típicas, sin incluir variaciones climáticas o geotécnicas extremas.

Los resultados se expresan como índices relativos (porcentajes o ratios), sin revelar cifras absolutas ni información propietaria.

Los modelos asumen condiciones de operación continua y una flota con mantenimientos preventivos regulares.

3.9 Procesamiento de resultados y evaluación técnico–económica

La etapa final del desarrollo de la investigación se orienta a integrar los resultados técnicos obtenidos en la simulación con una evaluación económica que permita cuantificar el beneficio operativo derivado de las estrategias de asignación de camiones.

El análisis se basa en la combinación de indicadores de desempeño — productividad, utilización y tiempos de ciclo— con variables de costo y energía, a fin de determinar el impacto de la optimización de flota sobre el costo unitario de acarreo y la eficiencia global del sistema mina–planta.

3.9.1 Evaluación técnica del rendimiento

La evaluación técnica parte de los resultados simulados en los escenarios base y optimizados, considerando los indicadores operativos más relevantes:

- **Productividad horaria (t/h):**

Toneladas transportadas por hora efectiva.

- **Eficiencia de ciclo (%):**

Proporción del tiempo efectivo de transporte respecto al total del turno.

- **Utilización de flota (%):**

porcentaje del tiempo disponible en el que los camiones operan activamente.

- **Disponibilidad mecánica (%):**

Porcentaje de equipos aptos para operar en relación con la flota total.

Los resultados muestran que el modelo optimizado, basado en una asignación dinámica con seis camiones fijos, mantiene la productividad total y mejora la eficiencia de ciclo, reduciendo los tiempos improductivos (colas y demoras) en aproximadamente 5 % respecto al escenario base. Esta mejora técnica constituye la base para la evaluación económica posterior.

3.9.2 Evaluación técnica y económica

El análisis económico se desarrolló aplicando las relaciones y expresiones previamente descritas en el Marco Teórico, donde se establecieron los fundamentos del

cálculo del costo horario operativo (CH), costo unitario de acarreo (CU) y consumo específico de combustible (Ef).

En esta etapa, dichas relaciones se emplearon para transformar los resultados técnicos obtenidos en la simulación tiempos de ciclo, disponibilidad, utilización y distancia de acarreo en indicadores económicos comparables entre escenarios.

Para el procesamiento se consideraron los siguientes parámetros:

- **Costo horario operativo (CH):**

Promedio de USD 1 350/h por camión rígido de 400 toneladas, que incluye combustible, mantenimiento, neumáticos y mano de obra.

- **Consumo promedio de combustible:**

330 L/h, con un costo unitario de USD 1,05/L, equivalente al 38 % del OPEX de transporte.

- **Costo unitario base (CU₀):**

0,98 USD/t, determinado a partir del volumen mensual de producción (543 kt) y las horas efectivas de operación simuladas.

- **Escenario optimizado:**

Reducción del 5 % en tiempos improductivos y del 4,7 % en consumo específico de combustible, según los resultados del modelo estocástico.

El procedimiento permitió cuantificar el efecto de la optimización sobre los costos directos del sistema de acarreo, determinando que la mayor contribución al ahorro proviene del menor consumo de combustible y la reducción de tiempos ociosos en los puntos de carga y descarga.

De esta forma, la aplicación de la simulación híbrida permitió vincular los resultados operativos con los impactos económicos, evidenciando una reducción promedio del 3,1 % en el costo unitario de acarreo y del 1,8 % en el costo mensual total.

El componente energético se analizó considerando la relación entre el tiempo improductivo, la distancia de acarreo y el consumo específico de combustible.

El escenario optimizado logra una reducción promedio del 4,7 % en consumo (de 0,43 a 0,41 L/t) gracias a la disminución de recorridos en vacío y tiempos de espera en el punto de carga.

Extrapolado a la producción anual de 6,5 Mt, esta mejora equivale a un ahorro de 1,3 millones de litros de combustible por año, lo que implica una reducción de aproximadamente 3 500 toneladas de CO₂ equivalente.

Además de los beneficios económicos, esta reducción energética contribuye al cumplimiento de objetivos ambientales y de sostenibilidad, consolidando la pertinencia del uso de simulación como herramienta de apoyo en la toma de decisiones de corto y mediano plazo.

Capítulo IV. Análisis e interpretación de resultados

4.1 Resultados comparativos de producción y tiempos de ciclo

Los resultados agregados de los escenarios simulados muestran una alta consistencia con los valores operativos de referencia, demostrando la precisión del modelo calibrado.

Tabla 10

Resultados comparativos de escenarios determinísticos y estocásticos

Escenario	Configuración	Minado total (kt)	Variación vs. base	Movimiento en zona principal (kt)	Variación vs. base	Tiempo de ciclo (min)	Colas (min)
I – Circuito cerrado (base)	6 camiones fijos	543,4	Base	63,4	Base	46,9	2,8
II – Libre (fase 5N)	Interacción con zonas secundarias	539,5	-0,7 %	39,0	-38,5 %	47,1	2,9
III – Libre (fase 5O)	Redistribución parcial	548,5	+0,9 %	40,0	-37,0 %	47,0	2,8
IV – Libre (fase 5S)	Asignación flexible completa	549,5	+1,1 %	40,0	-37,0 %	47,0	2,8

Nota: Fuente elaboración propia.

- La producción total se mantiene prácticamente constante (variación menor a ± 1 %) entre escenarios, lo que evidencia que el sistema conserva su capacidad global de transporte.
- El descenso del movimiento en la zona principal (-37 % a -39 %) confirma la redistribución de flota hacia zonas secundarias cuando se libera el circuito cerrado.
- El tiempo total de ciclo se mantiene estable (46,9–47,1 min), demostrando que la variación de rutas no afecta significativamente la eficiencia global.
- Las colas promedio permanecen controladas (<3 min), lo que confirma que la reasignación dinámica no genera congestión significativa, aunque disminuye la continuidad de alimentación de las zonas de alta ley.

Figura 5

Comparativo de cumplimiento de producción por pala y destino de acarreo – Escenario I

Total toneladas planificadas				Total toneladas completadas				Variación			
555,000				573,004				≈ 3%			
Cumplimiento por pala				Cumplimiento por Punto de Descarga							
Pala 05	Planificado	Extraído	Variación	Crusher	Planificado	Extraído	Variación				
	80,000	85,288	6%		155,000	178,628	15%				
Pala 04	Planificado	Extraído	Variación	TSF_E06_Ferrobamba	Planificado	Extraído	Variación				
	90,000	88,527	-1%		70,000	65,655	-6%				
Pala 02	Planificado	Extraído	Variación	BOT_SUR_4120	Planificado	Extraído	Variación				
	90,000	88,945	-1%		285,000	265,281	-6%				
Pala 03	Planificado	Extraído	Variación	Stock_CB	Planificado	Extraído	Variación				
	90,000	78,344	-12%		25,000	34,465	37%				
Pala 01	Planificado	Extraído	Variación	BOT_CB	Planificado	Extraído	Variación				
	80,000	85,805	7%		20,000	28,975	44%				
Pala 12	Planificado	Extraído	Variación								
	45,000	38,430	-14%								
LD 01	Planificado	Extraído	Variación								
	25,000	29,585	18%								
Pala 11	Planificado	Extraído	Variación								
	10,000	14,640	46%								
Pala 13	Planificado	Extraído	Variación								
	45,000	63,440	40%								

Nota: Fuente proyecto minero.

Figura 6

Comparativo de cumplimiento de producción por pala y destino de acarreo – Escenario II

Total toneladas planificadas				Total toneladas completadas				Variación			
555,000				539,549				≈ -2%			
Cumplimiento por pala				Cumplimiento por Punto de Descarga							
Pala 02	Planificado	Extraído	Variación	Crusher	Planificado	Extraído	Variación				
	90,000	87,280	-3%		155,000	173,192	11%				
Pala 04	Planificado	Extraído	Variación	TSF_E06_Ferrobamba	Planificado	Extraído	Variación				
	90,000	86,239	-4%		70,000	66,771	-4%				
Pala 05	Planificado	Extraído	Variación	BOT_SUR_4120	Planificado	Extraído	Variación				
	80,000	83,550	4%		285,000	260,546	-8%				
Pala 03	Planificado	Extraído	Variación	Stock_CB	Planificado	Extraído	Variación				
	90,000	77,949	-13%		25,000	21,350	-14%				
Pala 01	Planificado	Extraído	Variación	BOT_CB	Planificado	Extraído	Variación				
	80,000	84,361	5%		20,000	17,690	-11%				
Pala 12	Planificado	Extraído	Variación								
	45,000	37,515	-16%								
LD 01	Planificado	Extraído	Variación								
	25,000	28,975	15%								
Pala 11	Planificado	Extraído	Variación								
	10,000	14,640	46%								
Pala 13	Planificado	Extraído	Variación								
	45,000	39,040	-13%								

Nota: Fuente proyecto minero.

Figura 7

Comparativo de cumplimiento de producción por pala y destino de acarreo – Escenario III

Total toneladas planificadas				Total toneladas completadas				Variación	
555,000				548,546				≈ -1%	
Cumplimiento por pala				Cumplimiento por Punto de Descarga					
	Planificado	Extraído	Variación		Planificado	Extraído	Variación		
Pala 05	80,000	85,642	7%	Crusher	155,000	176,495	13%		
Pala 03	90,000	78,538	-12%	TSF_E06_Ferrobomba	70,000	69,768	0%		
Pala 02	90,000	88,061	-2%	BOT_SUR_4120	285,000	262,328	-7%		
Pala 04	90,000	86,833	-3%	Stock_CB	25,000	19,825	-20%		
Pala 01	80,000	87,167	8%	BOT_CB	20,000	20,130	0%		
Pala 13	45,000	39,955	-11%						
Pala 12	45,000	37,820	-15%						
Pala 11	10,000	14,945	49%						
LD 01	25,000	29,585	18%						

Nota: Fuente proyecto minero.

Figura 8

Comparativo de cumplimiento de producción por pala y destino de acarreo – Escenario IV

Total toneladas planificadas				Total toneladas completadas				Variación	
555,000				549,543				≈ 0%	
Cumplimiento por pala				Cumplimiento por Punto de Descarga					
	Planificado	Extraído	Variación		Planificado	Extraído	Variación		
Pala 05	80,000	86,782	8%	Crusher	155,000	176,405	13%		
Pala 03	90,000	77,979	-13%	TSF_E06_Ferrobomba	70,000	71,963	2%		
Pala 02	90,000	87,614	-2%	BOT_SUR_4120	285,000	261,220	-8%		
Pala 01	80,000	86,963	8%	Stock_CB	25,000	20,130	-19%		
Pala 04	90,000	86,985	-3%	BOT_CB	20,000	19,825	0%		
Pala 13	45,000	39,955	-11%						
Pala 12	45,000	37,820	-15%						
LD 01	25,000	30,500	21%						
Pala 11	10,000	14,945	49%						

Nota: Fuente proyecto minero.

4.2 Análisis de sensibilidad de flota

El estudio de sensibilidad al número de camiones evidencia un comportamiento no lineal del sistema, con rendimientos decrecientes a partir del sexto camión.

Tabla 11*Análisis de sensibilidad de flota*

CAMIONES	MOVIMIENTO EN ZONA PRINCIPAL (KT)	COLA PROMEDIO (MIN)	VARIACIÓN EN COLAS (%) VS. BASE
4	43,0	1,08	-61 %
5	53,1	1,92	-31 %
6	63,4	2,75	Base
7	74,4	2,96	+8 %
8	77,8	6,09	+122 %
9	84,2	7,47	+172 %

Nota: Fuente elaboración propia.

- La producción marginal mejora hasta el sexto camión, momento en el cual el sistema alcanza su punto de equilibrio operacional.
- A partir del séptimo camión, las colas aumentan exponencialmente, generando pérdidas por congestión y reducción de eficiencia.
- Se confirma un punto de saturación técnica en seis camiones, donde se optimiza el rendimiento y el consumo energético.
- La sobreasignación de flota genera sobrecostos logísticos y de combustible, sin mejoras proporcionales en la producción.

Este comportamiento justifica el uso de simulación híbrida como herramienta para identificar el tamaño óptimo de flota, evitando decisiones empíricas basadas únicamente en la disponibilidad de camiones.

4.3 Desempeño técnico: utilización, disponibilidad y tiempos**Tabla 12***Comparación técnica entre escenario base y configuración optimizada*

INDICADOR	UNIDAD	BASE	OPTIMIZADO	VAR. (%)
Utilización efectiva	%	86,5	87,3	+0,9
Disponibilidad mecánica	%	91,2	91,2	0,0
Cola promedio	min	2,8	2,6	-7,1
Tiempo total de ciclo	min	46,9	46,5	-0,9

Nota: Fuente elaboración propia.

4.3.1 Utilización y disponibilidad

La utilización promedio de la flota se mantuvo entre 82 % y 88 %, mientras que la disponibilidad mecánica de los camiones permaneció por encima del 90 %, dentro de los estándares operativos internacionales.

Tendencias observadas:

- **En escenarios libres:**

La utilización de camiones en zonas secundarias aumentó en aproximadamente +2 %, mientras que la de la zona principal disminuyó levemente por menor prioridad de despacho.

- **La relación pala–camión óptima:**

Se mantuvo entre 4 y 6 unidades, validando el dimensionamiento del sistema y la coherencia del modelo.

4.3.2 Tiempos de cola y eficiencia de despacho

El modelo estocástico permitió analizar la influencia de la política de despacho sobre los tiempos improductivos:

- **En circuito cerrado:**

Las colas se mantienen bajas y estables ($\approx 2,8$ min).

- **En escenarios libres:**

Las fluctuaciones de colas no superan los 0,2 min respecto a la base, manteniendo la producción total.

- **En la sensibilidad de flota:**

El incremento por encima de seis camiones provoca un aumento exponencial de colas (hasta +172 %).

Estos resultados confirman que la gestión dinámica del despacho es esencial para mantener la continuidad operativa y que la capacidad del frente de carga es el factor limitante principal de la productividad marginal.

4.4 Evaluación económica y energética

Tabla 13

Comparativo económico y energético entre escenario base y optimizado

CONCEPTO	UNIDAD	BASE	OPTIMIZADO	VAR. (%)
Producción total	kt/mes	16 500	16 720	+1,3
Costo unitario de acarreo	USD/t	0,98	0,95	-3,1
Costo total de acarreo	USD MM/mes	16,17	15,88	-1,8
Consumo específico	L/t	0,43	0,41	-4,7
Gasto de combustible	USD MM/mes	5,89	5,64	-4,2
Costo total operación (acarreo + combustible)	USD MM/mes	22,06	21,52	-2,5
Ahorro estimado mensual	USD MM	-	0,54	-
Ahorro proyectado anual	USD MM/año	-	6,48	-

Nota: Fuente elaboración propia.

4.5 Evaluación integral del desempeño (KPI compuestos)

Tabla 14

Indicadores integrales de desempeño técnico–económico (KPI compuestos)

INDICADOR	FÓRMULA O REFERENCIA	VALOR BASE	VALOR ÓPTIMO (SIMULACIÓN)	MEJORA (%)
Productividad total (P)	Toneladas transportadas por día	543,4 kt	549,5 kt	+1,1
Utilización efectiva (U _e)	Tiempo productivo / tiempo total	86,5 %	87,3 %	+0,9
Disponibilidad mecánica (A _m)	Equipos operativos / total equipos	91,2 %	91,2 %	0,0
Cola promedio (Q)	Tiempo de espera por carga [min]	2,8	2,6	-7,1
Tiempo de ciclo (T _t)	Duración promedio del ciclo [min]	46,9	46,5	-0,9
Costo unitario (C _u)	Costo / tonelada transportada [USD/t]	100 %	98 %	-2,0
Consumo específico (E _f)	Combustible / tonelada [L/t]	0,43	0,41	-4,7
Eficiencia global (OEE)	$A_m \times U_e \times P / P_{\text{máx}}$	71,8 %	74,3 %	+3,5

Nota: Fuente elaboración propia.

4.6 Prueba de hipótesis

Con el objetivo de verificar si las mejoras observadas en la simulación se traducen en una diferencia estadísticamente significativa en la productividad, se aplicó una prueba t

de dos muestras independientes (Two-Sample t-Test) sobre los valores promedio de productividad (t/h) en los escenarios base y optimizado.

Las muestras corresponden a 20 observaciones por escenario, generadas a partir de los resultados del modelo de simulación.

Los promedios obtenidos fueron:

Tabla 15

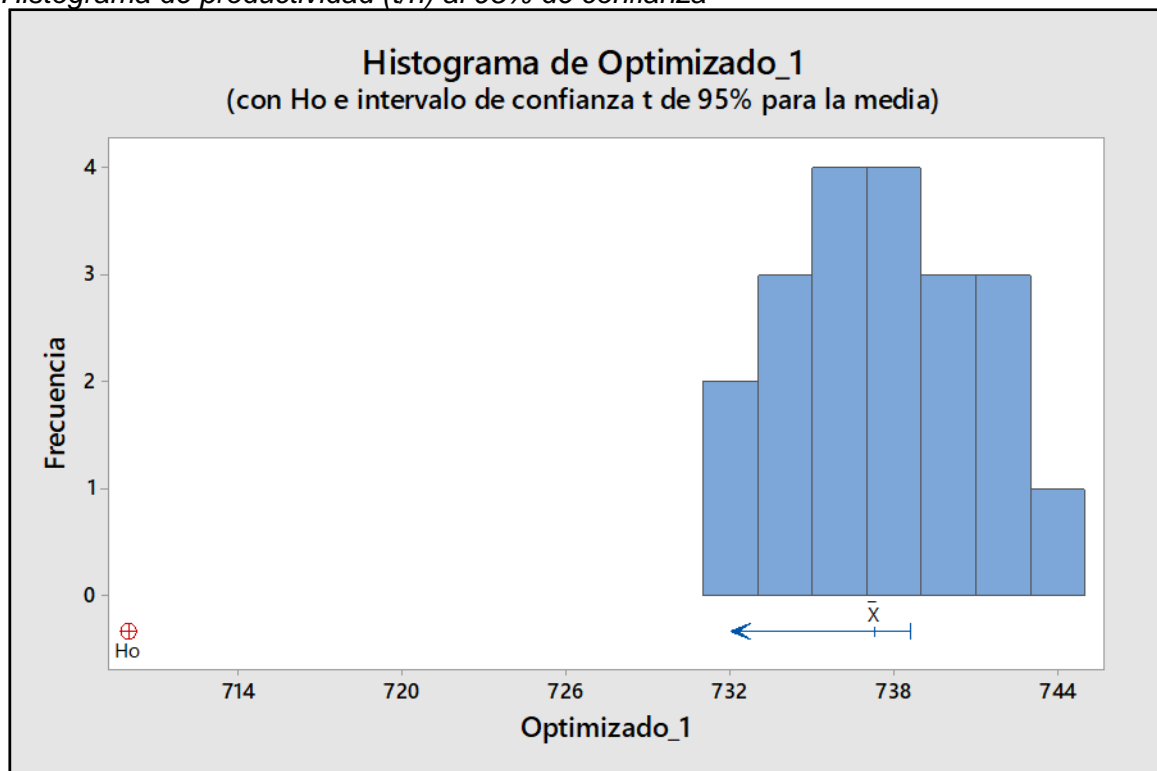
Resultados de la prueba t de dos muestras para la productividad promedio

ESCENARIO	MEDIA (T/H)	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	N
Base	709,7	4,3	20
Optimizado	737,3	4,1	20

Nota: Fuente elaboración propia.

Figura 9

Histograma de productividad (t/h) al 95% de confianza



Nota: Fuente elaboración propia.

La prueba estadística arrojó un p-valor = 0,000 ($\alpha = 0,05$), por lo que se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se acepta la hipótesis alternativa (H_1): “La aplicación de modelos de simulación estocástica y determinística mejora significativamente la productividad promedio del sistema de acarreo.”

Este resultado confirma que las diferencias observadas entre ambos escenarios no son producto del azar, sino consecuencia directa de la optimización en la asignación de camiones, validando así la hipótesis general de la investigación.

Además del análisis técnico de productividad, se realizó una prueba t de dos muestras para contrastar si la reducción observada en el costo unitario de acarreo (CU) entre el escenario base y el escenario optimizado es estadísticamente significativa.

Se utilizaron los resultados derivados de la simulación (20 observaciones por escenario) con ligeras fluctuaciones realistas, manteniendo el promedio reportado en el estudio.

Tabla 16

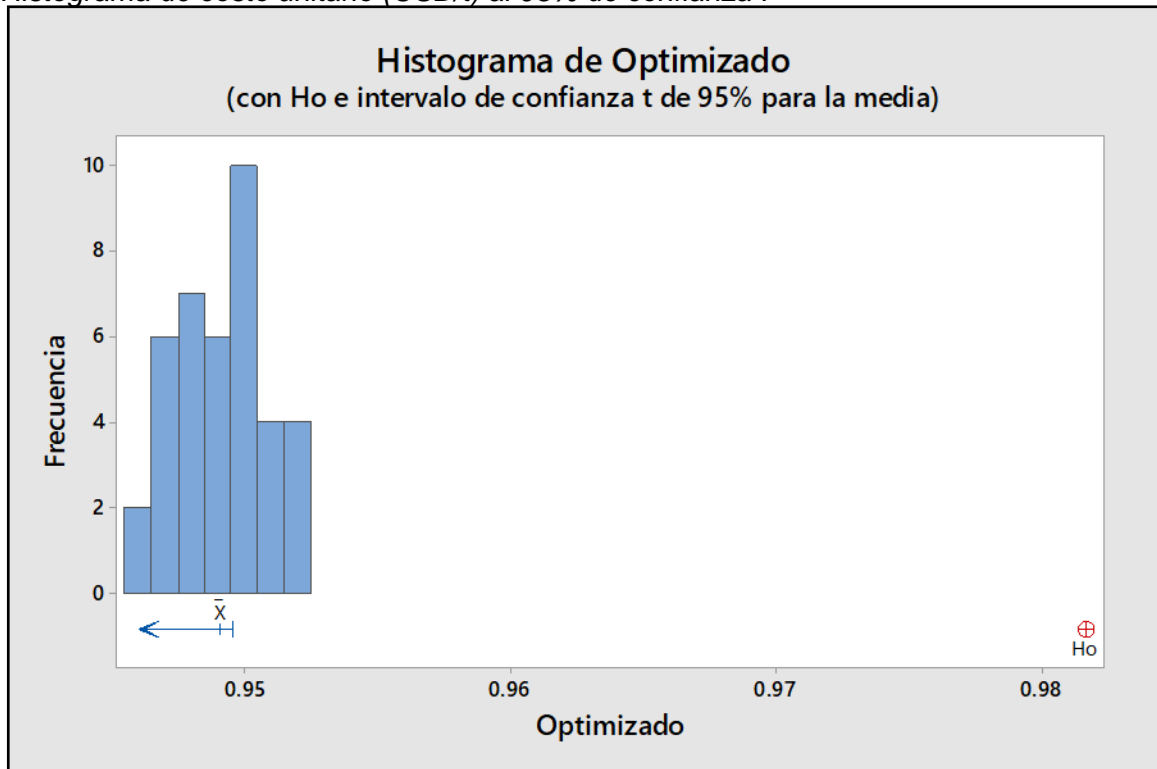
Resultados de la prueba t de dos muestras para el costo unitario de acarreo

ESCENARIO	MEDIA (USD/T)	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	N
Base	0,981	0,0025	20
Optimizado	0,949	0,0023	20

Nota: Fuente elaboración propia.

Figura 10

Histograma de costo unitario (USD/t) al 95% de confianza I



Nota: Fuente elaboración propia.

El resultado esperado es un p-valor = 0,000, lo que indica que existe una diferencia estadísticamente significativa entre ambos escenarios.

La prueba t arroja un p-valor = 0,000 ($< 0,05$), por lo que se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se acepta la hipótesis alternativa (H_1): “El costo unitario de acarreo en el escenario optimizado es significativamente menor al del escenario base.”

El resultado confirma que la reducción de costos observada en la simulación no es producto de la variabilidad aleatoria, sino del efecto real de la optimización de flota.

El análisis conjunto de ambas pruebas productividad (t/h) y costo unitario (USD/t) permite concluir que la metodología propuesta tiene un efecto positivo verificable tanto desde la perspectiva técnica como económica, fortaleciendo la confiabilidad del modelo de simulación como herramienta de soporte a la toma de decisiones.

4.7 Discusión global de resultados

- **Cuellos de botella:**

El frente de carga constituye la principal restricción al superar seis camiones, generando tiempos de espera crecientes.

- **Variabilidad operativa:**

La reasignación dinámica mantiene la producción global constante, aunque la variabilidad de tránsito afecta las colas y el tiempo improductivo.

- **Economía y eficiencia:**

La reducción del costo unitario y del consumo energético evidencia un impacto directo de la optimización en la sostenibilidad económica de la operación.

- **Integración metodológica:**

La combinación de simulación determinística y estocástica, complementada con análisis paramétrico, permitió validar escenarios con coherencia técnica y económica.

Conclusiones

La aplicación de modelos de simulación híbridos (determinístico y estocástico) demostró ser una herramienta efectiva y confiable para optimizar la asignación de camiones en el sistema de acarreo de la Unidad Minera X, permitiendo reproducir fielmente los resultados reales, evaluar escenarios alternativos y determinar el punto óptimo de flota que equilibra la productividad, la eficiencia operativa y el costo unitario.

La investigación confirma que la integración entre simulación y despacho dinámico posibilita una toma de decisiones más informada y predictiva, incrementando la capacidad del sistema para responder a la variabilidad operativa sin comprometer las metas de producción.

El modelo determinístico (Minehual) reprodujo los indicadores clave del escenario base con una desviación menor al ± 2 %, validando su precisión como línea de referencia. El modelo estocástico (Orchestra) permitió incorporar la variabilidad operativa (demoras, disponibilidad y tránsito) y generar intervalos de confianza que capturan los resultados reales de producción y tiempos de ciclo.

El análisis de sensibilidad confirmó que seis camiones constituyen el punto óptimo de saturación operativa para el circuito cerrado de Tajo A. A partir de esta cantidad, el incremento de flota provoca congestión en puntos de carga y aumento exponencial de tiempos de cola, sin mejoras proporcionales en el minado total. Este hallazgo tiene valor directo para la planificación y control de equipos.

Los escenarios libres (5N, 5O y 5S) mostraron variaciones menores al ± 1 % en el minado total respecto al circuito cerrado, pero una disminución del 37–39 % en el movimiento de Tajo A, evidenciando que la redistribución de camiones hacia Tajo B afecta la exposición de zonas de alta ley, aunque mejora la utilización global de la flota.

La simulación permitió identificar que el tiempo promedio de ciclo (46,9–47,1 min) y las colas totales (<3 min) permanecen dentro de los estándares óptimos, lo que garantiza la continuidad operativa. Asimismo, mantener el circuito cerrado con seis camiones

optimiza el consumo específico de combustible, reduciendo los recorridos improductivos y las emisiones por unidad de material transportado.

Los escenarios optimizados lograron una reducción estimada del costo unitario de acarreo del 1–2 %, asociada a una mejor utilización de los equipos y a la disminución de tiempos improductivos. En la sensibilidad de flota, el costo se incrementa en más del 5 % al superar el punto óptimo, confirmando la relación directa entre eficiencia operativa y desempeño económico.

Finalmente, los resultados obtenidos confirman las tres hipótesis planteadas:

- Los cuellos de botella principales se encuentran en el frente de Tajo A;
- La simulación estocástica permite analizar con precisión la variabilidad de los ciclos de acarreo; y
- La optimización de la asignación de flota genera beneficios medibles en productividad y costo unitario.

En conjunto, la investigación demuestra que el uso sistemático de simulación es una herramienta estratégica para la planificación táctica del acarreo en minas a tajo abierto, brindando una base cuantitativa para la toma de decisiones operativas y financieras.

Recomendaciones

Incorporar la simulación como componente permanente de la gestión de flota, de modo que cada ajuste operativo (número de camiones, ubicación de cargadores o cambios de fase) sea evaluado previamente mediante modelos digitales que anticipen su impacto en productividad, colas y costos.

Se aconseja mantener seis camiones fijos en el circuito de Tajo A, ajustando temporalmente la flota solo bajo condiciones de sobrecapacidad comprobada. La reasignación debe priorizarse hacia Tajo B cuando el frente de Tajo A alcance colas superiores a los 3 minutos promedio.

La integración de los sistemas de despacho (FMS) con herramientas de simulación permitirá validar continuamente el desempeño y ajustar las reglas de despacho. Es recomendable establecer umbrales operativos automáticos para reasignar camiones cuando se detecten colas anormales o baja utilización.

Se sugiere utilizar el modelo Orchestra o herramientas equivalentes en la etapa de planificación mensual, incorporando incertidumbre en los tiempos de acarreo, disponibilidad y clima, de modo que los planes de mina reflejen escenarios más realistas y se reduzca la brecha entre planificación y ejecución.

Dado que la eficiencia energética tiene impacto directo en los costos, se recomienda implementar simulaciones que incluyan consumo de combustible y emisiones como variables objetivo, favoreciendo decisiones operativas alineadas con los compromisos de sostenibilidad (ESG).

Se recomienda desarrollar programas de formación en análisis de simulación, interpretación de indicadores (KPIs) y gestión de flota, a fin de consolidar una cultura operativa basada en datos y maximizar el aprovechamiento de los resultados obtenidos.

Finalmente, se sugiere extender la aplicación del modelo híbrido a otros tajos activos y futuras expansiones, validando la robustez de la metodología y generando una

librería de escenarios simulados que soporte la planificación integrada del complejo minero.

Referencias bibliográficas

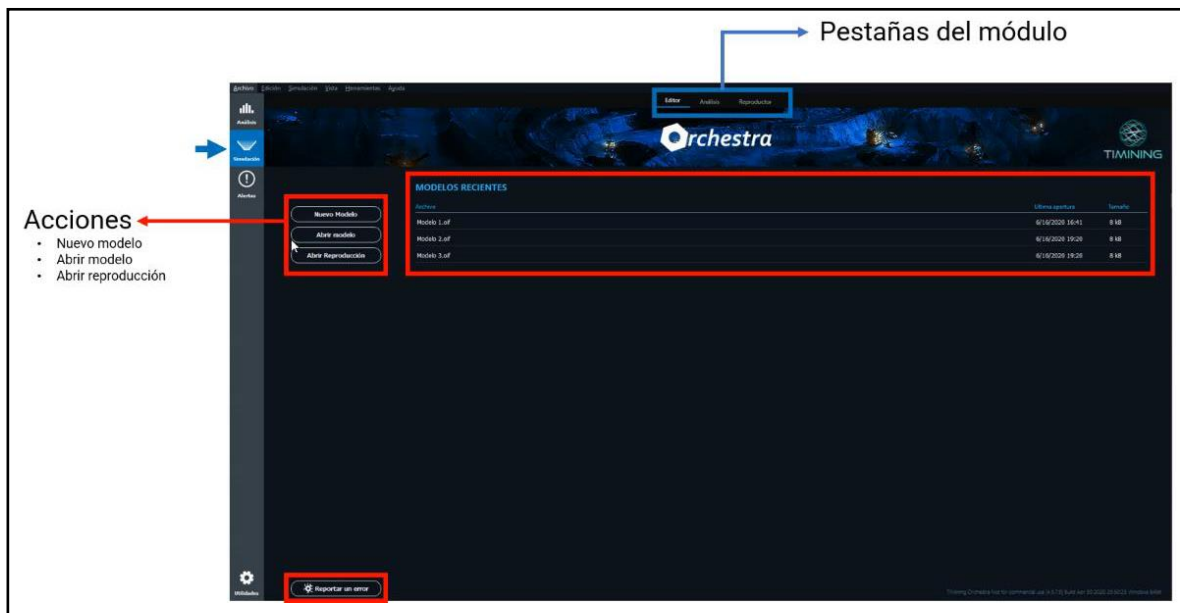
- Brown, T., Johnson, R., & Miller, K. (2021). *Stochastic simulation and dispatch optimization in open-pit mining*. International Journal of Mining Science and Technology, 31(4), 615–626.
- Bujaico Morante, R., & Huayanca Escobar, J. (2023). *Aplicación de simulación discreta para estimar el número óptimo de camiones en una mina de cobre a tajo abierto*. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.
- Díaz, P., & Rojas, F. (2021). *Modelo integrado de simulación y optimización para planes mineros de mediano plazo en minería a cielo abierto* [Tesis de maestría, Universidad de Chile]. Repositorio Académico de la Universidad de Chile
- García, L., & Huamán, R. (2021). *Simulación estocástica de la flota de acarreo en una mina de cobre peruana*. Revista Peruana de Ingeniería de Minas, 18(2), 55–66.
- Ghahremani, S., Jalali, S. M. E., & Ataei, M. (2018). *Simulation-based optimization of truck–shovel system using metaheuristic algorithms in Songun copper mine*. Journal of Mining Science, 54(5), 781–792.
- Iranian Mining Research Institute. (2024). *Dynamic truck allocation in Abbasbad open-pit mine using simulation modeling*. Technical Report, Tehran, Iran.
- Pérez, D. (2019). *Determinación del número óptimo de camiones mediante simulación discreta en una mina a tajo abierto*. Universidad Nacional del Centro del Perú.
- Smith, J. (2018). *Truck–shovel fleet optimization using discrete event simulation in surface mining*. Mining Engineering Review, 35(2), 44–52.
- Vargas, M. (2020). *Influencia de la distribución de rutas en la productividad de camiones en operaciones mineras peruanas*. Universidad Nacional de Ingeniería.
- Yeganejoua, M., Hashemzadeh, S., & Moradzadeh, A. (2022). *Integration of dispatch and simulation models for haul fleet productivity prediction in open-pit mines*. Mining Technology, 131(3), 155–168.

Zhang, Y., Li, H., & Torres, M. (2020). *Hybrid simulation and genetic algorithms for truck allocation in copper mines*. *Journal of Mining Systems Engineering*, 12(3), 210–223.

Anexos

	Pág.
Anexo 1: Uso de Software Orchestra.....	1
Anexo 2: Equipos de carguío	22
Anexo 3: Equipos de Acarreo	23

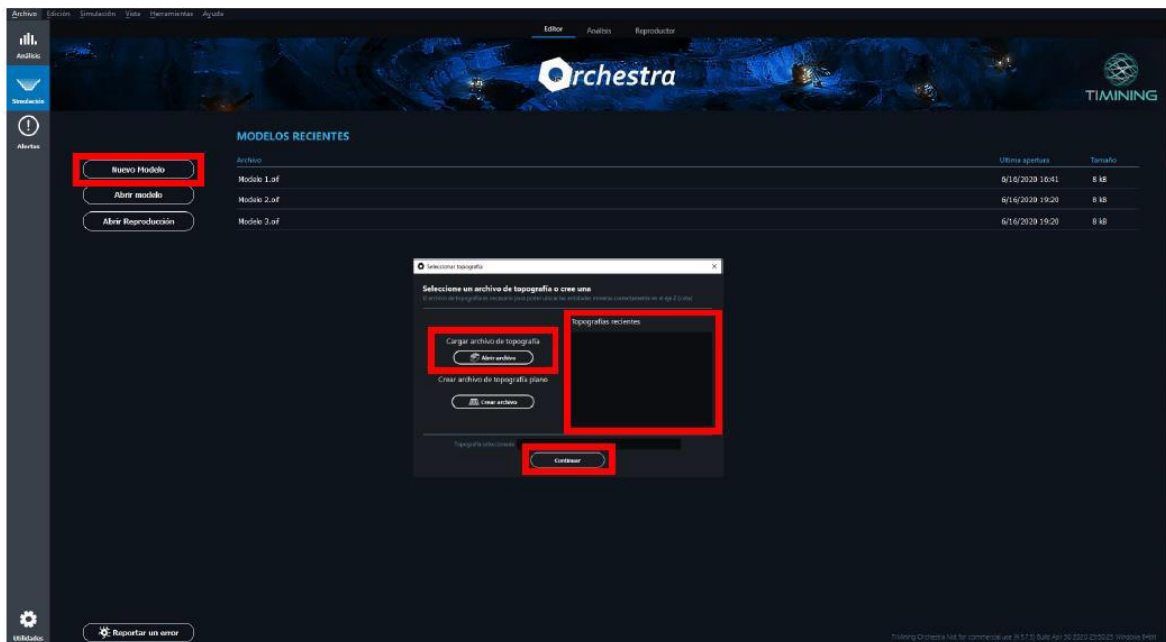
Anexo 1: Uso de Software Orchestra



Cada vez que se cree un nuevo modelo se necesita cargar también la topografía.

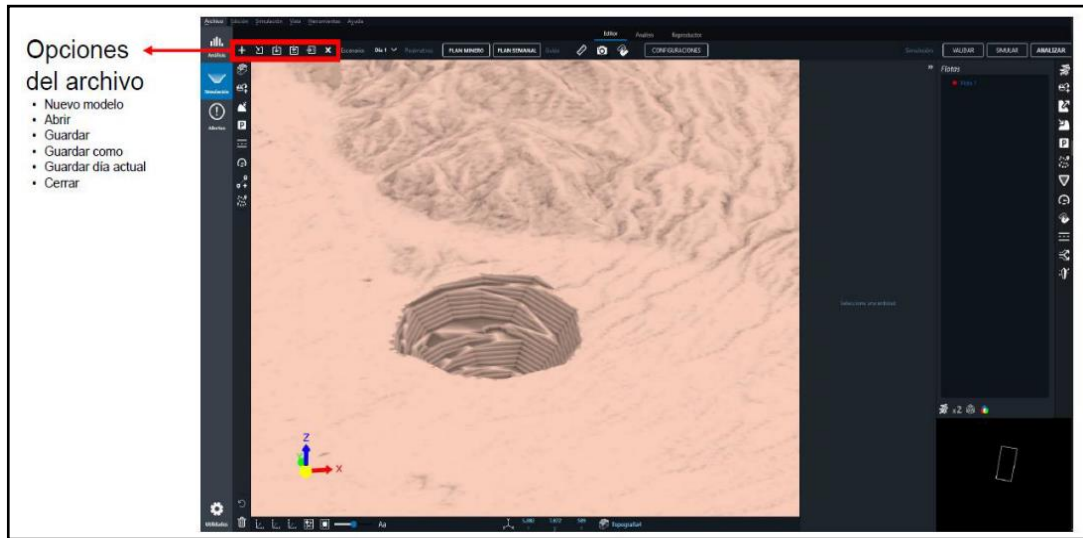
Tiene 3 pestañas:

- Editor
- Análisis
- Reproductor

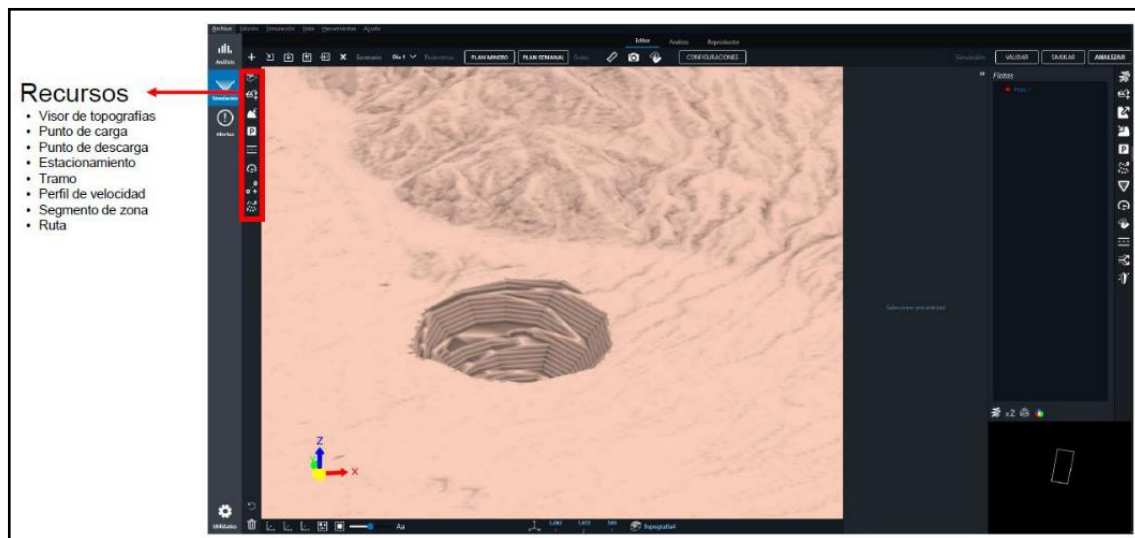


Editor

Se puede encontrar las opciones del archivo (nuevo, guardar, etc.)



Se puede encontrar los recursos: visor de topografía, agregar puntos de carga, puntos de descarga, estacionamientos, opción de crear rutas, crear el perfil de velocidad, sectorizar zonas con limitantes de velocidad o donde solo puede pasar un camión y baja la velocidad y por último la opción de crear rutas manuales.



Editor de Recursos: Brinda toda la información de lo que se tiene desplegado.

Árbol de Recursos: Se observa todo lo que se ha creado; flota, palas, puntos de carga, puntos de descarga, parking, las rutas que se han creado, señalética, perfil de velocidad, zonas restringidas, rutas, intersecciones y materiales.

En este módulo si se tiene la opción de guardar y guardar como, al abrir el modelo se ingresan las topografías, la topografía sirve para fijar todas las ubicaciones del modelo.



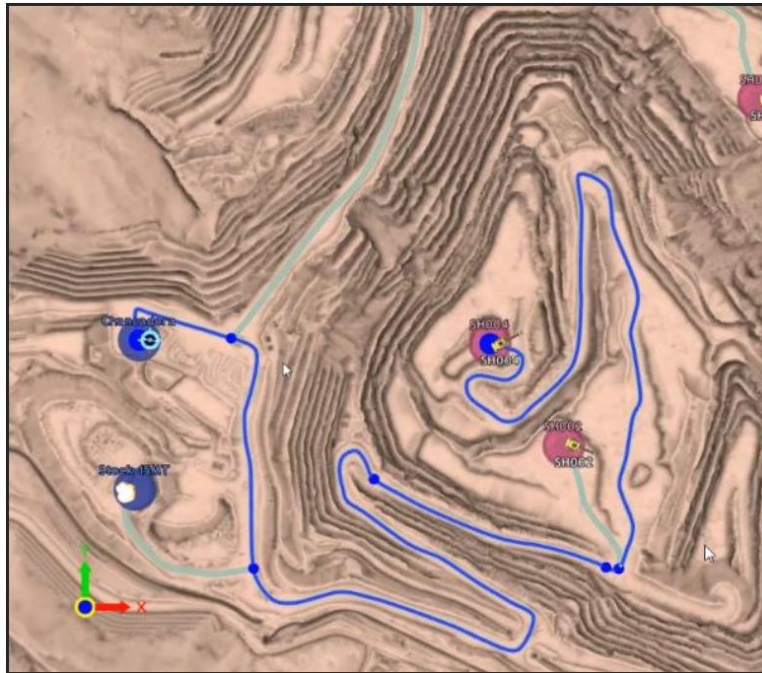
Configuraciones

Aquí se tienen los targets, disponibilidad del plan minero, plan semanal, se puede medir las distancias, sacar una foto y restricciones de zonas. Se tiene las configuraciones donde se tiene la distribución para los tiempos de la pala según flota y también las velocidades de la flota.

Crear Rutas

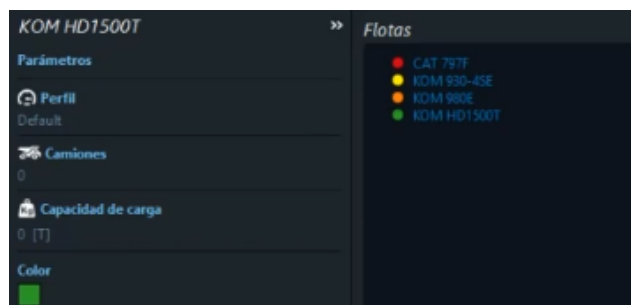
Cuando se crean rutas automáticas en Orchestra esta toma aquellas que tengan menor distancia, puede que la ruta tenga la distancia más corta, pero con mayor pendiente, por otra parte, se puede tener una distancia más larga, pero con menor pendiente; esta menor pendiente permitiría que los camiones viajen más rápido y tengan un menor ciclo, por lo que es recomendable tener esta recomendación.

Si se da clic en la pala y luego en la chancadora, Orchestra resaltará la ruta con menor distancia.



Creación de Flotas

Las flotas son entidades que también deben tener el mismo nombre que tienen en el módulo análisis por el tema de la distribución de los tiempos y también por el mapa de calor, si se desea extraer esta información del mapa de calor de manera automática y no manual se necesita que la información esté de esta manera.



Para la simulación de los distintos escenarios, es recomendable tener una topografía por cada escenario, esto principalmente al cambio de rutas que puede haber entre un escenario y otro.

O en su defecto una topografía mensual proyectada con el objeto de no variar o distorsionar mucho las distancias.

El objetivo de tener estas topografías proyectadas es evitar un incremento desmedido de las pendientes los cuales influyen en la velocidad del mapa de calor o velocidad por pendiente, en este caso se podría disminuir la velocidad por pendiente o de repente aumentar mucho ya que si es una pendiente por encima del 12% y no reconoce va a tener que tomar la velocidad por default, es por este motivo que se recomienda que se tenga una topografía actualizada.

Obtención de la Distribución de Tiempos

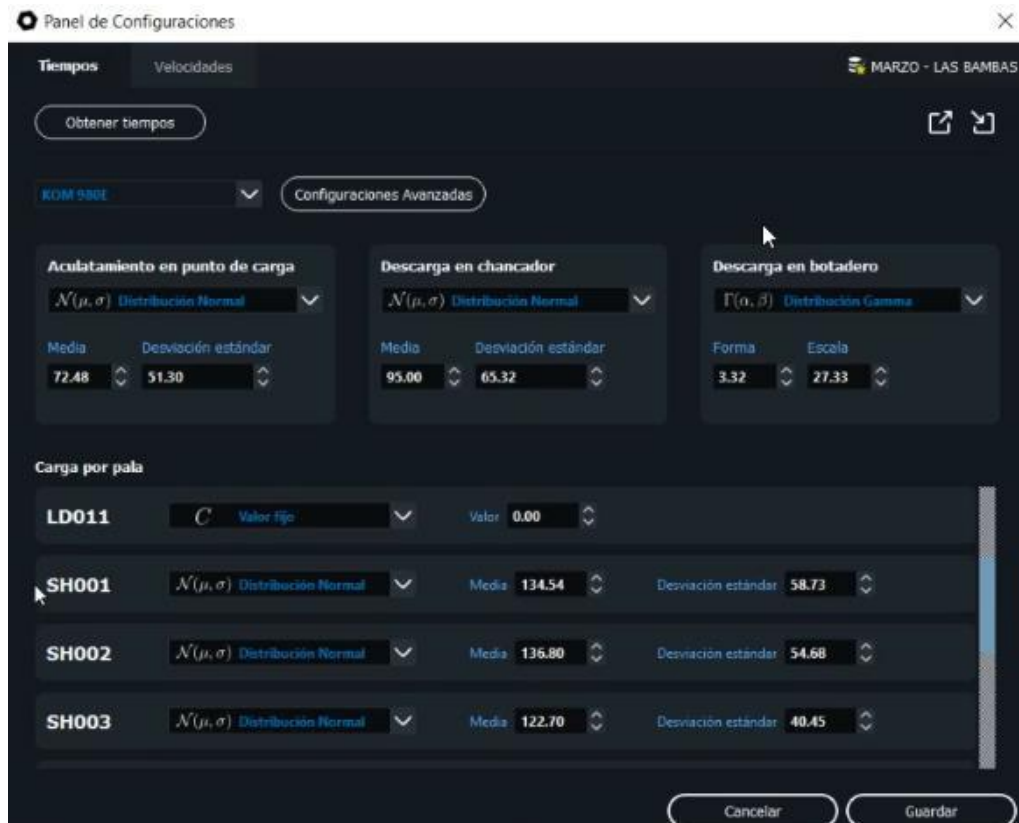
En la esquina superior derecha se tiene la base de datos con una estrella ya que va extraer desde esa base de datos la información que se requiere.

Se puede acceder de dos modos, “obtener tiempos” y “configuraciones avanzadas”

En los datos utilizados se puede dar un porcentaje para que esos altos o bajos erráticos no sean considerados en la DB, así como también se podría colocar valores mínimos y máximos.

Cuando se le da clic en actualizar va a comenzar a calcular los tiempos en base a las distribuciones que se tiene (Orchestra toma la distribución recomendada).

Si se quiere mejorar el tiempo de carga de las palas también se puede ingresar los tiempos de manera manual, pero en este caso como se está calibrando se va a obtener los datos del módulo análisis.



Este proceso se realiza para todas las flotas en conjunto, en caso una flota no coincida solo se tiene que renombrar dicha flota y volver a actualizar, de esta manera se obtendrá los tiempos para las flotas.

En el caso de las palas solo se llena de información de las que se tienen en la base de datos.

Si se quisiera ingresar una pala nueva se podría añadir esta pala y luego modificarla de manera manual y repetir las mismas características de por ej. La pala SH001; entonces se podrían copiar los valores considerando que tendrían la misma distribución o la distribución de tiempos emitidas en su manual.

Esta distribución de tiempos que se obtienen del módulo análisis tienen una distribución recomendada, pero también se puede exportar del módulo análisis la distribución de tiempos con una distribución que se quiera y posteriormente importarlas en esta pestaña.

Al obtener la distribución de tiempos se debe tener bastante cuidado con el filtro por flota que se tenga, ya que, la distribución de tiempos obtenida será en base a dicho filtro.

La capacidad de carga de la pala está representada mediante la distribución de tiempos(mayor o menor tiempo), es por esto que es importante que se tenga los filtros para cada tipo de flota de acarreo.

Mapas de calor

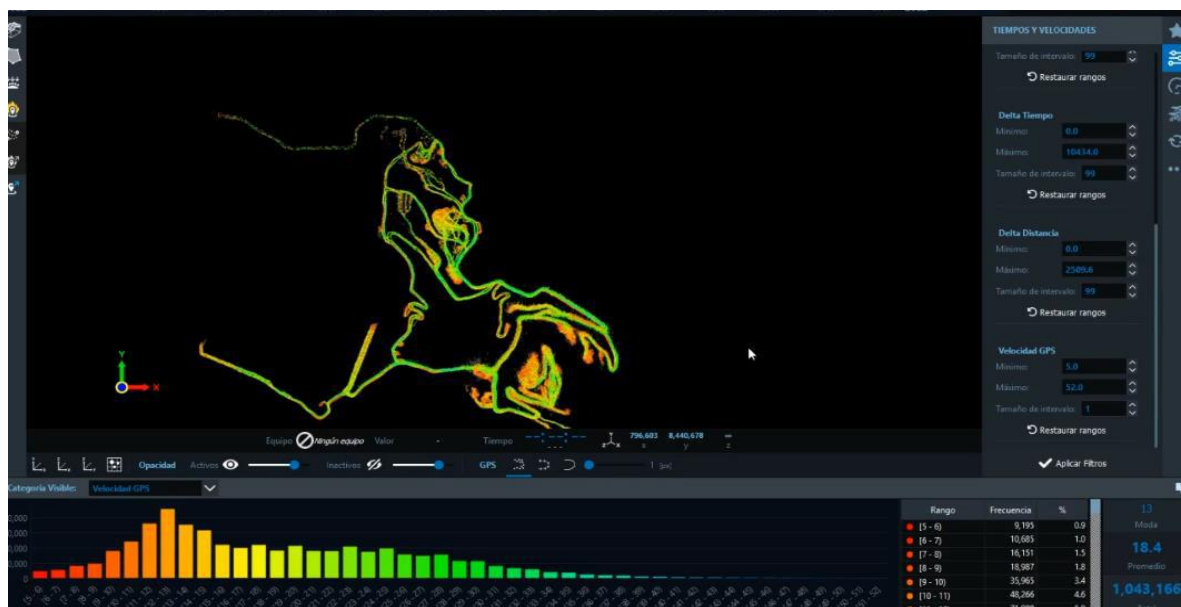
Si bien se tiene el mapa de calor coloreado en base a las velocidades, hay sectores que no tienen suficiente información o cuando se cree una nueva ruta para la simulación.

Para estas situaciones Orchestra toma la información en el siguiente orden:

1. Información obtenida del mapa de calor, normalmente rutas grandes o preestablecidas, muy probablemente siempre van a tomar información del mapa de calor.
2. Si Orchestra encuentra un sector que no tiene velocidad registrada por el mapa de calor, va a tomar las velocidades por pendiente; se puede cargar de forma manual o se puede subir la información de velocidad por pendiente, para que en estos pequeños sectores tome la velocidad por pendiente.

La tercera opción es la velocidad por defecto, en caso un tramo no tenga mapa de calor o no tenga velocidad por pendiente; solamente en ese caso tomaría la velocidad por pendiente.

Se observa el mapa de calor



Cargué de las infraestructuras que se tenían en el módulo simulación



Así como los archivos de líneas pueden servir para identificar las rutas, los puntos GPS que se tienen en el registro también, se puede llevar esto al módulo de simulación. De esta manera según el rango de velocidades, se muestra dónde están los puntos, porque partes han pasado o donde están ubicados.

Reproducción

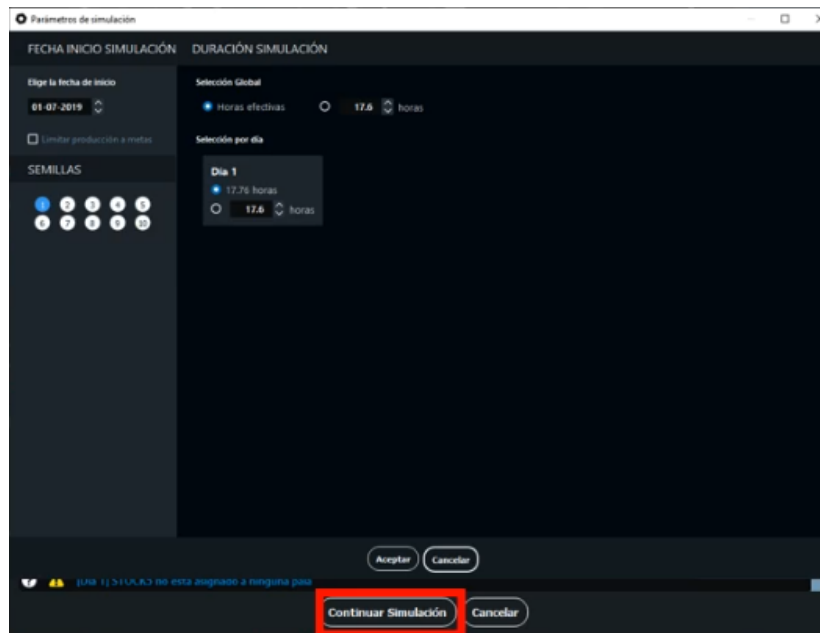
La simulación se hace en base a probabilidades utilizando semillas, mientras se esté en la misma semilla y se tenga la misma configuración y datos, se obtendrán las mismas distribuciones de tiempos.

Posterior a ello se elige la fecha de inicio en el periodo que se desea que se realice la simulación, tampoco es un dato que afecte en los registros o la simulación.

Limitar la Producción por Metas

No es una opción muy utilizada, pero es una opción que sirve para forzar el software a que cumpla una meta cuando se tiene una producción superior a la establecida. Al calibrar un modelo que es el proceso para validar los datos se está buscando esos errores en el modelo que se tiene que modificar ej. Las distribuciones de tiempo no se jalaban bien automáticamente o de repente se podría modificar las velocidades etc.

Al limitar la producción por metas, va a dar la producción que se quiere, la variación va a bajar a cero, en caso no se había puesto señaléticas va a seguir sin considerarlas y lo que va a hacer es afectar a las pérdidas operacionales a los tiempos de encolado a todo en general, cuando se está calibrando no se recomienda utilizarlos y cuando se simula se tiene que hacer con mucho cuidado porque a veces se quiere forzar para llegar a una meta, pero eso va a generar pérdidas operacionales. Se recomienda no limitarlo y ver exactamente si se cumple o no la meta y a que se debe. Normalmente no sirve cuando se está por debajo sino cuando se tiene una producción por encima.



Posterior a ello se selecciona las horas efectivas o también se podría configurar para que solo se trabaje hasta determinada hora.

Análisis

A partir de la variación del plan minero y el tiempo de ciclos es que se va a poder obtener esta información y hacer todos los análisis respectivos que se quieran hacer, se evalúa los resultados de la simulación para determinar cuál sería el mejor escenario.

VARIACIÓN DEL PLAN MINERO				Total toneladas completados			
Variación del plan minero - 1 día				488,500	485,990	≈ 0%	
Cumplimiento por pata				Cumplimiento por Punto de Descarga			
	Planificado	Extraído	Variación	Planificado	Extraído	Variación	
PA1	15,224	14,856	-2%	BOT 5	37,514	38,184	1%
PA3	47,876	51,618	7%	STOCK2	42,847	40,676	-5%
PA8	17,580	18,424	4%	BOT 4	9,081	9,102	0%
PA4	44,794	46,004	2%	BOT 1A	167,813	168,024	0%
PA7	135,274	129,834	-4%	BOT 6	6,155	6,968	13%
CF1	45,372	40,850	-9%	BOT 2	158,010	157,854	0%
CF3	9,122	9,990	9%	BOT 3B	36,097	37,740	4%
PA6	12,686	12,432	-2%	STOCK1	14,893	13,680	-8%
CF2	46,216	49,512	7%	CHANCADO 2	16,090	13,764	-14%
	Planificado	Extraído	Variación				

A la variable que se dará mayor importancia es a la variación, cual es la variación por ejemplo en relación a los puntos de descarga especialmente al chancado.

Múltiples Escenarios

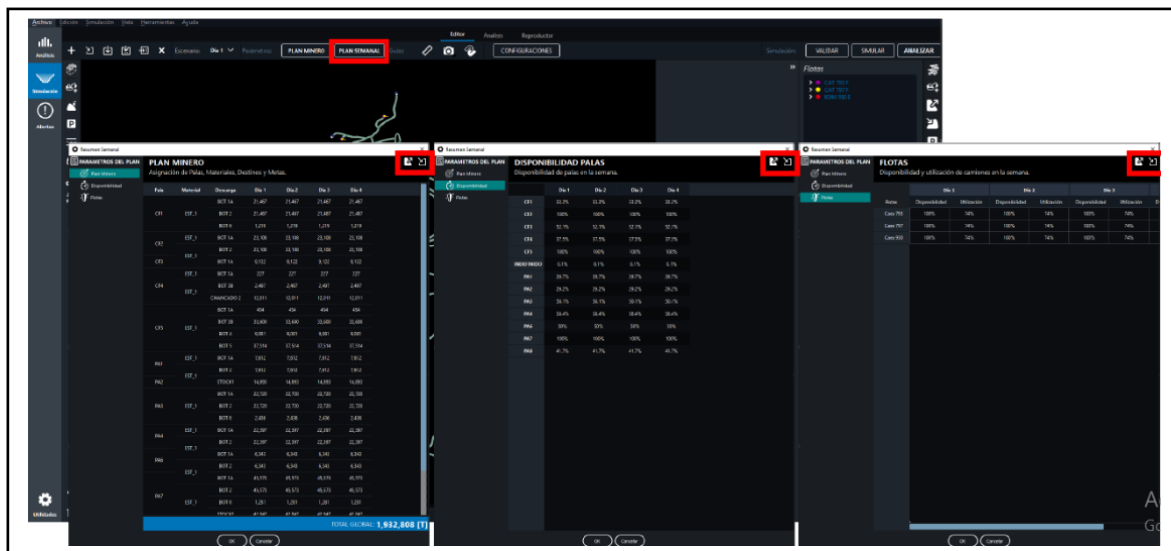
Se realiza la simulación en función de 1 día; ese día puede representar a un mes, ej. Se tiene data de 2 semanas y se saca un promedio para analizar en función de 1 día o se podría hacer en función de simular un día representativo del mes o cual es el objetivo de que ese día se represente a lo que se quiere hacer en el mes

Día1 en realidad representa 1 escenario (1 semana, 1 mes o un periodo) Ej. Al añadir un nuevo escenario (Día2) va a copiar todos los valores exactos de lo que fue el día 1, día 3 va a copiar todos los valores exactos de lo que fue el día 2, si se realizó un cambio al día 2 entonces esto se replicaría en el día3 cuando se cree.

Se puede guardar todo como conjunto o también se puede cada escenario por separado.

Carga Plan Semanal

Es similar a lo que se vio anteriormente, aquí se puede colocar toda la información en función a los diferentes escenarios que se quieran hacer.

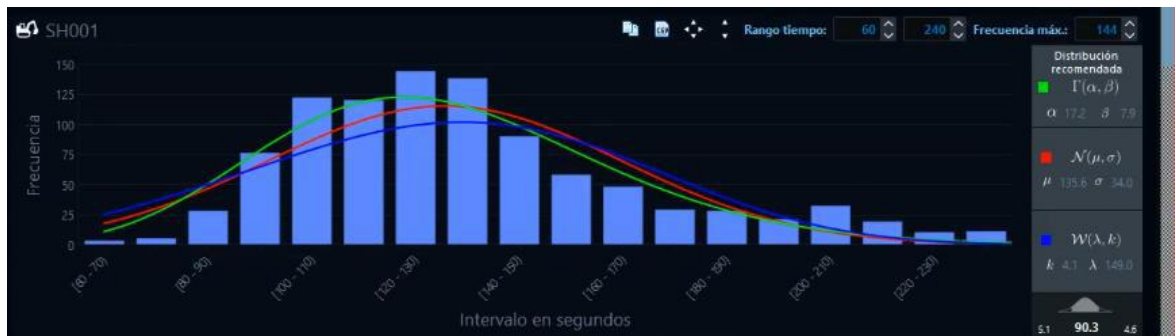


Se puede hacer lo mismo con la disponibilidad de las palas y también lo mismo con la disponibilidad de las flotas. Cuando se vea la disponibilidad de las palas se tiene que ver donde se ha seteado. Igual se tiene la opción de importar y exportar, se muestra el plan semanal con todos los escenarios para una mejor visibilidad.

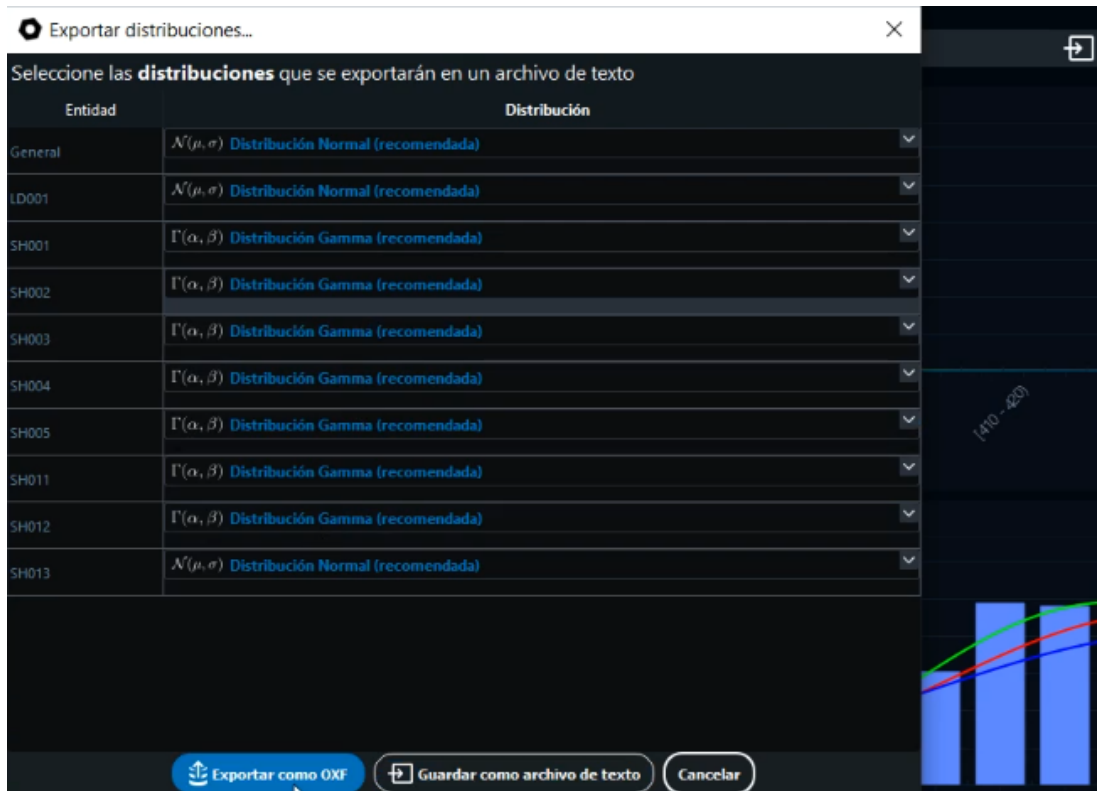
Obtención de la Distribución de Tiempos de Manera Manual

Se obtendrá la distribución de tiempos de manera manual tanto de los tiempos de carga, aculatamiento y descarga de forma manual, la diferencia principal a la obtención de manera automática es que se puede acotar individualmente cada equipo, radicando ahí la diferencia.

No necesariamente tiene que estar 5% por encima y 5% por debajo sino de acuerdo al comportamiento en mina, se acota la distribución de tiempos.



Se exporta la distribución de tiempos de carga



Al momento de exportar puede ser con la distribución recomendada o la que se prefiera

CONFIGURACIONES

Panel de Configuraciones

Tiempos Velocidades

OBTENER TIEMPOS

CAT 7977 Configuraciones Avanzadas

Acilataamiento en punto de carga

$\mathcal{N}(\mu, \sigma)$ Distribución Normal

Media: 71.44 Desviación estándar: 51.78

Descarga en chancador

$W(\lambda, k)$ Distribución de Weibull

Forma: 1.34 Escala: 77.01

Descarga en botadero

$\mathcal{N}(\mu, \sigma)$ Distribución Normal

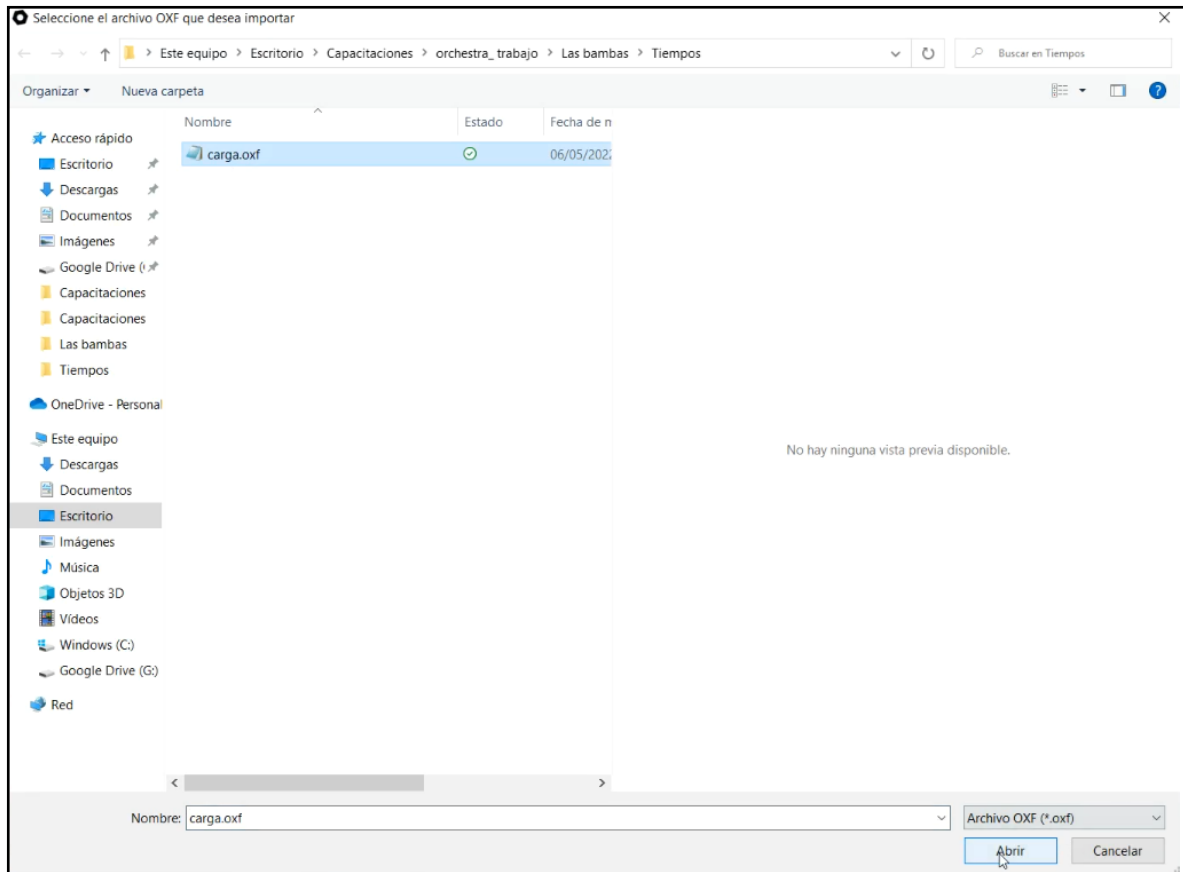
Media: 52.99 Desviación estándar: 28.69

Carga por pala

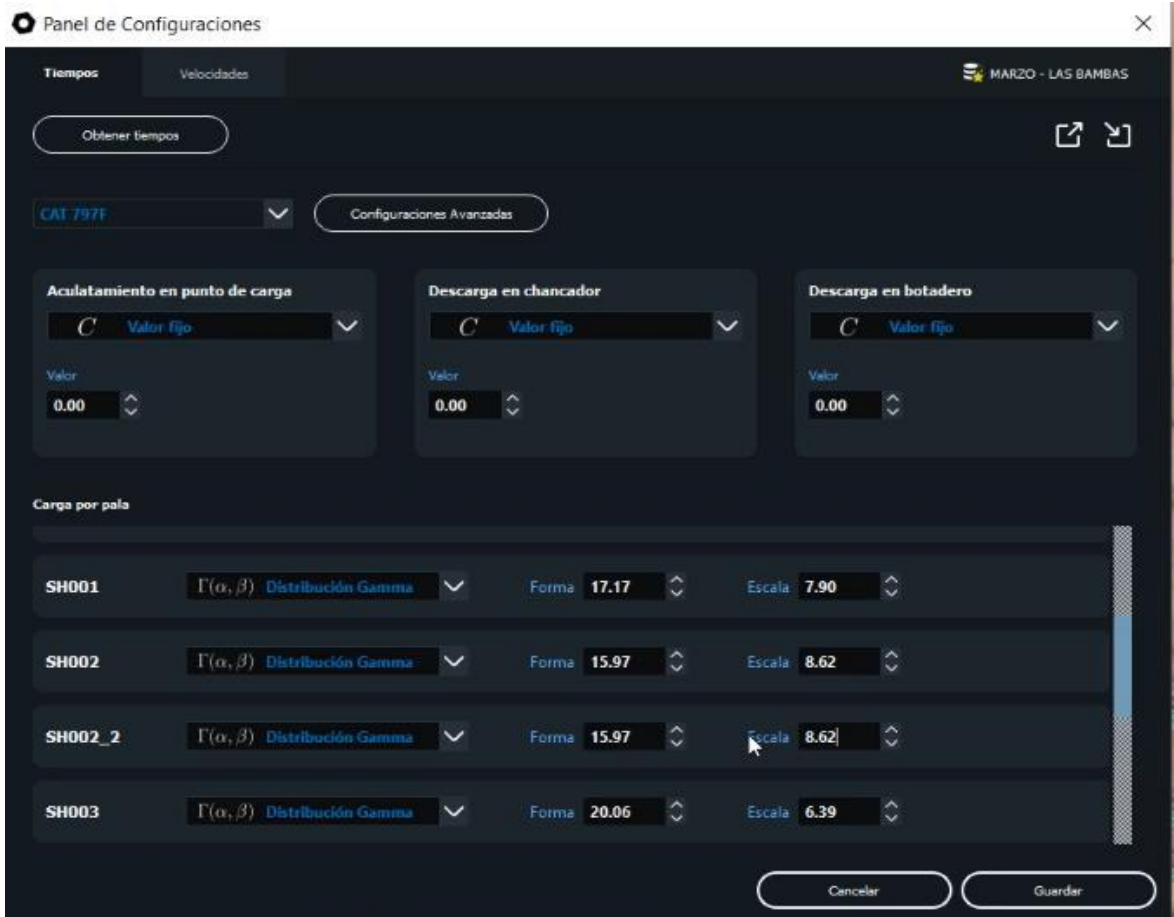
Identificador	Configuración	Valor
EX020	Valor fijo	0.00
LD001	Valor fijo	0.00
LD005	Valor fijo	0.00
LD011	Valor fijo	0.00

Cancelar Guardar

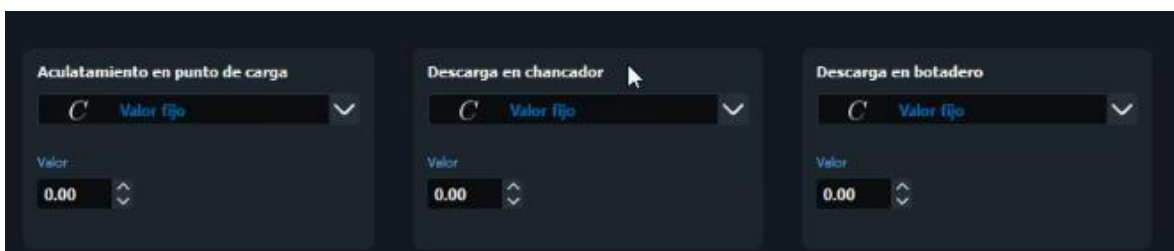
MARZO - LAS BAMBAS



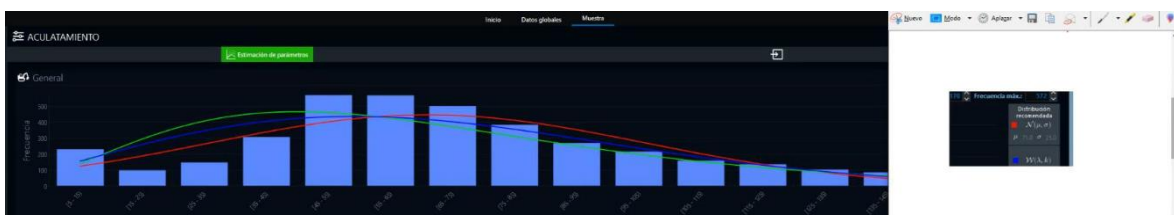
En el módulo de simulación, en configuraciones, se importa la distribución

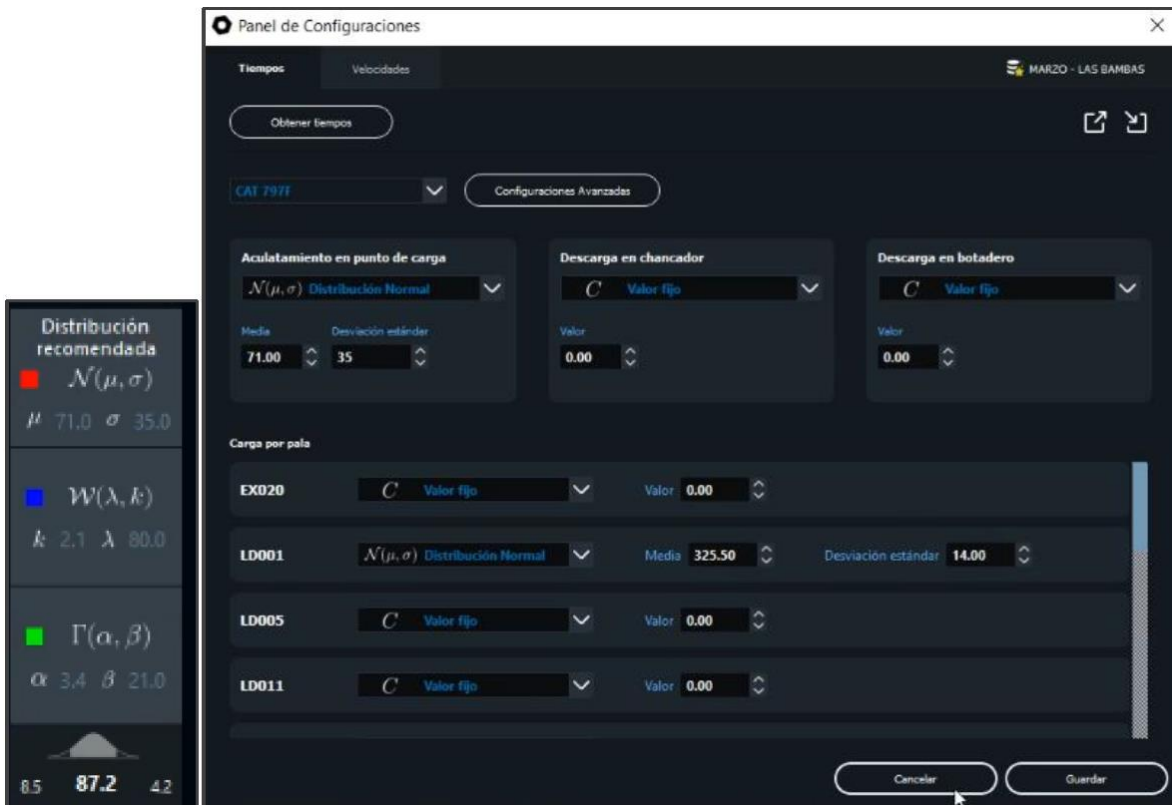


Si los valores de la distribución de carga no se ajustan a los valores mínimos y máximos que se tienen se podría llenar de manera manual los valores de aculatamiento, carga y descarga



Se extrae los tiempos de aculatamiento del módulo análisis que serán insertados de manera manual.

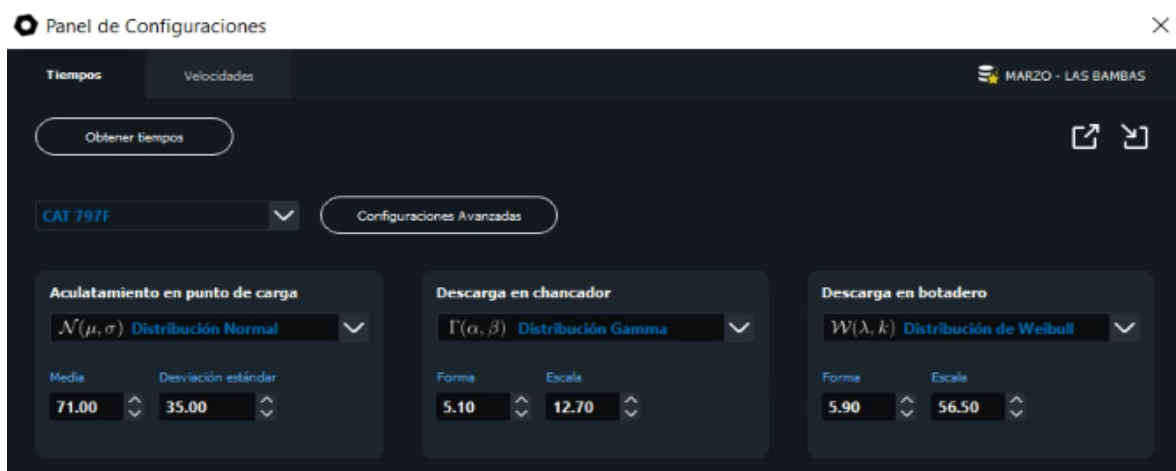




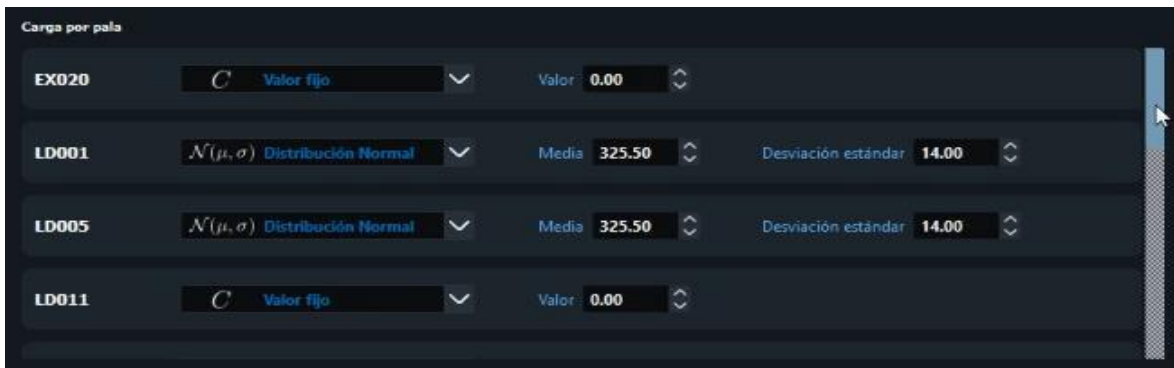
De igual forma para la descarga en el botadero y el chancador



Se ingresa estos valores de distribución manual en el módulo simulación



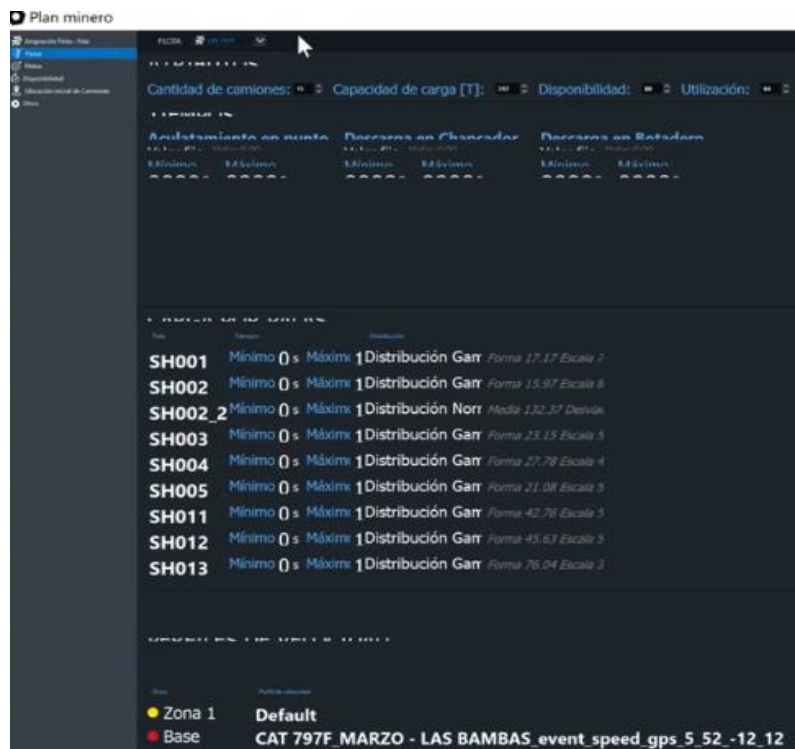
Como el cargador LD005 no tiene datos, se tomarán los datos del cargador LD001



En plan minero se realiza la asignación de palas



Muestra en base a que perfil de velocidades está reconociendo esta flota de camiones en este caso está en función del mapa de calor del CAT797F



Para la determinación de las metas, utiliza la información del módulo análisis

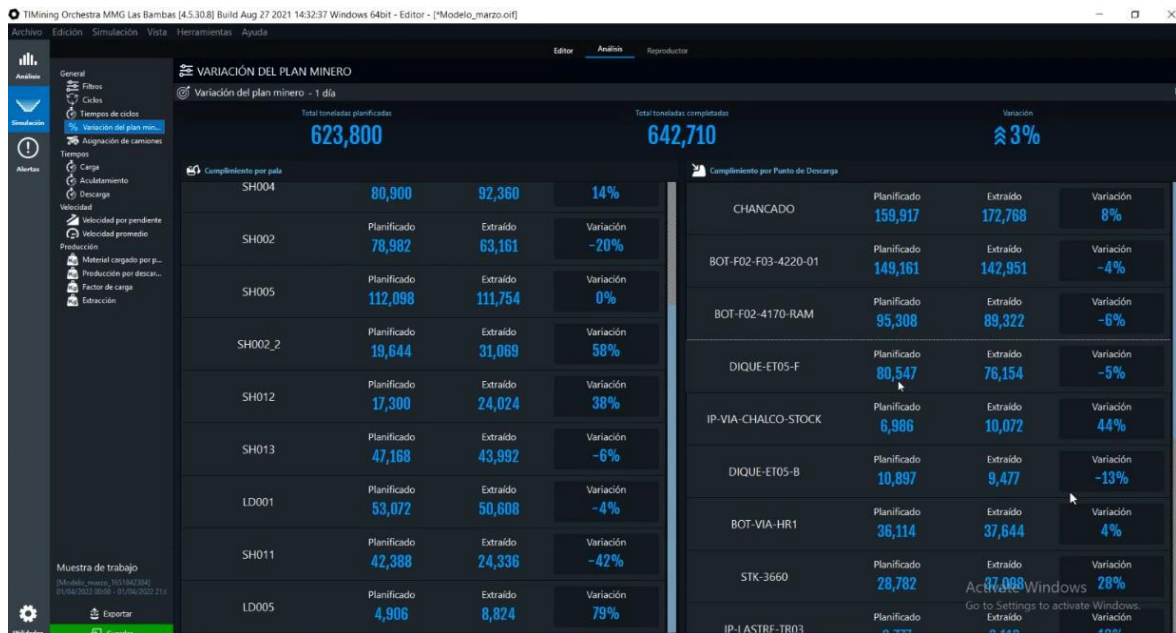
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
	Inicio	Fin	Turno	Camión	Carga	Pala	Descarga	Material	Toneladas [T	Llegada a des T. en mov. [s	T. encolado [s	T. aculat. [s]	T. descarga [s]	T. total [s]	Distancia [m]	Operator			
1	18/03/2022 7:00	18/03/2022 7:04	220318d	HT022	1-02-3810-S1 LD001		CHANCAIDO	Mineral Med	380	#####	0	202	0	59	261	1,010	ESCOBEDO CRUZ HENRY JOSE		
2	18/03/2022 7:00	18/03/2022 7:00	220318d	HT097	1-90-4320-01 LD001		IP-VIA-CHALLI	Desmonte M	160	#####	0	0	0	0	0	0	ESCOBEDO CRUZ HENRY JOSE		
3	18/03/2022 7:00	18/03/2022 7:00	220318d	HT097	1-90-4320-01 LD001		IP-VIA-CHALLI	Desmonte M	160	#####	0	0	0	0	0	0	ESCOBEDO CRUZ HENRY JOSE		
4	18/03/2022 7:00	18/03/2022 7:00	220318d	HT097	1-90-4320-01 LD001		IP-VIA-CHALLI	Desmonte M	160	#####	0	0	0	0	0	0	ESCOBEDO CRUZ HENRY JOSE		
5	18/03/2022 7:00	18/03/2022 7:00	220318d	HT097	1-90-4320-01 LD001		IP-VIA-CHALLI	Desmonte M	160	#####	0	0	0	0	0	0	ESCOBEDO CRUZ HENRY JOSE		
6	18/03/2022 7:00	18/03/2022 7:00	220318d	HT097	1-90-4320-01 LD001		IP-VIA-CHALLI	Desmonte M	160	#####	0	0	0	0	0	0	ESCOBEDO CRUZ HENRY JOSE		
7	18/03/2022 7:00	18/03/2022 7:00	220318d	HT097	1-90-4320-01 LD001		IP-VIA-CHALLI	Desmonte M	160	#####	0	0	0	0	0	0	ESCOBEDO CRUZ HENRY JOSE		
8	18/03/2022 7:00	18/03/2022 7:00	220318d	HT097	1-90-4320-01 LD001		IP-VIA-CHALLI	Desmonte M	160	#####	0	0	0	0	0	0	ESCOBEDO CRUZ HENRY JOSE		
9	18/03/2022 7:00	18/03/2022 7:00	220318d	HT097	1-90-4320-01 LD001		IP-VIA-CHALLI	Desmonte M	160	#####	0	0	0	0	0	0	ESCOBEDO CRUZ HENRY JOSE		
10	18/03/2022 7:00	18/03/2022 7:00	220318d	HT097	1-90-4320-01 LD001		IP-VIA-CHALLI	Desmonte M	160	#####	0	0	0	0	0	0	ESCOBEDO CRUZ HENRY JOSE		
11	18/03/2022 7:00	18/03/2022 7:00	220318d	HT097	1-90-4320-01 LD001		IP-VIA-CHALLI	Desmonte M	160	#####	0	0	0	0	0	0	ESCOBEDO CRUZ HENRY JOSE		
12	18/03/2022 7:00	18/03/2022 7:00	220318d	HT097	1-90-4320-01 LD001		IP-VIA-CHALLI	Desmonte M	160	#####	0	0	0	0	0	0	ESCOBEDO CRUZ HENRY JOSE		
13	18/03/2022 7:00	18/03/2022 7:00	220318d	HT097	1-90-4320-01 LD001		IP-VIA-CHALLI	Desmonte M	160	#####	0	0	0	0	0	0	ESCOBEDO CRUZ HENRY JOSE		
14	18/03/2022 7:00	18/03/2022 7:00	220318d	HT097	1-90-4320-01 LD001		IP-VIA-CHALLI	Desmonte M	160	#####	0	0	0	0	0	0	ESCOBEDO CRUZ HENRY JOSE		
15	18/03/2022 7:00	18/03/2022 7:00	220318d	HT097	1-90-4320-01 LD001		IP-VIA-CHALLI	Desmonte M	160	#####	0	0	0	0	0	0	ESCOBEDO CRUZ HENRY JOSE		
16	18/03/2022 7:00	18/03/2022 7:00	220318d	HT097	1-90-4320-01 LD001		IP-VIA-CHALLI	Desmonte M	160	#####	0	0	0	0	0	0	ESCOBEDO CRUZ HENRY JOSE		
17	18/03/2022 7:00	18/03/2022 7:00	220318d	HT097	1-90-4320-01 LD001		IP-VIA-CHALLI	Desmonte M	160	#####	0	0	0	0	0	0	ESCOBEDO CRUZ HENRY JOSE		
18	18/03/2022 7:00	18/03/2022 7:00	220318d	HT097	1-90-4320-01 LD001		IP-VIA-CHALLI	Desmonte M	160	#####	0	0	0	0	0	0	ESCOBEDO CRUZ HENRY JOSE		
19	18/03/2022 7:00	18/03/2022 7:00	220318d	HT097	1-90-4320-01 LD001		IP-VIA-CHALLI	Desmonte M	160	#####	0	0	0	0	0	0	ESCOBEDO CRUZ HENRY JOSE		
20	18/03/2022 7:00	18/03/2022 7:00	220318d	HT097	1-90-4320-01 LD001		IP-VIA-CHALLI	Desmonte M	160	#####	0	0	0	0	0	0	ESCOBEDO CRUZ HENRY JOSE		

Lo que busca Orchestra es que todos los puntos lleguen a sus metas, en algunos casos excede la meta porque son circuitos muy cerrados o de repente la pala estaba disponible todo el día, mientras que en el otro caso el circuito era muy largo, se debe de tener estos casos en consideración.

Si se desea evaluar un escenario donde se envíe mayor tonelaje al dique se podría duplicar la flota de los camiones y realizar un circuito cerrado, también se podría inhabilitar los botaderos y que lleve solo a los diques ver cuál es la ruta más optima o evaluar diferentes rutas manuales o priorizar rutas,

Consideraciones en la Simulación

En el reporte de variaciones se observa el porcentaje de cumplimiento de la meta, por lo que, si se quiere incrementar el tonelaje de destino a un punto, primero se debería de ver si es que cumple o no cumple con la meta con los datos iniciales, posterior a ello se debería revisar las perdidas operacionales, posterior a ello se haría el incremento de la cantidad de camiones.



Para la variación del plan minero se toma como mejor indicativo la variación total y se considera que un modelo está calibrado cuando tiene un porcentaje de variación de más, menos 5%, adicional a esto revisa de menor manera el cumplimiento por pala, pero se priorizan ciertas tareas como el target del chancado o que el chancado no tenga una variación tan alta,

En orden de prioridad de los indicadores que confirman que el modelo esta calibrado serían:

1. La variación general
2. Cumplimiento por punto de descarga, ver que no esté muy alejado del target
3. Cumplimiento por pala, y se ve que ajustes se puede hacer al modelo.

Lo que se podría revisar en caso el modelo no este calibrado son; la longitud de la distancia, tiempo de ciclo, además de tener la data necesaria para poder construir la distribución de tiempos

Anexo 2: Equipos de carguío

CAT 6060 S



Le Torneau LT2350



Anexo 3: Equipos de Acarreo

KOM 930 4SE



KOM 980 5

