

Universidad Nacional de Ingeniería
Facultad de Ingeniería Geológica Minera y Metalúrgica



TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

**Análisis y modelamiento de variables operativas para mejorar la
productividad en flotas mineras de carguío y acarreo mediante la
determinación del Queue y Hang adecuados**

Para obtener el título profesional de Ingeniero de Minas

Elaborado por

Marco Antonio Gonzales Huamán

 [0009-0004-7646-9507](https://orcid.org/0009-0004-7646-9507)

Asesor

MBA. Eder Leon Salazar Dulanto

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

LIMA – PERÚ

2025

Citar/How to cite	Gonzales Huaman [1]
Referencia/Reference	[1] M. Gonzales Huaman, “ <i>Análisis y modelamiento de variables operativas para mejorar la productividad en flotas mineras de carguío y acarreo mediante la determinación del Queue y Hang adecuados</i> ” [Trabajo de suficiencia profesional de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2025.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

Citar/How to cite	(Gonzales, 2025)
Referencia/Reference	Gonzales, M. (2025). <i>Análisis y modelamiento de variables operativas para mejorar la productividad en flotas mineras de carguío y acarreo mediante la determinación del Queue y Hang adecuados</i> . [Trabajo de suficiencia profesional de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

*A mis padres Carlos, que en paz descanse, y Andrea que
confiaron desde un inicio en mí, a mi amada esposa Karen
por su apoyo y amor en las buenas y en las dificultades, y
por último a mi querido hermano Juan, mejor amigo y
ejemplo en mi vida.*

Agradecimientos

Quiero agradecer a la empresa CIA Minera Antamina por brindarme la oportunidad de afianzar mi formación profesional, así también agradezco a todo el personal de minera Yanacocha, porque han aportado en mis inicios con mi formación profesional y como humano.

Resumen

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo generar un modelo de productividad para los equipos de carguío y acarreo, mediante la correlación y análisis de los principales indicadores operativos que inciden en el desempeño del sistema mina. Se parte de la hipótesis de que un adecuado modelamiento de dichos indicadores permitirá incrementar la productividad y reducir pérdidas asociadas a tiempos improductivos.

La investigación se centró particularmente en el análisis de los tiempos de Queue (espera de camiones en pala) y Hang (espera de la pala por camiones), identificados como las variables con mayor impacto directo en la eficiencia operativa y los costos. A través del procesamiento de información operativa real y la aplicación de modelos de regresión y análisis costo-beneficio, se determinó que no existen valores fijos de Queue y Hang óptimos, ya que estos dependen de factores como la disponibilidad mecánica, utilización, DigRate, cantidad de equipos, productividad y costos unitarios.

Para los escenarios simulados, se establecieron valores óptimos específicos para las palas P&H (Queue de 8% o 3.5 min y Hang de 21% o 0.73 min) y Hitachi (Queue de 8% o 3.6 min y Hang de 26% o 2.0 min). Los resultados evidenciaron que un incremento controlado del Queue y una reducción estratégica del Hang pueden generar mejoras sustanciales en la producción total, con una ganancia estimada de 27 millones de toneladas anuales, lo que representa un beneficio económico de aproximadamente 49.7 millones de dólares por año, considerando los costos de oportunidad ficticios evaluados.

El estudio concluye que la gestión dinámica y planificada del Queue y Hang, ajustada mensualmente según las condiciones operativas, representa una herramienta clave para la optimización continua de flotas mineras y para maximizar el rendimiento del sistema pala-camión.

Palabras clave — Queue, Hang, productividad, producción, costos, modelo de regresión lineal.

Abstract

The present research aims to develop a productivity model for loading and hauling equipment by correlating and analyzing the main operational indicators that affect the performance of the mining system. The study is based on the hypothesis that an appropriate modeling of these indicators will lead to increased productivity and reduced losses associated with unproductive times.

The research focused specifically on the analysis of Queue times (truck waiting at the shovel) and Hang times (shovel waiting for trucks), which were identified as the variables with the greatest direct impact on operational efficiency and costs. Through the processing of real operational data and the application of regression models and cost-benefit analysis, it was determined that there are no fixed optimal values for Queue and Hang, as they depend on factors such as mechanical availability, utilization, DigRate, equipment quantity, productivity, and unit costs.

For the simulated scenarios, specific optimal values were established for P&H shovels (Queue of 8% or 3.5 min and Hang of 21% or 0.73 min) and Hitachi shovels (Queue of 8% or 3.6 min and Hang of 26% or 2.0 min). The results showed that a controlled increase in Queue and a strategic reduction in Hang can lead to substantial improvements in total production, with an estimated gain of 27 million tons per year, representing an economic benefit of approximately 49.7 million USD annually, based on the evaluated fictitious opportunity costs.

The study concludes that a dynamic and planned management of Queue and Hang, adjusted monthly according to operational conditions, is a key tool for the continuous optimization of mining fleets and for maximizing the performance of the shovel-truck system.

Keywords — Queue, Hang, productivity, production, costs, linear regression model.

Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen	v
Abstract	vi
Introducción	xiv
Capítulo I. Parte introductoria del trabajo	1
1.1 Generalidades	1
1.2 Descripción del problema de investigación	2
1.3 Objetivo	3
1.3.1 Objetivo general	3
1.3.2 Objetivo específico	3
1.4 Hipótesis	3
1.4.1 Hipótesis general	3
1.4.2 Hipótesis específica	3
1.5 Operacionalización de variables	4
1.5.1 Variable independiente (V.I)	4
1.5.2 Variable dependiente (V.D)	4
1.6 Antecedentes referenciales	5
1.6.1 Antecedentes internacionales	5
1.6.2 Antecedentes nacionales	7
1.6.3 Antecedentes locales	9
Capítulo II. Marcos teórico y conceptual	11
2.1 Marco Teórico	11
2.1.1 Indicadores operativos de mina	11
2.1.2 Modelamiento por regresión lineal	24
2.2 Marco conceptual	28
2.2.1 Capacidad	28
2.2.2 Tonelaje	28

2.2.3	Tiempo	28
2.2.4	Eficiencia.....	28
2.2.5	Factor.....	28
2.2.6	Match	28
2.2.7	Estatus.....	28
2.2.8	DigRate	29
2.2.9	Simulación	29
2.2.10	Modelo	29
2.2.11	Variable.....	29
Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación		30
3.1	Recolección de datos.....	30
3.1.1	Unidad de estudio	30
3.1.2	KPIs de equipos de carguío (palas).....	34
3.1.3	KPIs de equipos de acarreo (camiones).....	41
3.2	Procesamiento de la información	46
3.2.1	Modelamiento de productividad de palas	46
3.2.2	Modelamiento de productividad de camiones.....	64
3.2.3	Modelamiento de variación de productividad de equipos	77
Capítulo IV. Análisis e interpretación de resultados		82
4.1	Análisis de resultados	82
4.1.1	Evaluación de productividad y producción.....	82
4.1.2	Evaluación de capacidad de carguío.....	87
4.1.3	Evaluación económica	88
4.2	Validación de hipótesis.....	91
Conclusiones		94
Recomendaciones		95
Referencias bibliográficas.....		96

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 : Matriz de consistencia.....	4
Tabla 2 : Equipos principales de la operación	34
Tabla 3 : KPIs de palas P&H.....	35
Tabla 4 : Distribución de frecuencia de productividad de palas P&H.....	37
Tabla 5 : KPIs de palas HITACHI.....	38
Tabla 6 : Distribución de frecuencia de productividad de palas HITACHI.....	40
Tabla 7 : KPIs de camiones CAT	41
Tabla 8 : KPIs de camiones KOM	44
Tabla 9 : Regresión lineal – Productividad vs (DigRate & Hang) – palas P&H	49
Tabla 10: Evolución de productividad en palas P&H.....	50
Tabla 11: Regresión lineal – Queue vs Hang – palas P&H	51
Tabla 12: Regresión lineal – t.Hang vs Hang – palas P&H	52
Tabla 13: Regresión lineal – t.Queue vs Queue – palas P&H	53
Tabla 14: Regresión lineal – Productividad vs (DigRate & Hang) – palas HITACHI	54
Tabla 15: Evolución de productividad en palas HIITACHI	55
Tabla 16: Regresión lineal – Hang vs Queue – palas HITACHI	56
Tabla 17: Regresión lineal – t.Hang vs Hang – palas HITACHI.....	57
Tabla 18: Regresión lineal – t.Queue vs Queue – palas HITACHI	58
Tabla 19: Simulación de productividad a DigRate constante – palas P&H.....	60
Tabla 20: Simulación de productividad a DigRate constante – palas HITACHI	60
Tabla 21: Correlación DigRate vs t.Hang y t.Queue – palas P&H	61
Tabla 22: Correlación DigRate vs t.Hang y t.Queue – palas HITACHI	62
Tabla 23: Regresión lineal – Productividad vs (EFH & t.Ciclo) – camiones CAT	66
Tabla 24: Evolución de productividad en camiones CAT	67
Tabla 25: Regresión lineal – t.Ciclo vs (velocidad & EFH) – camiones CAT	68
Tabla 26: Regresión lineal – Productividad vs (EFH & t.Ciclo) – camiones KOM	69

Tabla 27: Evolución de productividad en camiones KOM	70
Tabla 28: Regresión lineal – t.Ciclo vs (velocidad & EFH) – camiones KOM	71
Tabla 29: Simulación de producción (EFH constante) – camiones CAT.....	73
Tabla 30: Simulación de producción (EFH constante) – camiones KOM.....	73
Tabla 31: Variación de producción por incremento de velocidad	74
Tabla 32: Simulación de producción (velocidad constante) – camiones CAT	75
Tabla 33: Simulación de producción (velocidad constante) – camiones KOM.....	75
Tabla 34: Variación de producción por incremento de EFH	76
Tabla 35: Regresión lineal – Δ Productividad vs Queue – camiones CAT	77
Tabla 36: Regresión lineal – Δ Productividad vs Queue – camiones KOM.....	78
Tabla 37: Regresión lineal – Δ Productividad vs Hang – palas P&H	79
Tabla 38: Regresión lineal – Δ Productividad vs Hang – palas HITACHI	80
Tabla 39: Parametros operativos para evaluación de productividad de equipos	82
Tabla 40: Evolución de productividad y producción (sistema P&H – CAT – KOM).....	83
Tabla 41: Evolución de productividad y producción (sistema HITACHI – CAT – KOM)...	84
Tabla 42: Evolución de la producción variación de Queue y Hang.....	87
Tabla 43: Evolución de la costos variación de Queue y Hang.....	88
Tabla 44: Calculo de beneficio económico por cambio de Queue (5% - 8%)	90
Tabla 45: Resumen de resultados de productividad de palas	91

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 : Línea de tiempo - estatus de equipos	13
Figura 2 : Disponibilidad y utilización de camiones	15
Figura 3 : Ciclo de la pala – tiempo de Hang	17
Figura 4 : Ciclo de la pala – tiempo de Stop Time: no hay cola.....	18
Figura 5 : Ciclo de la pala – tiempo de Stop Time: hay cola.....	18
Figura 6 : Ciclo de la pala – tiempo de carguío	19
Figura 7 : Disponibilidad y utilización de palas	20
Figura 8 : Tiempo de cola (Queue) – no hay camión en pala.....	21
Figura 9 : Tiempo de cola (Queue) – hay camiones en baliza.....	22
Figura 10: Ejemplo de cálculo de EFH.....	23
Figura 11: Calculo de velocidad de acarreo	23
Figura 12: Ubicación del proyecto minero	30
Figura 13: Geología regional del yacimiento	31
Figura 14: Geología local del yacimiento	32
Figura 15: Sección geológica que muestra las alteraciones.....	33
Figura 16: DigRate – palas P&H	35
Figura 17: Productividad – palas P&H	36
Figura 18: Hang – palas P&H	36
Figura 19: Histograma de frecuencias – palas P&H.....	38
Figura 20: DigRate – palas HITACHI	39
Figura 21: Productividad – palas HITACHI.....	39
Figura 22: Hang – palas HITACHI.....	40
Figura 23: Histograma de frecuencias – palas HITACHI	41
Figura 24: Queue – camiones CAT.....	42
Figura 25: Media t. ciclo – camiones CAT.....	42
Figura 26: Velocidad – camiones CAT.....	43

Figura 27: Productividad – camiones CAT	43
Figura 28: Queue – camiones KOM.....	44
Figura 29: Media t. ciclo – camiones KOM.....	45
Figura 30: Velocidad – camiones KOM	45
Figura 31: Productividad – camiones KOM	46
Figura 32: Relación productividad vs Hang – palas P&H	46
Figura 33: Relación productividad vs DigRate – palas P&H	47
Figura 34: Relación productividad vs Hang – palas HITACHI	47
Figura 35: Relación productividad vs DigRate – palas HITACHI	48
Figura 36: Productividad real vs teórica – palas P&H.....	49
Figura 37: Grafica de la función productividad de palas P&H.....	50
Figura 38: Hang vs Queue – palas P&H	51
Figura 39: t.Hang vs Hang – palas P&H.....	52
Figura 40: t.Queue vs Queue – palas P&H	53
Figura 41: Productividad real vs teórica – palas HITACHI.....	54
Figura 42: Grafica de la función productividad de palas HITACHI.....	55
Figura 43: Hang vs Queue – palas HITACHI	56
Figura 44: t.Hang vs Hang – palas HITACHI.....	57
Figura 45: t.Queue vs Queue – palas HITACHI	58
Figura 46: Diagrama de flujo de correlación de variables – palas	59
Figura 47: Simulación de productividad a DigRate constante – palas P&H.....	60
Figura 48: Simulación de productividad a DigRate constante – palas HITACHI	61
Figura 49: Correlación DigRate vs t.Hang – palas P&H	62
Figura 50: Correlación DigRate vs t.Queue – palas P&H	62
Figura 51: Correlación DigRate vs t.Hang – palas HITACHI	63
Figura 52: Correlación DigRate vs t.Queue – palas HITACHI	63
Figura 53: Relación productividad vs EFH – camiones CAT	64
Figura 54: Relación productividad vs t.Ciclo – camiones CAT	64

Figura 55: Relación productividad vs EFH – camiones KOM	65
Figura 56: Relación productividad vs t.Ciclo – camiones KOM	65
Figura 57: Productividad real vs teórica – camiones CAT	67
Figura 58: Grafica de la función productividad de camiones CAT	68
Figura 59: t.Ciclo real vs teórica – camiones CAT	69
Figura 60: Productividad real vs teórica – camiones KOM	70
Figura 61: Grafica de la función productividad de camiones KOM	71
Figura 62: t.Ciclo real vs teórica – camiones KOM	72
Figura 63: Diagrama de flujo de correlación de variables – camiones	72
Figura 64: Simulación de producción vs velocidad	74
Figura 65: Simulación de producción vs EFH	76
Figura 66: Δ Productividad real vs teórica – camiones CAT	78
Figura 67: Δ Productividad real vs teórica – camiones KOM	79
Figura 68: Δ Productividad real vs teórica – palas P&H	80
Figura 69: Δ Productividad real vs teórica – palas HITACHI	81
Figura 70: Diagrama de flujo de correlación de variables – variación de productividad ...	81
Figura 71: Productividad vs Queue / Hang– palas P&H	85
Figura 72: Productividad vs t.Queue / t.Hang– palas P&H	85
Figura 73: Productividad vs Queue / Hang– palas HITACHI	86
Figura 74: Productividad vs t.Queue / t.Hang– palas HITACHI	86
Figura 75: Evaluación de capacidad de carguío	87
Figura 76: Perdida de tonelaje por variación de Queue y Hang	89
Figura 77: Perdida de costos por variación de Queue y Hang	89
Figura 78: Beneficio económico acumulado por cambio de Queue	90
Figura 79: Prueba de normalidad – productividad palas P&H	92
Figura 80: Prueba de normalidad – productividad palas HITACHI	92
Figura 81: Prueba de Z – productividad palas P&H	93
Figura 82: Prueba de Z – productividad palas HITACHI	93

Introducción

El desarrollo del presente trabajo se estructura en cuatro capítulos, cada uno diseñado para abordar de forma progresiva y técnica los componentes fundamentales del estudio. El Capítulo I se centra en el planteamiento del problema, el cual surge de la necesidad de comprender cómo los indicadores operativos influyen directamente en la eficiencia del sistema pala-camión. Se formulan los objetivos general y específicos, se define la hipótesis de trabajo, y se establecen las variables que serán evaluadas. Asimismo, se revisan antecedentes referenciales tanto a nivel nacional como internacional, los cuales permiten contextualizar el estudio dentro de investigaciones previas y experiencias reales en minería a tajo abierto.

El Capítulo II desarrolla el marco teórico, donde se explican los principales indicadores operativos de mina, tales como la disponibilidad mecánica, utilización, DigRate, Queue y Hang. Se detalla también la teoría de regresión lineal simple y múltiple, como herramienta estadística para analizar la relación entre variables independientes y dependientes. Además, se incluye el marco conceptual, el cual define los términos clave utilizados en la investigación, asegurando una interpretación precisa y consistente de los conceptos aplicados.

En el Capítulo III, se expone la metodología utilizada, incluyendo la definición de la unidad de análisis, la descripción del sistema de recolección de datos (Dispatch), los KPIs evaluados y los criterios de validación. Se detalla el procedimiento de modelamiento de productividad, tanto individual como integrado, para los equipos de carguío y acarreo, utilizando herramientas de análisis estadístico y simulación.

Finalmente, el Capítulo IV presenta el análisis de resultados, que comprende la evaluación de la productividad y producción, el análisis del balance entre capacidad de carguío y acarreo, una evaluación económica del sistema y la validación de la hipótesis, concluyendo con recomendaciones estratégicas y la bibliografía especializada que respalda el estudio.

Capítulo I. Parte introductoria del trabajo

1.1 Generalidades

La eficiencia operativa en minería a tajo abierto está estrechamente vinculada al desempeño de los procesos de carguío y acarreo, los cuales representan una parte significativa de los costos y tiempos asociados a la producción minera. Estos procesos, al estar compuestos por múltiples fases y sujetos a condiciones dinámicas, requieren de un control riguroso y una evaluación constante para asegurar el cumplimiento de los objetivos de producción establecidos.

En muchas operaciones, a pesar de contar con una infraestructura operativa suficiente, los niveles reales de productividad no alcanzan las metas proyectadas. Esta brecha entre la capacidad operativa y los resultados obtenidos responde, en gran medida, a la variabilidad de ciertos indicadores operativos clave, como los tiempos efectivos de trabajo, los tiempos de espera, la eficiencia del ciclo operativo, la disponibilidad y la utilización de los recursos. La falta de análisis detallado y correlación entre estos indicadores puede originar desequilibrios en la operación, generando ineficiencias que afectan el rendimiento general del sistema.

Asimismo, la toma de decisiones operativas suele estar limitada por la carencia de modelos técnicos que integren de manera sistemática el comportamiento de estos indicadores. En consecuencia, la asignación de recursos, la planificación de rutas y la programación de turnos pueden verse afectadas por decisiones no basadas en datos, lo que incrementa la probabilidad de incurrir en sobrecostos y tiempos improductivos.

En este contexto, el análisis y modelamiento de los principales indicadores operativos se plantea como una herramienta fundamental para optimizar el sistema de carguío y acarreo. El estudio de la interacción entre estas variables permitirá establecer parámetros de operación más adecuados, reducir la variabilidad en los procesos y mejorar el uso de los recursos disponibles. De este modo, es posible generar propuestas técnicas orientadas a la mejora continua de la productividad, sin necesidad de recurrir a

ampliaciones de capacidad, sino a partir de una gestión más eficiente de la operación existente.

La presente investigación tiene como finalidad desarrollar un modelo de análisis que integre los principales indicadores operativos involucrados en el proceso de carguío y acarreo, con el propósito de identificar patrones de comportamiento, evaluar su impacto en la producción y contribuir con herramientas de apoyo a la toma de decisiones en entornos mineros complejos.

1.2 Descripción del problema de investigación

En las operaciones mineras a tajo abierto, el rendimiento de los equipos de carguío y acarreo constituye un factor crítico para el cumplimiento de los planes de producción. En particular, las palas eléctricas P&H 4100 y las excavadoras hidráulicas Hitachi 4600, combinadas con camiones de acarreo de gran capacidad como los CAT 793 y Komatsu 930, conforman una parte esencial del sistema productivo. Sin embargo, en la actualidad, la producción alcanzada por estas unidades está por debajo de los valores proyectados, lo que genera un impacto directo en la eficiencia operativa y en los costos unitarios de producción.

Este desempeño subóptimo no solo compromete los objetivos diarios y mensuales de tonelaje movido, sino que también revela una pérdida de productividad significativa en los turnos de operación. Entre los múltiples factores que podrían estar influyendo en esta situación, destacan de manera recurrente dos indicadores operativos clave: el tiempo de espera de los camiones para ser cargados (Queue) y el tiempo de espera de las palas o cargadores debido a la falta de camiones disponibles (Hang).

La presencia excesiva de tiempo Queue sugiere una sobredemanda de camiones sin una capacidad de carguío proporcional, lo que provoca inactividad prolongada y subutilización de los equipos de acarreo. Por otro lado, valores elevados de tiempo Hang indican que las palas se encuentran detenidas o en espera por lapsos prolongados, lo que reduce su disponibilidad efectiva para el trabajo de carguío. Estos desequilibrios entre

carguío y acarreo reflejan una descoordinación operativa que afecta el desempeño global del sistema. (Fuente: Proyecto minero)

A pesar de la importancia crítica de estos tiempos en la productividad de la operación, se ha observado que no existe un análisis sistemático ni un modelo operativo que permita comprender con precisión la dinámica de las variables involucradas y su influencia en los tiempos Hang y Queue. Esta ausencia de información estructurada dificulta la toma de decisiones informadas por parte de los supervisores y planificadores de mina, lo que perpetúa la ineficiencia operativa y limita el potencial de mejora continua en los procesos de carguío y acarreo.

Por lo anterior descrito se plantea el siguiente problema.

¿En qué medida una inadecuada distribución de tiempos en equipos de mina impacta de manera negativa en la producción de los equipos de carguío y acarreo?

¿En qué medida una inadecuada distribución de tiempos en equipos de mina impacta en la pérdida de beneficio económico por tiempos de inactividad?

1.3 Objetivo

1.3.1 Objetivo general

Mejorar la productividad de las flotas mineras de carguío y acarreo.

1.3.2 Objetivo específico

Reducir las pérdidas de beneficio económico por tiempos de inactividad.

1.4 Hipótesis

1.4.1 Hipótesis general

Un adecuado modelamiento de variables operativas permitirá incrementar la productividad de equipos de carguío y acarreo.

1.4.2 Hipótesis específica

Un adecuado modelamiento de variables operativas permitirá reducir las pérdidas de beneficio económico en la operación de equipos de carguío y acarreo.

1.5 Operacionalización de variables

1.5.1 Variable independiente (V.I)

- X: Variables operativas.
 - Tiempo Hang (minutos / carga).
 - Tiempo Queue (minutos / carga).
 - DigRate (toneladas / hora)
 - EFH (metros).
 - Tiempo ciclo (minutos).

1.5.2 Variable dependiente (V.D)

- Y1: Productividad.
 - Productividad de palas (toneladas / hora).
 - Productividad de camiones (toneladas / hora).
- Y2: Costos.
 - Costo de palas (US\$ / tonelada).
 - Costo de camiones (US\$ / tonelada).

Tabla 1

Matriz de consistencia

Problema	Objetivo	Hipótesis	Variable Independiente	Variable Dependiente	Indicadores
¿En qué medida una inadecuada distribución de tiempos en equipos de mina impacta de manera negativa en la producción de los equipos de carguío y acarreo?	Mejorar la productividad de las flotas mineras de carguío y acarreo	Un adecuado modelamiento de las variables operativas permitirá incrementar la productividad de equipos de carguío y acarreo.	X: Variables operativas.	Y1: Productividad	Ton / Hr
¿En qué medida una inadecuada distribución de tiempos en equipos de mina impacta en la pérdida de beneficio económico por tiempos de inactividad?	Reducir las pérdidas de beneficio económico por tiempos de inactividad.	Un adecuado modelamiento de variables operativas permitirá reducir las pérdidas de beneficio económico en la operación de equipos de carguío y acarreo.		Y2: Costos de operación	US\$ / Tn

Fuente: Elaboración propia

1.6 Antecedentes referenciales

1.6.1 Antecedentes internacionales

Attia et al. (2024). Using queuing theory and cost-emission analysis in an open-pit phosphate mine. Este trabajo fue desarrollado en una mina de fosfato en Argelia y combina teoría de colas con análisis de emisiones y costos operativos. Utilizando el modelo M/M/1, los autores simularon la operación de una pala y múltiples camiones para encontrar el punto de operación más eficiente. Se analizó cómo varían las emisiones de CO₂ y el costo por tonelada al aumentar la flota de acarreo. El tiempo de espera (Queue) y el tiempo inactivo (Hang) fueron identificados como los principales factores que elevaban las emisiones y el consumo de combustible. Se propuso el uso del “factor de emparejamiento” (match factor) para asegurar una asignación óptima camión–pala. El modelo permitió identificar el número ideal de camiones para mantener un equilibrio entre productividad, sostenibilidad y costos.

Ercelebi, S. & Bascetin, A. (2009). Performance measures and productivity assessment in open-pit mining using time studies and dispatch data. Este estudio canadiense se centró en evaluar los tiempos del ciclo de acarreo utilizando datos de sistemas de despacho minero. Se realizó un análisis detallado del ciclo completo: carga, transporte, descarga y retorno. Se identificó que los tiempos de espera por camiones (Queue) y de las palas por camiones (Hang) representaban hasta un 35% del tiempo total improductivo. Se emplearon herramientas estadísticas para medir la variabilidad y se propusieron indicadores de desempeño basados en EFH (Equivalent Flat Haul). Esta métrica permitió una mejor evaluación del desgaste real de los equipos y la planificación de mantenimientos. El estudio fue pionero en integrar datos de tiempo real en la evaluación de productividad minera.

Kaungu et al. (2021). Optimization of shovel-truck haulage system in an open pit using queuing approach. Este artículo presenta un estudio aplicado en una cantera de piedra caliza en Kenia, donde se utilizó la teoría de colas para analizar el rendimiento del sistema pala-camión. Se aplicó el modelo M/M/s para representar las llegadas y servicios

de camiones con base en datos reales. El estudio evaluó diferentes configuraciones de flota (6, 8, 10, 12 camiones) para determinar cuál generaba el mejor equilibrio entre productividad y tiempo de espera. Los resultados mostraron que una flota con 12 camiones y 2 palas ofrecía el mejor rendimiento, alcanzando una producción diaria cercana a las 7 644 toneladas. Sin embargo, añadir más camiones incrementaba significativamente el tiempo de espera en cola (Queue), reduciendo la eficiencia general del sistema. El modelo fue validado con simulaciones en MATLAB y se propuso su uso como herramienta de planificación minera.

Koryagin, M. & Voronov, A. (2017). Improving the organization of the shovel-truck systems in open-pit coal mines. Este artículo evalúa cómo reorganizar sistemas pala-camión para reducir ineficiencias operativas en minas de carbón rusas. Se propuso una estrategia basada en reglas heurísticas y simulación estocástica para distribuir dinámicamente los camiones según la disponibilidad de las palas, minimizando los tiempos de espera (Queue) y los tiempos ociosos (Hang). Se consideraron variables aleatorias como tiempos de carga, descarga, fallas mecánicas y distancias. El modelo fue probado en condiciones reales de operación, mostrando que la nueva estrategia redujo el tiempo total de espera en un 21% y aumentó la utilización efectiva de las palas en un 12%. También se destacó la importancia de contar con un sistema de despacho inteligente y adaptativo.

Rist, R. & Smith, M. (2016). Improving shovel-truck productivity through operational efficiencies at Tarkwa Mine. Este estudio se llevó a cabo en la mina Tarkwa (Ghana), una operación a cielo abierto de gran escala. Mediante análisis operativo y simulación discreta, los autores evaluaron cómo mejorar la eficiencia del sistema pala-camión. Se centraron en identificar y cuantificar los principales cuellos de botella asociados a los tiempos de espera de los camiones (Queue) frente a las palas, así como los tiempos de espera de las palas por camiones (Hang). Los resultados mostraron que la productividad global del sistema se veía significativamente afectada por desbalances en la asignación de camiones, especialmente en turnos de alta congestión. La simulación permitió estimar que una

reducción del 15% en el tiempo promedio de Queue generaría un incremento del 10% en el tonelaje diario movido. Además, se propuso una metodología de análisis estructurado para clasificar las causas de ineficiencia y simular escenarios operativos.

1.6.2 Antecedentes nacionales

Araujo, R. (2018). Optimización de la flota de volquetes en el acarreo, para incrementar la producción en la mina Los Andes Perú Gold – Huamachuco. Esta tesis analiza el rendimiento de la flota de acarreo en la mina Los Andes Perú Gold, ubicada en Huamachuco, desde un enfoque de optimización operativa. Se evaluaron tiempos de ciclo, tiempo efectivo de transporte, tiempos de espera (Queue y Hang), y eficiencia por equipo. La investigación identificó que el uso no balanceado de camiones generaba tiempos muertos prolongados en las estaciones de carguío y descarga. Se planteó una redistribución de la flota y reprogramación de ciclos, lo cual permitió reducir los costos operativos de acarreo de 0.72 USD a 0.57 USD por tonelada transportada. Esta optimización también permitió aumentar la producción en más de un 12% sin necesidad de adquirir nuevos equipos. El enfoque de este trabajo se orienta al uso de herramientas de gestión operativa con enfoque económico.

Gutiérrez, J. (2017). Teoría de colas aplicada al carguío y acarreo en una mina de hierro. Este trabajo se centra en la aplicación de la teoría de colas para analizar y modelar el rendimiento de las operaciones de carguío y acarreo en una mina de hierro a tajo abierto en el Perú. El autor plantea que una asignación ineficiente de camiones a las palas genera tiempos de espera innecesarios (Queue y Hang), que afectan negativamente la productividad. Para ello, se analiza la tasa de llegada de camiones a las estaciones de carga y se determina el número óptimo de unidades que debe operar para minimizar los tiempos muertos. Se identificó que la fragmentación del material también influye indirectamente en estos tiempos, ya que afecta el ritmo de carguío. La investigación propone un modelo que ayuda a equilibrar el sistema, reducir los cuellos de botella y mejorar el rendimiento global de la operación, especialmente en la planificación de turnos y secuencia de carguío.

Oscátegui, J. & Flores, J. (2023). Modelo de control de tiempos improductivos en el proceso de carguío y acarreo mediante el uso de software de simulación Arena. La investigación presenta un modelo de simulación desarrollado con el software Arena para representar y optimizar el proceso de carguío y acarreo en una unidad minera superficial del centro del Perú. A partir del análisis de datos reales de ciclos de acarreo, tiempos de espera y disponibilidad de equipos, se identificaron los principales focos de ineficiencia: los tiempos Queue (camión esperando carga) y Hang (pala esperando camión). El modelo permitió simular distintos escenarios operativos, como el cambio en la cantidad de camiones, la asignación por zonas o la prioridad de despacho. Se comprobó que es posible reducir hasta en un 20% los tiempos improductivos si se realiza una adecuada reasignación de flota y se mejora la logística operativa. El trabajo destaca cómo el uso de herramientas de simulación puede aportar decisiones informadas y cuantificables para mejorar la productividad.

Saldaña, A. (2013). Productividad en el ciclo de carguío y acarreo en el tajo Chaquicocha bajo clima severo – Minera Yanacocha. Este estudio se desarrolló en la mina Chaquicocha – Yanacocha y se centra en el impacto de condiciones climáticas adversas (lluvias intensas, niebla, baja visibilidad) sobre la productividad del ciclo de carguío y acarreo. Se recopilaron datos de operación durante eventos climáticos severos, observando que los tiempos de Queue y Hang se incrementaban hasta en 30%, debido a restricciones en desplazamiento, visibilidad y condiciones de acceso a las zonas de carguío. El autor analizó cómo los cambios en las condiciones de la vía, en los protocolos de seguridad y en la comunicación entre equipos aumentaban los tiempos muertos. Se sugirieron medidas como el mejoramiento del drenaje, refuerzo del lastre en las vías y mejoras en el sistema de despacho para mitigar las pérdidas de productividad.

Tomairo, E. (2018). Aplicación del modelo matemático de simulación a las operaciones mineras unitarias de carguío y acarreo en tajos abiertos. La tesis propone una simulación matemática de los procesos de carguío y acarreo en minas de tajo abierto, utilizando la herramienta de Monte Carlo para evaluar la variabilidad operativa. Se

modelaron todas las fases del ciclo: tiempo de carga, espera, acarreo, descarga y retorno. El autor cuantificó cómo los tiempos de espera de camiones frente a la pala (Hang) y las colas de camiones esperando su turno (Queue) reducen considerablemente la eficiencia del sistema. El estudio también demuestra cómo el sobredimensionamiento de flota o una mala sincronización puede provocar congestión operativa y un uso ineficiente de recursos. A través de la simulación de distintos escenarios operativos, se identifica el equilibrio ideal entre número de camiones y palas, logrando así una mejora notable en la producción y la reducción de costos unitarios.

1.6.3 Antecedentes locales

Quiquia, G. (2015). Mejoramiento continuo en la gestión del ciclo de acarreo de camiones en minería a tajo abierto en Antamina, Cerro Verde, Toquepala, Cuajone, Yanacocha, Alto Chicama, Las Bambas, Cerro Corona, Antapaccay y Pucamarca. Este trabajo de investigación se enfoca en la optimización del ciclo de acarreo de camiones en operaciones a tajo abierto, siendo la mina Antamina una de las principales referencias de análisis. Mediante la metodología Six Sigma (DMAIC) y el uso de datos obtenidos del sistema de despacho en tiempo real (Dispatch Modular), se identifican y cuantifican los tiempos improductivos en el ciclo de acarreo, con énfasis en los tiempos de espera de los camiones (Queue) y los tiempos de espera de las palas por camiones (Hang). El estudio demuestra que un alto porcentaje de ineficiencias en la productividad está relacionado con un desbalance entre la cantidad de camiones disponibles y el número de palas operativas, además de rutas ineficientes. El análisis estadístico permitió establecer límites de control para los tiempos de ciclo, y con ello identificar desviaciones operativas. Se concluyó que una gestión dinámica de la flota, combinada con la mejora continua basada en datos reales, puede reducir significativamente los tiempos improductivos, aumentar el factor de utilización de equipos y generar una mejora directa en la productividad y reducción de costos operativos. El trabajo también incluye comparaciones de rendimiento entre Antamina y otras minas peruanas, como Cerro Verde, Las Bambas y Yanacocha, resaltando las buenas prácticas y oportunidades de mejora.

Ríos, D. (2014). Optimización del sistema de carguío-transporte para el incremento de producción minera Antamina S.A. Esta monografía analiza el sistema de carguío y transporte de mineral y desmonte en la mina Antamina S.A., con el objetivo de identificar oportunidades de mejora en la eficiencia operativa. El autor descompone el ciclo de acarreo completo en sus diferentes fases: carga, transporte, descarga y retorno, integrando variables como el Queue Time (tiempo que el camión espera para ser cargado) y el Hang Time (tiempo que la pala espera por un camión). A partir del análisis de datos operativos del sistema de despacho modular, se identificó que gran parte de las ineficiencias estaban ligadas a una planificación no óptima de la asignación de camiones a las palas, así como a la falta de sistemas de control de llegada sincronizada. Como parte del estudio, se propone la implementación de un sistema de autollegada y autotoma, apoyado en balizas y sensores, que permite reducir el tiempo improductivo en zonas de carguío. Asimismo, se destacan aspectos como la gestión del tráfico interno, condiciones de las vías, y tiempos de ciclo por zona y tipo de camión. El estudio concluye que con un rediseño estratégico del sistema de carguío y transporte, y mediante la reducción efectiva de los tiempos Hang y Queue, es posible lograr aumentos de producción sin requerir aumento de flota, con impactos positivos en el costo por tonelada transportada.

Capítulo II. Marcos teórico y conceptual

2.1 Marco Teórico

2.1.1 Indicadores operativos de mina

Los indicadores operativos son métricas cuantificables que se utilizan para monitorear y evaluar la eficiencia, efectividad y disponibilidad de los procesos, equipos y recursos en las operaciones mineras. Estos KPI (Key Performance Indicators) permiten medir el desempeño operativo y sirven como base para la toma de decisiones estratégicas y tácticas.

2.1.1.1 Capacidad técnica y operativa

2.1.1.1.1 Capacidad técnica. Se refiere al potencial máximo de producción de un sistema o equipo bajo condiciones ideales de operación. Representa el límite superior de rendimiento que puede alcanzarse si no existieran restricciones mecánicas, humanas ni logísticas. Esta capacidad se define por las especificaciones de diseño, como la potencia, el volumen, el tonelaje o el rendimiento nominal, y sirve como punto de referencia para la planificación operativa y la comparación de eficiencia. (Fuente: Lopez, 2021)

$$\text{CAPACIDAD}_T = \text{DM}_T * \text{UT}_T * \text{PRODUCTIVIDAD}_T \quad (1)$$

En operaciones mineras, esta capacidad es determinada por elementos como:

- La configuración y diseño de los equipos.
- La capacidad nominal de carguío y transporte.
- El dimensionamiento de infraestructura auxiliar (chancadoras, fajas, plantas).

2.1.1.1.2 Capacidad operativa. Corresponde al nivel de rendimiento real que se alcanza durante la ejecución diaria de las actividades mineras, considerando las condiciones propias del entorno operativo. Esta capacidad está influenciada por múltiples factores como la disponibilidad de equipos, las demoras operativas, las condiciones del terreno, la eficiencia en la asignación de recursos y la calidad de la gestión. (Fuente: Lopez, 2021)

$$\text{CAPACIDAD}_O = \text{DM}_O * \text{UT}_O * \text{PRODUCTIVIDAD}_O \quad (2)$$

Algunos elementos que condicionan la capacidad operativa son:

- Las interrupciones no planificadas y tiempos improductivos.
- La gestión de mantenimiento y logística de operación.
- Las condiciones climáticas, geotécnicas y humanas.

2.1.1.2 Capacidad real. Es el nivel de producción efectivamente alcanzado por un sistema, equipo o proceso durante un periodo determinado, considerando todas las condiciones reales de operación, tanto favorables como adversas. La capacidad real refleja el resultado operativo neto tras descontar todos los factores que afectan negativamente la producción: fallas mecánicas, demoras operacionales, disponibilidad limitada, errores de coordinación, y condiciones externas como el clima o el estado de las vías.

Este concepto es clave para contrastar lo que se planifica con lo que realmente se ejecuta en campo. A diferencia de la capacidad técnica, que representa el máximo teórico bajo condiciones ideales, o de la capacidad operativa, que considera ciertas restricciones del entorno, la capacidad real incorpora todas las desviaciones que ocurren en el desarrollo cotidiano de las actividades. (Fuente: Lopez, 2021)

$$CAPACIDAD_{\text{Carguio}} = DM_{SH} * UT_{SH} * PRODUCTIVIDAD_{SH} \quad (3)$$

$$CAPACIDAD_{\text{Acarreo}} = DM_{HT} * UT_{HT} * PRODUCTIVIDAD_{HT} \quad (4)$$

Factores que influyen en la capacidad real (López Jiménez, 2021):

- Tiempos improductivos acumulados (esperas, traslados, falta de coordinación).
- Paradas por mantenimiento programado y no programado.
- Problemas de disponibilidad de operadores o equipos.
- Retrasos en el abastecimiento de suministros.
- Condiciones geotécnicas o meteorológicas adversas.

Importancia de conocer la capacidad real. Conocer la capacidad real permite:

- Evaluar con precisión la brecha entre lo planificado y lo ejecutado.
- Detectar ineficiencias en tiempo real.
- Diseñar estrategias de mejora continua enfocadas en la gestión operativa.

- Optimizar recursos sin necesidad de aumentar la inversión en nueva maquinaria.

Además, es fundamental para estimar la productividad mensual, la eficiencia por turno y la consistencia del cumplimiento de metas operativas.

2.1.1.2.1 CAPACIDAD Carguío >> CAPACIDAD Acarreo

- Hang alto, faltan camiones a las palas
- Queue mínimo
- La Capacidad de Acarreo es el limitante
- Aplicar esfuerzos a incrementar el Acarreo

2.1.1.2.2 CAPACIDAD Carguío << CAPACIDAD Acarreo

- Hang mínimo
- Queue alto, presencia de colas en la palas
- La Capacidad de Carguío es el limitante
- Aplicar esfuerzos a incrementar el Carguío

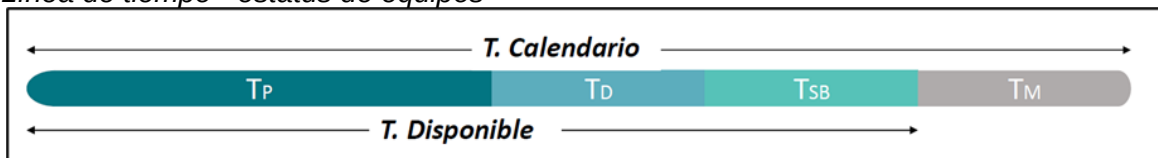
De lo anterior, se obtiene la siguiente relación

$$CAPACIDAD_R = PRODUCCION = \text{Minimo}\{CAPACIDAD_{\text{Carguío}}, CAPACIDAD_{\text{Acarreo}}\}$$

2.1.1.3 Estatus de equipos. Se refiere a la clasificación y codificación del estado operativo en el que se encuentra un equipo en un momento dado, con el fin de monitorear su disponibilidad, productividad y eficiencia en las operaciones mineras. Identificar correctamente el estatus de los equipos permite una gestión más precisa de las flotas y una toma de decisiones basada en información operativa confiable. Esta clasificación es esencial para sistemas de despacho, control en tiempo real y cálculo de indicadores como disponibilidad, utilización y rendimiento. (Fuente: Lopez, 2021)

Figura 1

Línea de tiempo - estatus de equipos



Fuente: Proyecto minero – Área de operaciones mina

Donde:

T_P = Tiempo de producción.

T_D = Tiempo de demoras.

T_{SB} = Tiempo en stand by.

T_M = Tiempo de mantenimiento.

2.1.1.3.1 Disponibilidad (DM). Es un indicador clave de desempeño que refleja la proporción del tiempo total en que un equipo está técnicamente habilitado para operar, es decir, sin estar detenido por mantenimiento correctivo o fallas no programadas. Este indicador permite evaluar la confiabilidad técnica de los equipos y su grado de preparación para cumplir con las demandas operativas.

Es una métrica fundamental en el control de flotas, ya que proporciona una visión clara del impacto del mantenimiento en la operación y en la continuidad de la producción.

(Fuente: Lopez, 2021)

$$DM = \frac{T.\text{disponible} - T.SB.}{T.\text{calendario} - T.SB.} = \frac{T.P. + T.D.}{T.C. - T.SB.} \quad (5)$$

Interpretación del indicador:

- Una disponibilidad mecánica alta (>90%) indica que los equipos presentan pocas fallas y que el sistema de mantenimiento es eficiente.
- Una disponibilidad baja sugiere frecuencia elevada de fallas, tiempos de reparación prolongados o deficiencias en el mantenimiento preventivo.

Importancia de la disponibilidad mecánica:

- Es un componente esencial para calcular la utilización operativa.
- Influye directamente en la productividad de la flota.
- Permite evaluar la efectividad del plan de mantenimiento.
- Ayuda a identificar tendencias de desgaste y fallas recurrentes.
- Es clave para la planificación del despacho de equipos.

2.1.1.3.2 Utilización (UT). Es un indicador operativo que mide la proporción del tiempo disponible en que un equipo realmente está realizando una actividad productiva.

Este indicador refleja qué tan eficientemente se está usando el tiempo en que el equipo está técnicamente habilitado para operar.

La utilización permite identificar pérdidas de tiempo relacionadas a esperas, falta de programación, ineficiencia en el despacho, y otros factores que no son atribuibles a fallas mecánicas pero que sí afectan la productividad total. (Fuente: Lopez, 2021)

$$UT = \frac{T.\text{produccion}}{T.\text{disponible}-T.SB.} = \frac{T.P.}{T.P.+T.SB.} \quad (6)$$

Interpretación del indicador:

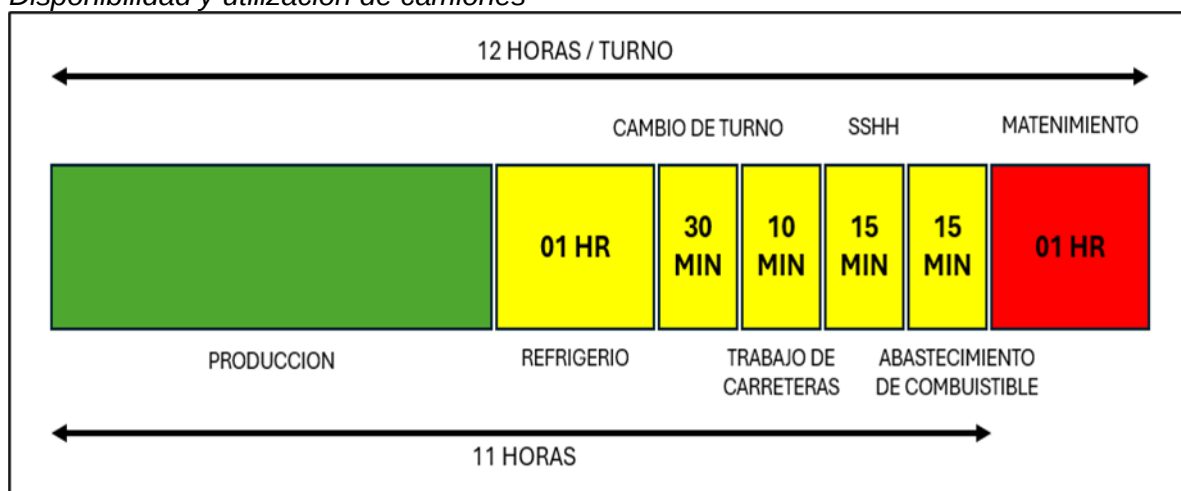
- Una utilización alta (>80%) indica una operación bien coordinada, con pocas demoras operativas.
- Una utilización baja sugiere ineficiencias en el despacho, esperas por falta de coordinación o equipos auxiliares, o desbalances en la flota.

Importancia de la utilización:

- Ayuda a diagnosticar cuellos de botella operacionales.
- Es fundamental para calcular la eficiencia operativa junto con la disponibilidad.
- Permite priorizar mejoras en la logística de despacho y coordinación.
- Es base para la toma de decisiones sobre dimensionamiento de flotas y programación.

Figura 2

Disponibilidad y utilización de camiones



Fuente: Proyecto minero – Área de operaciones mina

- Horas del turno = 12 h

- Mantenimiento (MTTO) = 1 h
- Refrigerio = 60 min (1 hora)
- Cambio de turno = 30 min (0.5 hora)
- Trabajo de carreteras = 10 min (0.17 hora)
- SSHH = 15 min (0.25 hora)
- Abastecimiento de combustible = 15 min (0.25 hora)

$$\text{Utilizacion. camiones} = \frac{11 - (1 + 0.5 + 0.17 + 0.25 + 0.25)}{11} = 80\%$$

2.1.1.4 Productividad. Expresada comúnmente en toneladas por hora (ton/hr), es uno de los indicadores más importantes en la operación minera. Representa la cantidad de material (mineral o desmonte) movido o procesado por unidad de tiempo efectivo de trabajo.

Este indicador permite evaluar el rendimiento real de los equipos y procesos, comparando lo que se logra producir respecto al tiempo verdaderamente utilizado en actividades productivas. Es fundamental para la gestión del desempeño, la optimización de recursos y la evaluación económica de las operaciones. (Fuente: Lopez, 2021)

$$\text{PRODUCTIVIDAD} \left(\frac{\text{ton}}{\text{hr}} \right) = \frac{\text{TON. producidas}}{\sum \text{T.ciclo}} \quad (7)$$

A mayor productividad, mayor producción: Siempre que el tiempo efectivo de trabajo se mantenga constante o también mejore, un incremento en la productividad implica un aumento directo en la producción total.

Porque la productividad mide el ritmo al que se mueve o procesa material. Por tanto, si se trabaja al mismo número de horas, pero con una mayor eficiencia (más toneladas por hora), el volumen total producido aumentará.

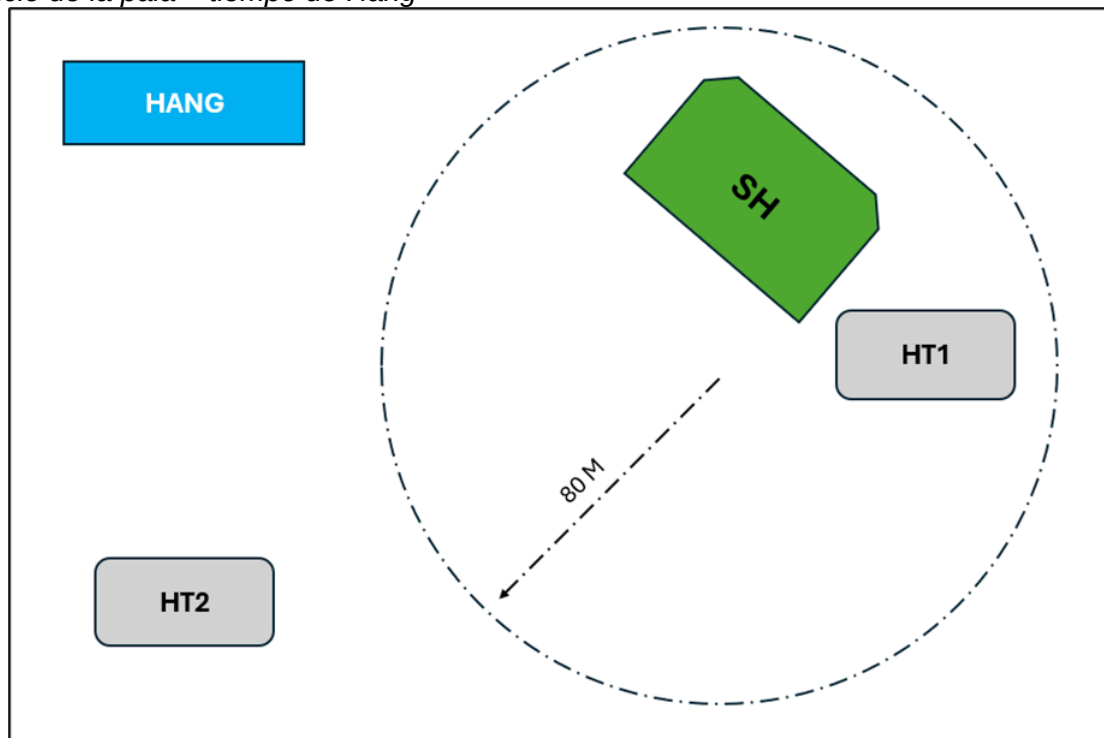
2.1.1.4.1 Productividad de carguío.

Tiempo de Hang:

Inicia cuando la pala despacha al último camión y se queda sin camiones, hasta que el siguiente camión llega y es detectado por la baliza.

Figura 3

Ciclo de la pala – tiempo de Hang



Fuente: Proyecto minero – Área de operaciones mina

- La pala le da salida al camión (1) una vez que esté totalmente cargado.
- No hay camiones en la pala, inicia el Tiempo de espera de la pala (HANG).
- La baliza detecta la llegada del camión (2) o el operador registra su llegada.
- Finaliza el tiempo de espera de la pala (HANG).

Determinación de Hang (tiempo de espera de la pala)

- Suma total de Tiempos del Hang: 25 min
- Cantidad de ciclos por hora : 18

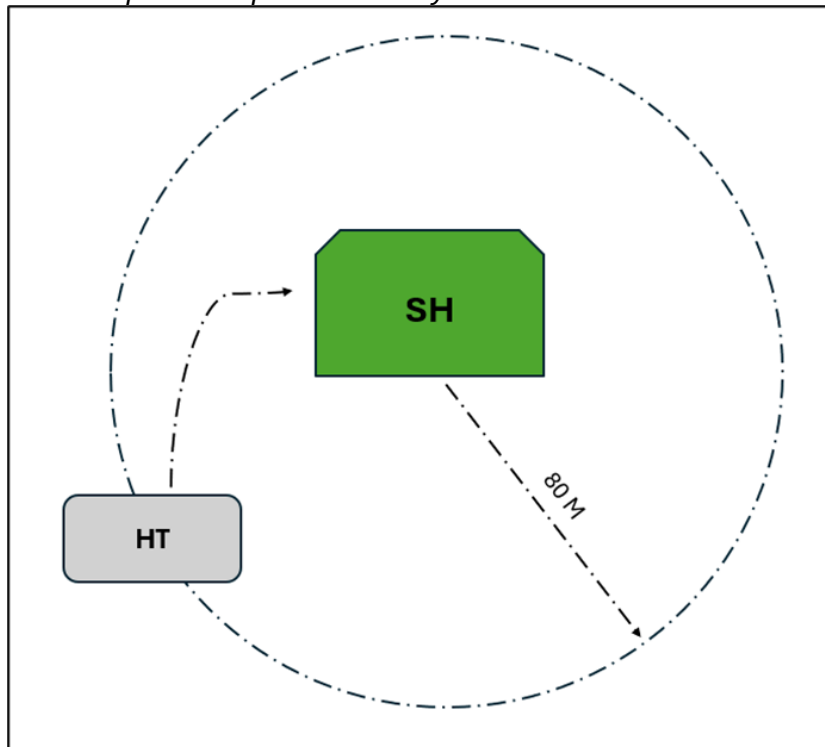
$$T. \text{ Hang} = \frac{25}{18} = 1.39 \text{ min/carga}$$

Tiempo de Spot Time:

Se presentan dos escenarios, cuando no hay cola en la pala y cuando hay cola en la pala.

Figura 4

Ciclo de la pala – tiempo de Stop Time: no hay cola

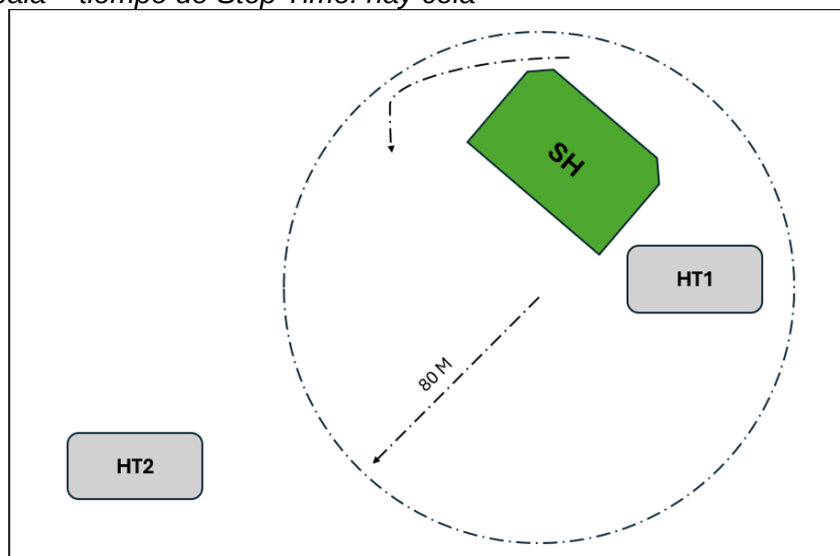


Fuente: Proyecto minero – Área de operaciones mina

- Baliza detecta llegada del camión o el operador registra su llegada.
- Inicia el Spot Time del camión.
- Fin Spot time al vaciar 1ra cucharada.
- Tiempo de Cola = 0.

Figura 5

Ciclo de la pala – tiempo de Stop Time: hay cola



Fuente: Proyecto minero – Área de operaciones mina

- Baliza detecta llegada de camión (2) o el operador registra su llegada, pero la Pala está cargando al camión (1)
- Inicia el tiempo de cola del camión (2)
- Pala da el último cucharón y despacha al camión (1)
- Inicia Spot Time camión (2)
- Fin Spot time después de la 1ra cucharada

Determinación de Spot Time (tiempo de cuadrado)

- Suma total de Tiempos del Spot Time: 18 min
- Cantidad de ciclos por hora : 15

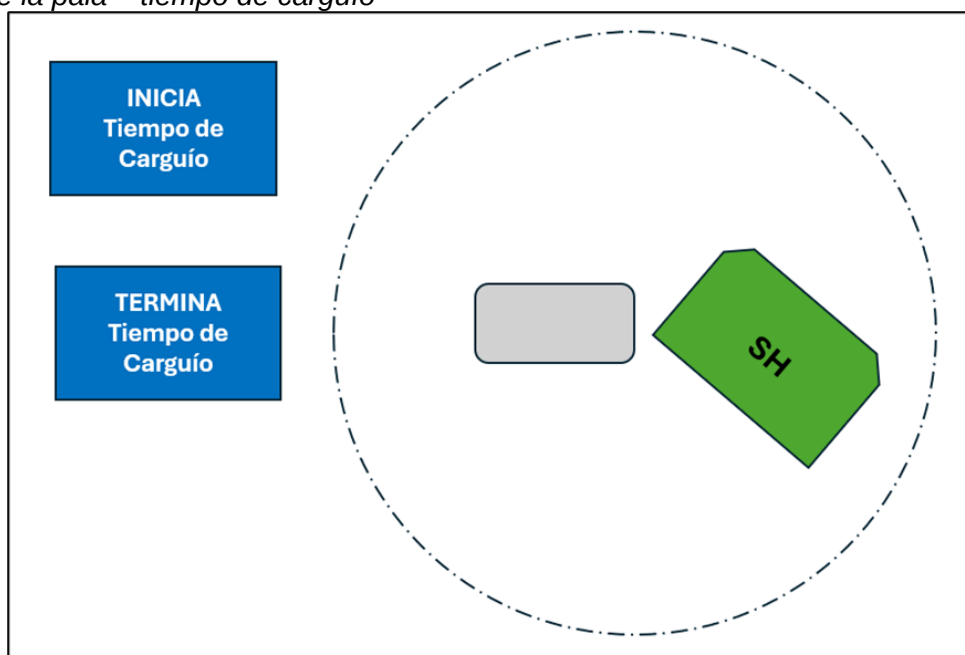
$$T.\text{Spot Time}=18/15=1.2 \text{ min/carga}$$

Tiempo de Carguío:

- Baliza detecta llegada del camión.
- Camión se cuadra al lado de la pala.
- Inicia Tiempo de Carguío desde que la pala suelta el 1er cucharón.
- Finaliza Tiempo de Carguío cuando la pala da salida al camión (cuando presiona el pedal).

Figura 6

Ciclo de la pala – tiempo de carguío



Fuente: Proyecto minero – Área de operaciones mina

Determinación del tiempo de carguío:

- Suma total de Tiempos del Carguío: 244min
- Cantidad de ciclos por turno: 185

$$T. \text{Carguio} = \frac{244}{185} = 1.32 \text{ min/carga}$$

De lo anterior mostrado, se obtiene la siguiente ecuación:

$$T. \text{ciclo} = T. \text{Hang} + T. \text{Spot Time} + T. \text{Carguio} \quad (8)$$

$$\text{PRODUCTIVIDAD} = \frac{\text{TON cargadas}}{T. \text{Hang} + T. \text{Spot Time} + T. \text{Carguio}} \quad (9)$$

$$\text{PRODUCTIVIDAD}_{\text{EFECTIVA}} = \frac{\text{TON cargadas}}{T. \text{Spot Time} + T. \text{Carguio}} \quad (10)$$

La productividad efectiva es la que se alcanzaría si no hubiera falta de camiones.

DigRate:

Es un indicador que mide la productividad de las palas en condiciones ideales de carguío continuo.

Para el cálculo del DigRate únicamente se considera el tiempo de carguío, por tanto, este indicador no se ve afectado por el tiempo de cuadrado ni el tiempo de Hang.

$$\text{DIGRATE} = \frac{\text{TON cargadas}}{T. \text{Carguio}} \quad (11)$$

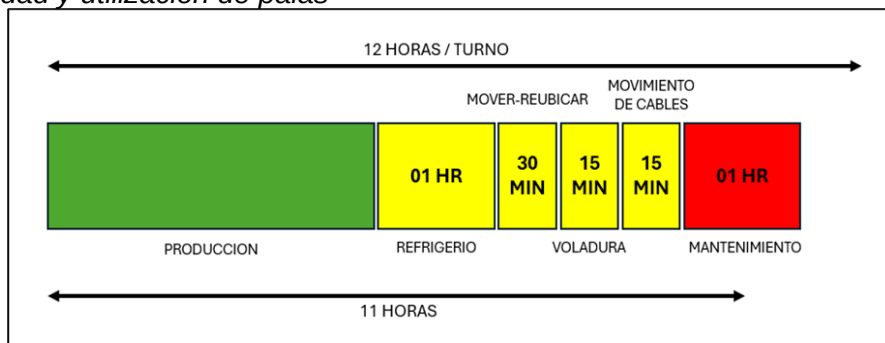
Determinación del DigRate

- Total de Toneladas Producidas: 55,000 ton
- Suma Total de Tiempos de Carguío: 4.0hr

$$\text{DigRate} = 55,000 / 4.0 = 13,750 \text{ ton/hr}$$

Figura 7

Disponibilidad y utilización de palas



Fuente: Proyecto minero – Área de operaciones mina

- Horas del turno = 12 h
- Mantenimiento (MTTO) = 1 h
- Tonelaje = 50,000 toneladas
- Refrigerio = 60 min (1 hora)
- Mover – reubicar = 30 min (0.5 hora)
- Mov. De cable = 15 min (0.25 hora)
- Voladura = 15 min (0.25 hora)

$$\text{PRODUCTIVIDAD}_{\text{SH}} = \frac{50,000}{11 - 1 - 0.5 - 0.25 - 0.25} = 5,555 \frac{\text{toneladas}}{\text{hora}}$$

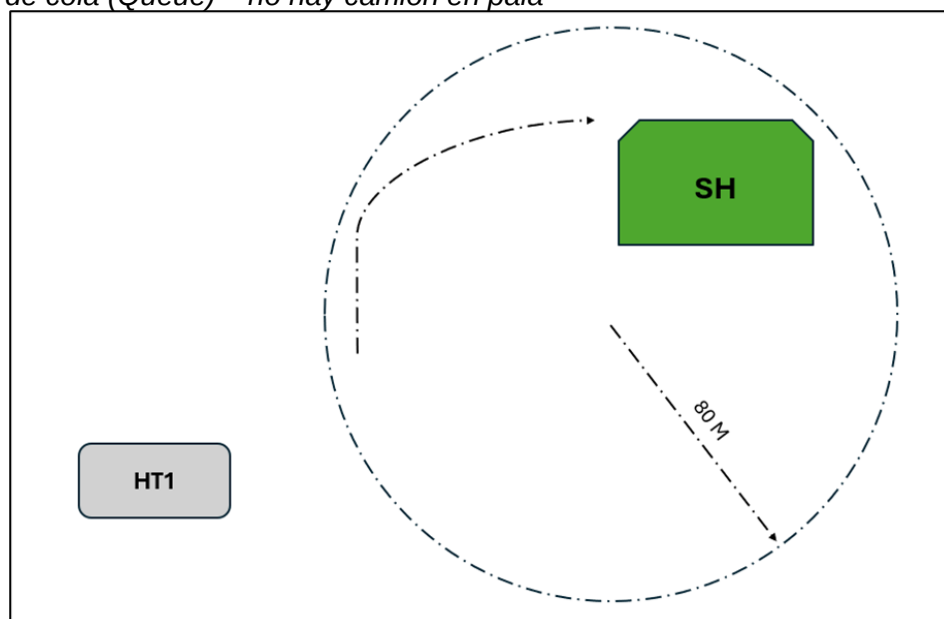
2.1.1.4.2 Productividad de acarreo. Se refiere a la cantidad de material (toneladas) que un camión minero es capaz de transportar por unidad de tiempo (normalmente en ton/hr), considerando su desempeño efectivo durante la jornada. Este indicador permite medir el rendimiento operativo real de cada unidad de transporte y, en conjunto, de toda la flota. (Fuente: Lopez, 2021)

Tiempo de cola (Queue):

Se presentan dos escenarios, cuando no hay camión en pala y cuando hay camiones en la baliza.

Figura 8

Tiempo de cola (Queue) – no hay camión en pala

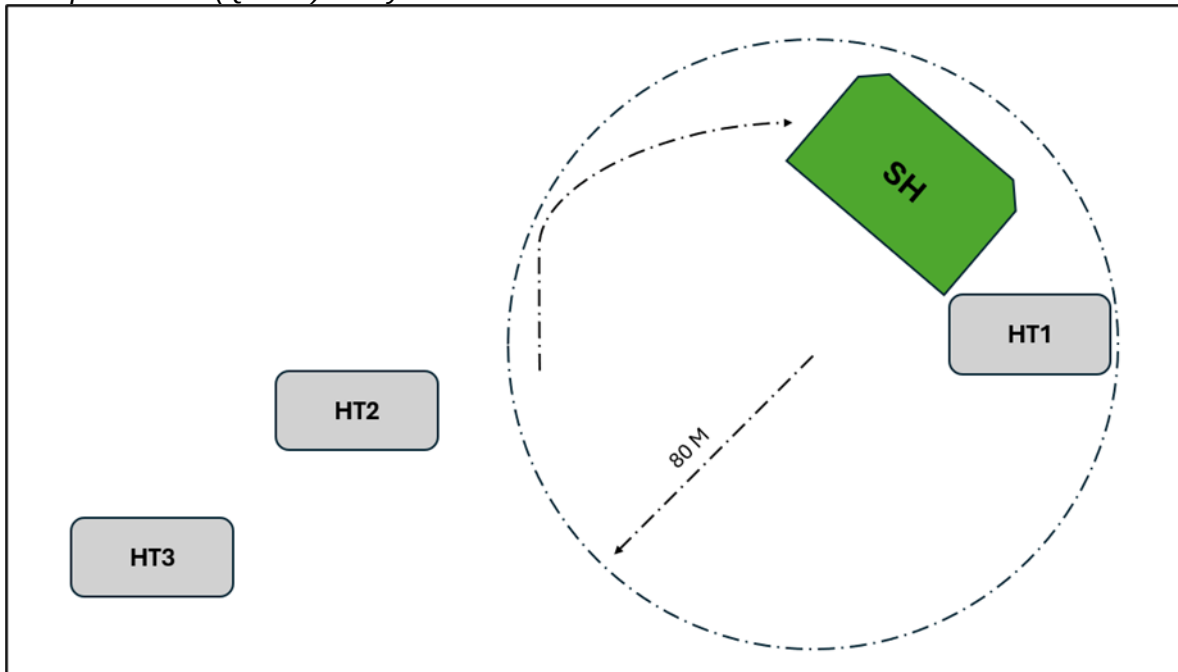


Fuente: Proyecto minero – Área de operaciones mina

- Baliza detecta llegada de camión o el operador registra su llegada
- Tiempo de Cola = 0

Figura 9

Tiempo de cola (Queue) – hay camiones en baliza



Fuente: Proyecto minero – Área de operaciones mina

- Baliza detecta llegada de camión (HT2) o el operador registra su llegada, pero la pala está cargando a (HT1).
- Inicia el tiempo de cola del camión (HT2) hasta que la pala haya dado el último cucharón al camión (HT1).

Determinación del Queue (tiempo de cola):

- Suma total de Tiempos de Queue: 50 min
- Cantidad de ciclos : 20

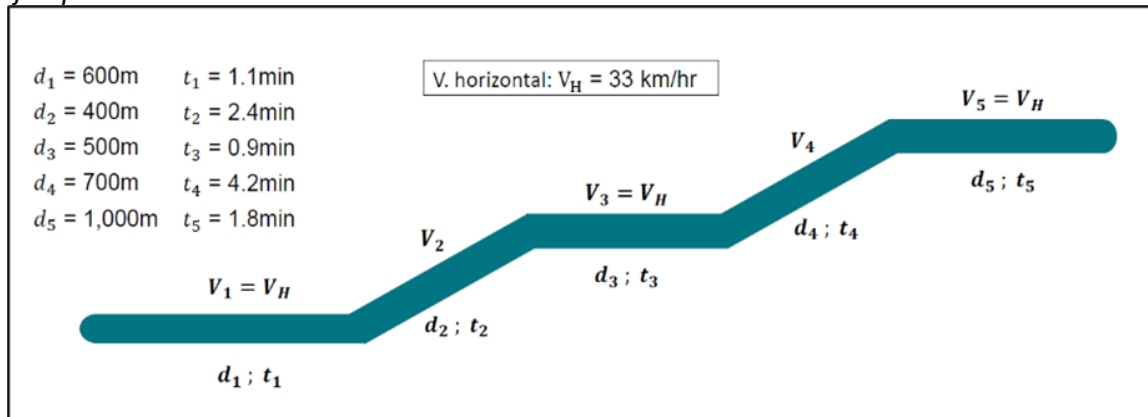
$$T. \text{ Queue} = \frac{50}{20} = 2.5 \text{ min/carga}$$

Distancia Horizontal Equivalente (EFH):

Es una distancia ficticia que convierte los efectos de una pendiente positiva o negativa del terreno en una distancia horizontal equivalente, que permite comparar de forma uniforme el esfuerzo de acarreo de los camiones en diferentes rutas. (Fuente: Lopez, 2021)

Figura 10

Ejemplo de cálculo de EFH



Fuente: Proyecto minero – Área de operaciones mina

$$EFH_{\text{ACARREO}} = EFH1 + EFH2 + EFH3 + EFH4 + EFH5 \quad (12)$$

$$EFH_{\text{ACARREO}} = d1 + V_H * t2 + d3 + V_H * t4 + d5 \quad (13)$$

$$\text{Distancia} = 600\text{m} + 400\text{m} + 500\text{m} + 700\text{m} + 1,000\text{m} = 3,200\text{m}$$

$$EFH = 600\text{m} + 1,320\text{m} + 500\text{m} + 2,310\text{m} + 1,000\text{m} = 5,730\text{m}$$

$$\text{FACTOR}_{EFH} = \frac{EFH}{\text{Distancia}} = 1.8$$

Velocidad de acarreo:

Es la velocidad promedio a la que un camión minero se desplaza durante el ciclo de transporte del material, ya sea en trayecto de subida (cargado) o bajada (vacío). Este parámetro es clave para estimar los tiempos de ciclo y, por ende, la productividad de acarreo. (Fuente: Lopez, 2021)

Figura 11

Calculo de velocidad de acarreo



Fuente: Proyecto minero – Área de operaciones mina

- Baliza 1 detecta llegada del camión y se guarda el Tiempo Inicial.
- Baliza 2 detecta llegada del camión y se guarda el Tiempo Final.

Determinación de velocidad de acarreo.

- Distancia de acarreo Plano Cargado: 1.5 km
- Tiempo de acarreo: 2.7 min = 0.045 h

$$\text{Velocidad} = \frac{1.5}{0.045} = 33.3 \text{ km/h}$$

Con los parámetros descritos anteriormente, se tiene la siguiente ecuación para determinar la productividad de acarreo.

$$T. \text{ ciclo} = T. \text{ Vacio} + T. \text{ Queue} + T. \text{ Spot} + T. \text{ Carguio} + T. \text{ Acarreo} + T. \text{ Descarga}$$

$$\text{PRODUCTIVIDAD}_{\text{ACARREO}} = \frac{\text{TON descargadas}}{\text{T.Produccion}} = \frac{\text{F.C.}}{\text{T.ciclo}} \quad (14)$$

- Conviene que el F.C. aumente y el T. Ciclo disminuya.
- El T. Ciclo depende del EFH y la Velocidad.

2.1.2 Modelamiento por regresión lineal

La regresión lineal es una técnica estadística utilizada para estimar la relación entre una variable dependiente Y y una o más variables independientes X, mediante el ajuste de una función lineal. Esta técnica busca explicar y predecir el comportamiento de la variable de interés a partir de los cambios en las variables explicativas.

2.1.2.1 Regresión lineal simple. La regresión lineal simple es un modelo estadístico que estudia la relación entre una única variable independiente X y una variable dependiente Y. Asume que dicha relación puede ser descrita mediante una línea recta. (Fuente: Montgomery et al, 2012)

Ecuación general del modelo:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \epsilon_i \quad (15)$$

Donde:

- Y_i = Valor observado de la variable dependiente en el punto i.
- X_i = Valor observado de la variable independiente en el punto i.
- β_0 = Intercepto o valor de Y cuando $X = 0$.

- β_1 = Pendiente o coeficiente de regresión, que indica el cambio esperado en Y por unidad de cambio en X.
- ϵ_i = Error aleatorio asociado a la observación i , que representa la diferencia entre el valor observado y el estimado por el modelo.

Interpretación de los parámetros:

- β_0 (intercepto): valor de Y cuando $X=0$. Puede o no tener sentido práctico dependiendo del contexto.
- β_1 (pendiente): indica la magnitud y dirección del efecto de X sobre Y.
 - Si $\beta_1 > 0$: relación directa (ambas variables crecen juntas).
 - Si $\beta_1 < 0$: relación inversa.
 - Si $\beta_1 = 0$: no hay relación lineal.

Estimación por Mínimos Cuadrados (OLS).

Se busca minimizar la suma de los cuadrados de las diferencias entre los valores observados y los estimados:

$$S(\beta_0, \beta_1) = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n (Y_i - \beta_0 - \beta_1 X_i)^2$$

Las fórmulas para los estimadores son:

$$\hat{\beta}_1 = \frac{\sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum (X_i - \bar{X})^2}, \quad \hat{\beta}_0 = \bar{Y} - \hat{\beta}_1 \bar{X}$$

El modelo ajustado es:

$$\hat{Y}_i = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 X_i$$

Evaluación del modelo.

- Coeficiente de determinación R^2

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST}$$

- R^2 indica qué porcentaje de la variabilidad de Y es explicada por X.
- Va de 0 a 1: valores cercanos a 1 implican buen ajuste.

- Prueba de significancia

Se realiza una prueba t para verificar si β_1 es estadísticamente diferente de 0:

$$t = \frac{\hat{\beta}_1}{SE(\hat{\beta}_1)}$$

Si el valor-p asociado es menor que 0.05, se concluye que la pendiente es significativa.

2.1.2.2 Regresión lineal múltiple. La regresión lineal múltiple es una extensión de la regresión lineal simple que permite modelar la relación entre una variable dependiente Y y dos o más variables independientes $X_1, X_2, \dots, X_p$. Su propósito es:

- Estimar el efecto conjunto de varios factores sobre una variable.
- Predecir el valor de la variable dependiente a partir de un conjunto de predictores.
- Explicar la variabilidad de los datos multivariantes.

(Fuente: Gujarati y Porter, 2009)

Formulación matemática.

El modelo general para n observaciones y p predictores es:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \dots + \beta_p X_{pi} + \varepsilon_i \quad (16)$$

Donde:

- Y_i = Valor de la variable dependiente para la observación i
- X_{ji} = Valor de la variable independiente j en la observación i
- β_0 = Intercepto del modelo
- β_j = Coeficiente de regresión para la variable X_j
- ε_i = Término de error aleatorio

También puede escribirse en forma matricial:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\varepsilon}$$

Donde:

- $\mathbf{Y}$ = Vector $n \times 1$ de respuestas
- $\mathbf{X}$ = Matriz $n \times (p+1)$ de variables (con una columna de 1s para el intercepto)
- $\mathbf{B}$ = Vector $(p+1) \times 1$ de coeficientes

- E = Vector de errores

Interpretación de los coeficientes.

- β_0 = Valor esperado de Y cuando todas las $X_j=0$.
- B_j = Cambio promedio en Y por cada unidad de incremento en X_j , manteniendo constantes las demás variables.

Esto permite aislar el efecto individual de cada predictor.

Estimación de parámetros (OLS).

Se estima el vector β usando el método de mínimos cuadrados:

$$\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T Y$$

La función objetivo es:

$$\min_{\beta_0, \dots, \beta_p} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2$$

Con:

$$\hat{Y}_i = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 X_{1i} + \dots + \hat{\beta}_p X_{pi}$$

Evaluación del modelo.

Coeficiente de determinación R^2 y ajustado R^2_{adj}

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST}, \quad R^2_{adj} = 1 - \left(\frac{SSE/(n-p-1)}{SST/(n-1)} \right)$$

- R^2 = Porcentaje de la variabilidad de Y explicada por el modelo.
- R^2_{adj} = Penaliza el número de predictores para evitar sobreajuste.

Pruebas t individuales

Para verificar si cada $\beta_j \neq 0$.

Prueba F global

$$F = \frac{MSR}{MSE} = \frac{(SSR/p)}{(SSE/(n-p-1))}$$

Evalúa si al menos un predictor tiene efecto significativo sobre Y .

Análisis de residuos

- Gráficos de dispersión (residuos vs. valores ajustados)

- Normalidad (QQ-plot o test de Shapiro-Wilk)
- Multicolinealidad (VIF)

2.2 Marco conceptual

2.2.1 Capacidad

Corresponde al volumen o tonelaje máximo que un equipo puede manejar en condiciones estándar. En equipos de acarreo, está asociado al volumen de la tolva; en palas, al tamaño de la cuchara.

2.2.2 Tonelaje

Cantidad de material, expresada en toneladas, que es cargada, transportada o procesada por los equipos. Es una medida directa de rendimiento operativo.

2.2.3 Tiempo

Variable fundamental en minería, representa la duración de actividades específicas como carguío, acarreo, espera, retorno, entre otras. Es clave en la evaluación de ciclos operativos.

2.2.4 Eficiencia

Indica el grado de aprovechamiento real de los recursos disponibles respecto a su capacidad potencial. Se evalúa tanto a nivel de equipos como de sistemas completos.

2.2.5 Factor

Proporción o coeficiente que refleja el impacto de una variable sobre otra. Ejemplo: match factor, factor de carguío, factor de distancia, entre otros.

2.2.6 Match

Relación entre la cantidad de camiones y el número de equipos de carguío disponibles. Un match adecuado asegura continuidad y minimiza los tiempos inactivos.

2.2.7 Estatus

Condición operacional de un equipo en un instante dado. Puede clasificarse como operativo, inoperativo, en espera, en reparación, o fuera de servicio.

2.2.8 DigRate

Porcentaje de material útil extraído respecto al material total movido. Es un indicador de selectividad y eficiencia en el proceso de extracción.

2.2.9 Simulación

Herramienta computacional que permite replicar y analizar el comportamiento de un sistema minero bajo diferentes escenarios operativos, sin afectar el proceso real.

2.2.10 Modelo

Representación matemática, lógica o estadística de un proceso, que busca explicar, predecir u optimizar el comportamiento de variables bajo estudio.

2.2.11 Variable

Cualquier característica medible que puede tomar diferentes valores. En esta investigación, se estudian variables operativas como tiempos, distancias, tonelaje, entre otros.

Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación

3.1 Recolección de datos

3.1.1 Unidad de estudio

3.1.1.1 Ubicación y accesibilidad. El proyecto minero donde se realizó el estudio está situado en el distrito de San Marcos, provincia de Huarney, región Áncash, al norte del Perú, se localiza a unos 4,300 m s.n.m. Es una de las operaciones mineras más importantes del país por su producción de cobre, zinc, plata y molibdeno. El acceso principal a la mina es por vía terrestre, a través de la Carretera Panamericana Norte, desde la ciudad de Chimbote hacia Huarney, recorriendo luego un tramo adicional hasta el yacimiento, que está ubicado a unos 80 km al este de Chimbote y a 20 km de Huarney.

Figura 12

Ubicación del proyecto minero



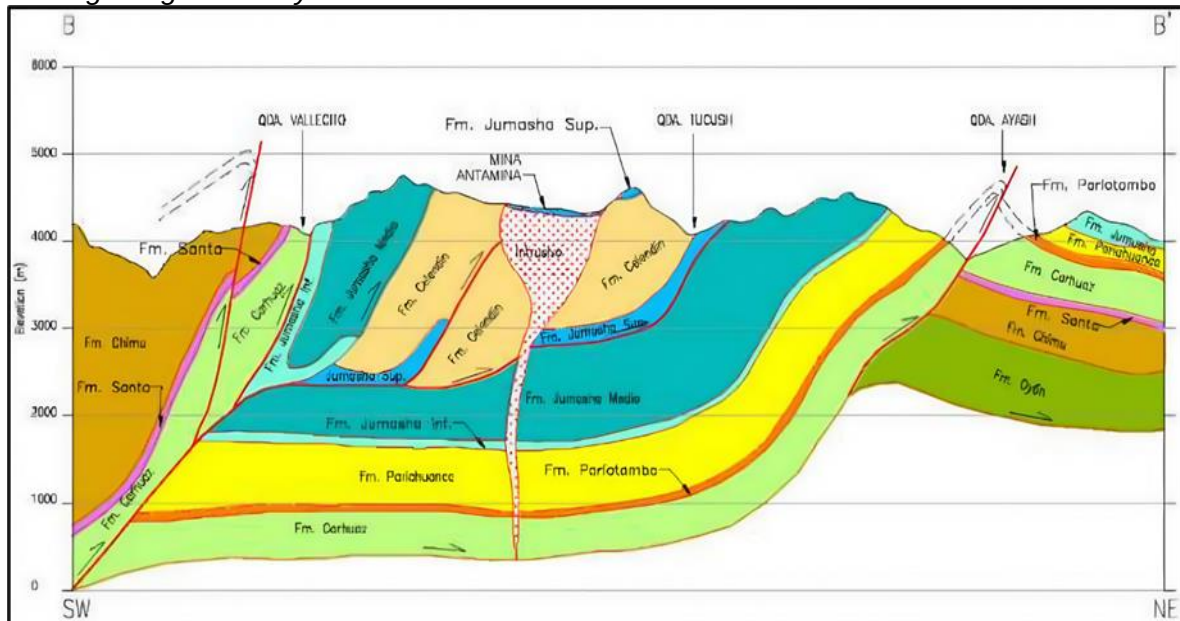
Fuente: Proyecto minero

3.1.1.2 Geología del proyecto minero

3.1.1.2.1 Geología regional. El depósito mineralógico se ubica en la cordillera occidental de los Andes del Perú, dentro de un contexto geológico que abarca desde el Jurásico Medio (Formación Oyotún) hasta el Cretácico Superior (Formación Celendín). Esta región es reconocida por su potencial metalogenético, siendo parte del cinturón de yacimientos polimetálicos del norte peruano.

Figura 13

Geología regional del yacimiento

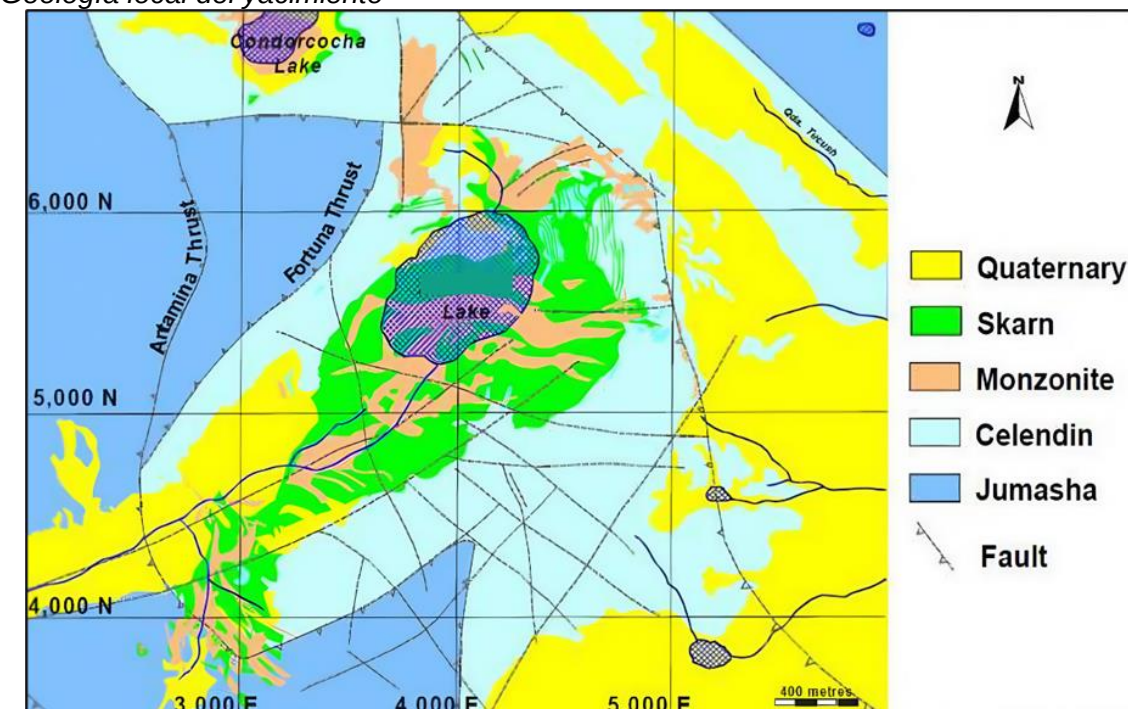


Fuente: Proyecto minero

3.1.1.2.2 Geología local. Localmente, el yacimiento se ha desarrollado en rocas carbonatadas de las Formaciones Jumasha y Celendín, las cuales han sido intruidas por un pórfido cuarzomonzonítico, generando un sistema de skarn bien definido. El área está estructuralmente controlada por fallas normales orientadas en dirección noreste, perpendiculares al eje andino, y por fallas de sobreescorrimento subparalelas al sistema andino, acompañadas por pliegues con rumbo noroeste, lo que ha influido en la geometría del depósito.

Figura 14

Geología local del yacimiento



Fuente: Proyecto minero

3.1.1.2.3 Tipo de yacimiento. El proyecto minero corresponde a un yacimiento tipo skarn, generado durante el Mioceno medio (deformación Quechua II), a raíz del contacto entre intrusivos pórfidos y rocas calizas. El núcleo del depósito está compuesto por un pórfido cuarzomonzonítico, generando un endoskarn rico en cobre (Cu) y un exoskarn con predominancia de zinc (Zn), plata (Ag) y en menor grado cobre, en zonas más alejadas del contacto. Su formación estuvo condicionada por la reactivación de antiguas estructuras regionales asociadas al cinturón del Maraón.

3.1.1.2.4 Zonación y alteración. El skarn del proyecto minero muestra una zonación concéntrica desde el núcleo intrusivo hacia la roca caja, con predominancia de granates marrones y rosados en el endoskarn, y granates verdes a marrones, acompañados de diópsido, wollastonita, hornfels, mármol y calizas no alteradas, en el exoskarn. Las brechas heterolíticas, compuestas por fragmentos de distintas litologías skarn, se ubican frecuentemente en el contacto entre el intrusivo y el endoskarn.

Asimismo, el depósito exhibe una alteración retrógrada significativa, especialmente en el endoskarn, caracterizada por el desarrollo de minerales como clorita, epidota,

como el reemplazo del cargador frontal modelo 994, una vez que alcance su obsolescencia.

En cuanto al acarreo, la flota principal está conformada por camiones Komatsu 930, con un total de 92 unidades en operación. Inicialmente, se utilizaban camiones Caterpillar 793, pero fueron reemplazados por modelos de mayor capacidad tras completar su vida útil. Más recientemente, se han probado y agregado dos camiones Komatsu 980, y se contempla ampliar la flota de acarreo debido al incremento en la distancia de transporte de desmonte.

Tabla 2

Equipos principales de la operación

TIPO	MODELO	CAPACIDAD NOMINAL	UNIDADES
Perforadora	Bucyrus 49HR/RIII	351 mm	13
Perforadora	DMM2/D75KF	211 mm	2
Perforadora	ROC/T600	127 mm	7
Pala eléctrica	P&H 4100 XPC	56 m3	7
Pala hidráulica	HITACHI EX5600	29 m3	4
Cargador frontal	CAT 994	18 m3	2
Camión	CAT 793	226 t	25
Camión	Komatsu 930E	290 t	92
Camión	Komatsu 980E	370 t	2

Fuente: Elaboración propia

3.1.2 KPIs de equipos de carguío (palas)

La información utilizada para el modelamiento de variables operativas proviene del sistema Dispatch, el cual registra de forma continua los datos de operación minera. El periodo de análisis abarca desde enero hasta diciembre del año 2019, y se centra en indicadores clave relacionados con el desempeño de los equipos.

3.1.2.1 KPIs de palas P&H

Tabla 3

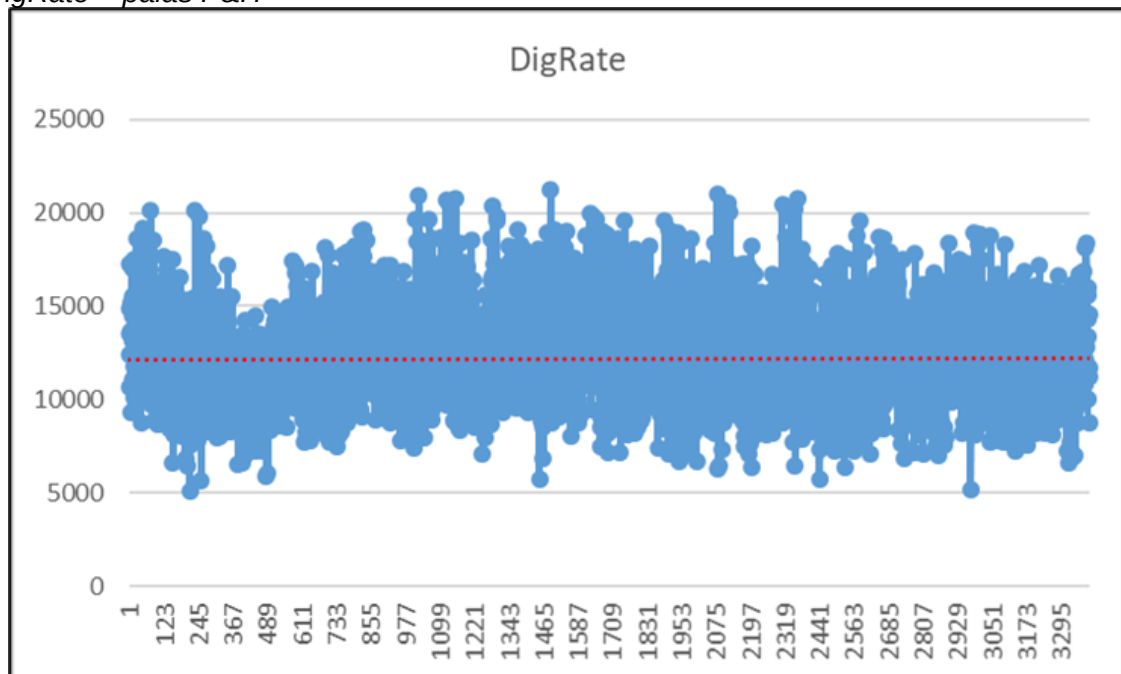
KPIs de palas P&H

INDICADOR	PROMEDIO	MÍNIMO	MÁXIMO	MEDIANA	DESVIACIÓN ESTÁNDAR
Disponibilidad mecánica	0.93	0.05	1.00	1.00	0.15
Utilización	0.79	0.16	1.00	0.81	0.09
DigRate	12,198.69	5,111.07	21,196.62	11,833.56	2,571.67
Productividad efectiva	6,530.93	3,104.52	10,411.08	6,451.09	1,082.15
Productividad	4,746.25	1,054.22	7,882.79	4,812.73	1,022.85
t. Hang	1.10	0.02	13.48	0.88	0.92
Hang	0.25	0.01	0.86	0.23	0.11
t. Queue	3.26	0.07	11.43	3.00	1.51
Queue	0.07	0.00	0.25	0.07	0.03
Factor carga	308.46	239.52	351.21	308.60	9.36
Cantidad de palas	7				
Nº de datos	3,397				

Fuente: Elaboración propia

Figura 16

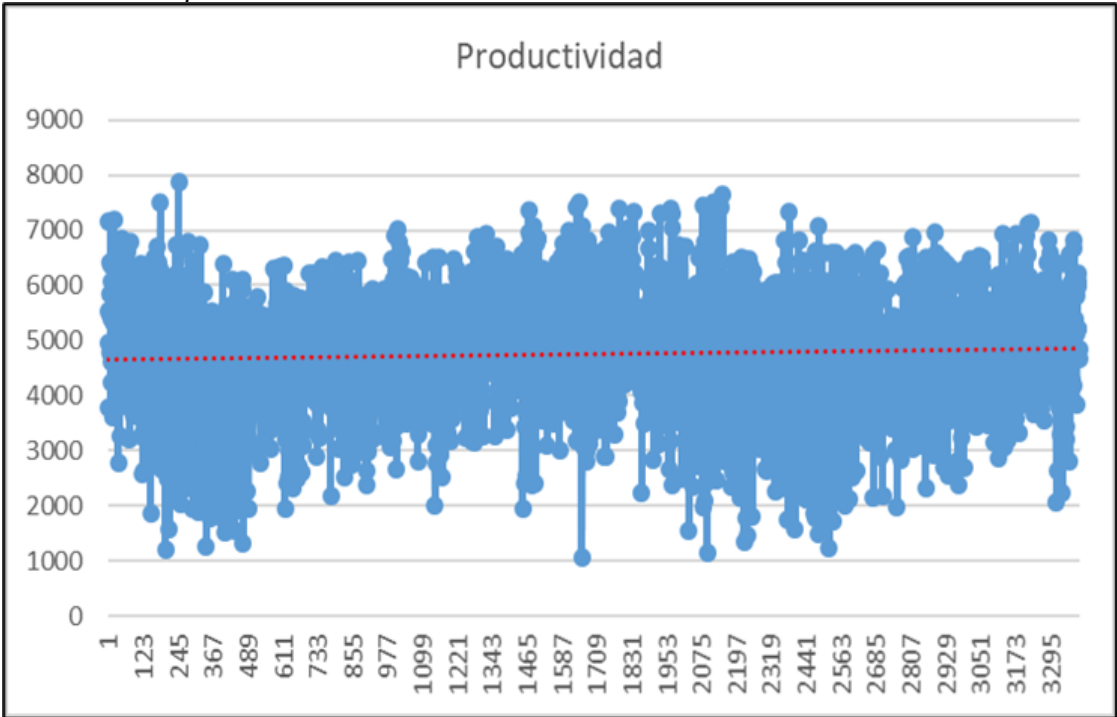
DigRate – palas P&H



Fuente: Elaboración propia

Figura 17

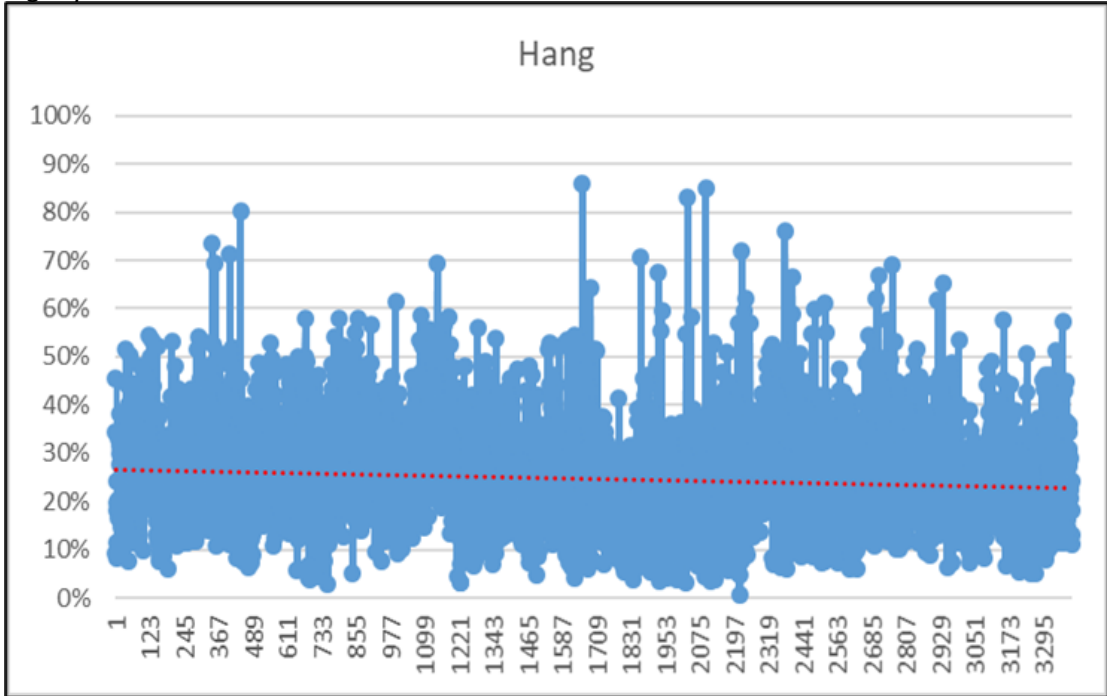
Productividad – palas P&H



Fuente: Elaboración propia

Figura 18

Hang – palas P&H



Fuente: Elaboración propia

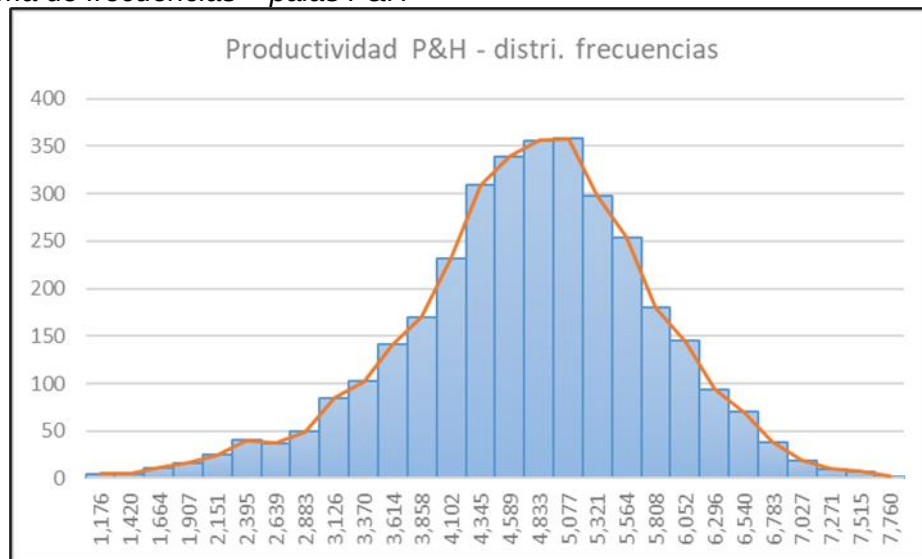
Tabla 4*Distribución de frecuencia de productividad de palas P&H*

Nº DE CLASE (N)	CLASE INFERIOR	CLASE SUPERIOR	MARCA DE CLASE	FRECUENCIA (FI)
1	1054.22	1298.01	1,176	5
2	1298.01	1541.80	1,420	5
3	1541.80	1785.59	1,664	11
4	1785.59	2029.38	1,907	16
5	2029.38	2273.17	2,151	25
6	2273.17	2516.96	2,395	40
7	2516.96	2760.75	2,639	37
8	2760.75	3004.54	2,883	49
9	3004.54	3248.33	3,126	85
10	3248.33	3492.12	3,370	102
11	3492.12	3735.91	3,614	141
12	3735.91	3979.71	3,858	170
13	3979.71	4223.50	4,102	232
14	4223.50	4467.29	4,345	309
15	4467.29	4711.08	4,589	339
16	4711.08	4954.87	4,833	356
17	4954.87	5198.66	5,077	358
18	5198.66	5442.45	5,321	298
19	5442.45	5686.24	5,564	254
20	5686.24	5930.03	5,808	180
21	5930.03	6173.82	6,052	145
22	6173.82	6417.61	6,296	94
23	6417.61	6661.40	6,540	70
24	6661.40	6905.19	6,783	38
25	6905.19	7148.98	7,027	19
26	7148.98	7392.77	7,271	10
27	7392.77	7636.56	7,515	7
28	7636.56	7882.79	7,760	2

Fuente: Elaboración propia

Figura 19

Histograma de frecuencias – palas P&H



Fuente: Elaboración propia

3.1.2.2 KPIs de palas HITACHI

Tabla 5

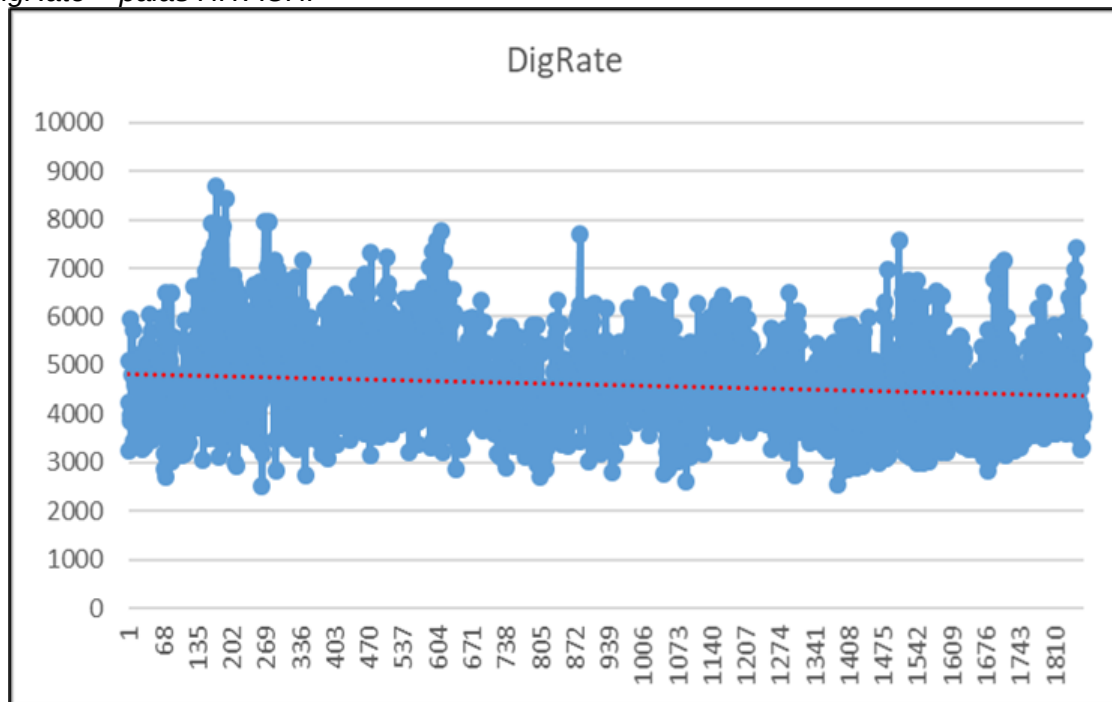
KPIs de palas HITACHI

INDICADOR	PROMEDIO	MÍNIMO	MÁXIMO	MEDIANA	DESVIACIÓN ESTÁNDAR
Disponibilidad mecánica	0.91	0.10	1.00	1.00	0.16
Utilización	0.73	0.15	1.00	0.76	0.14
DigRate	4,601.78	2,523.88	8,687.71	4,453.21	972.48
Productividad efectiva	3,247.20	1,697.45	5,280.59	3,152.86	617.21
Productividad	2,042.28	660.47	3,770.84	2,005.62	587.33
t. Hang	3.29	0.12	19.60	2.58	2.42
Hang	0.32	0.01	0.80	0.30	0.14
t. Queue	2.92	0.04	16.71	2.60	1.82
Queue	0.07	0.00	0.24	0.06	0.04
Factor carga	298.29	213.69	335.60	303.57	20.65
Cantidad de palas	4				
Nº de datos	1,868				

Fuente: Elaboración propia

Figura 20

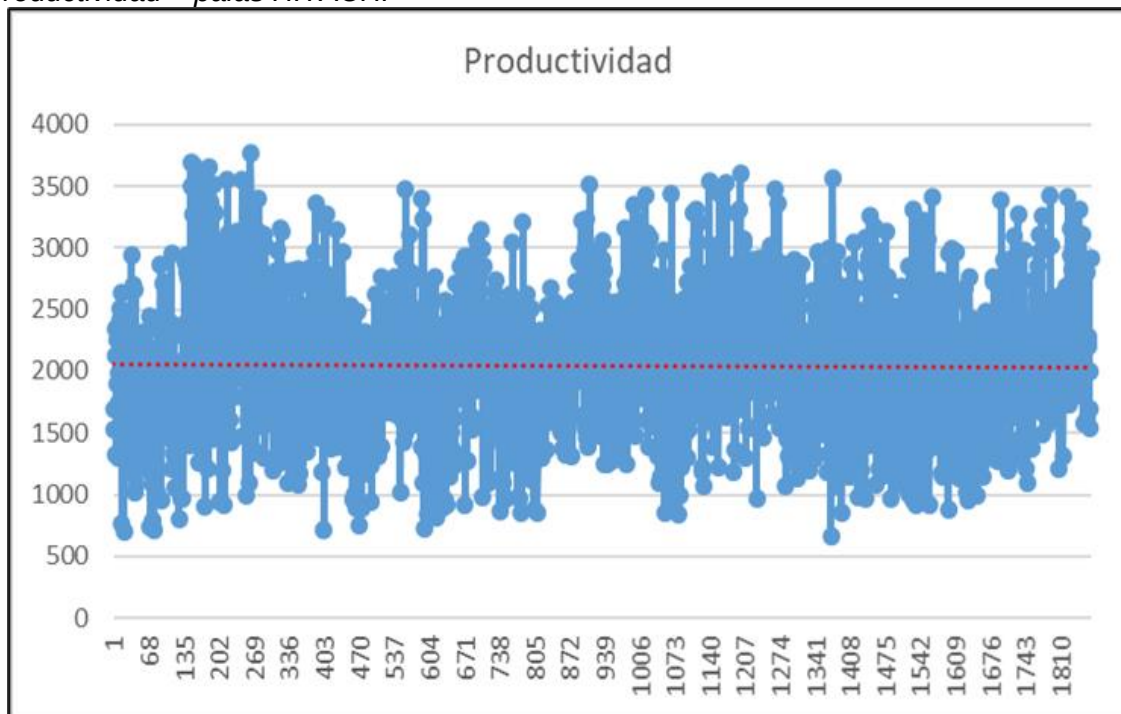
DigRate – palas HITACHI



Fuente: Elaboración propia

Figura 21

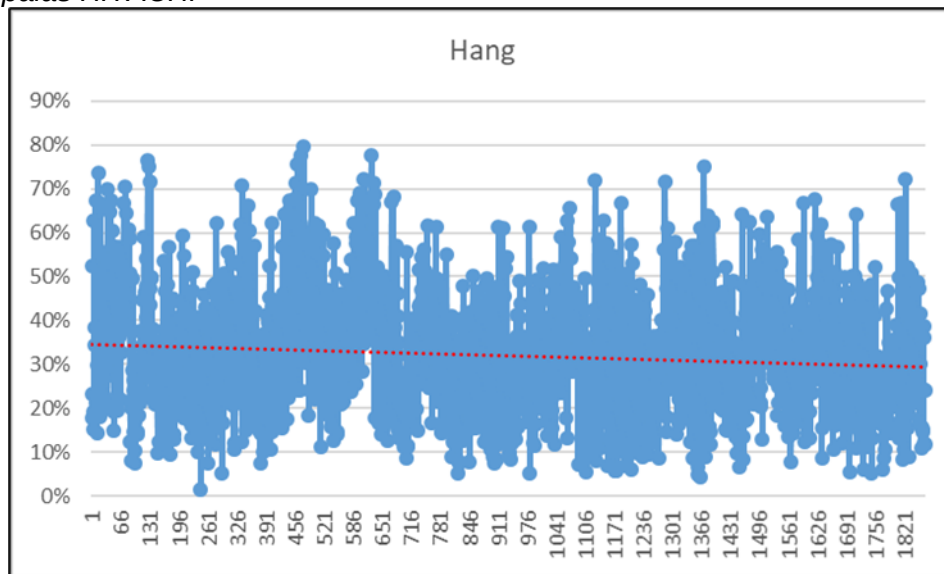
Productividad – palas HITACHI



Fuente: Elaboración propia

Figura 22

Hang – palas HITACHI



Fuente: Elaboración propia

Tabla 6

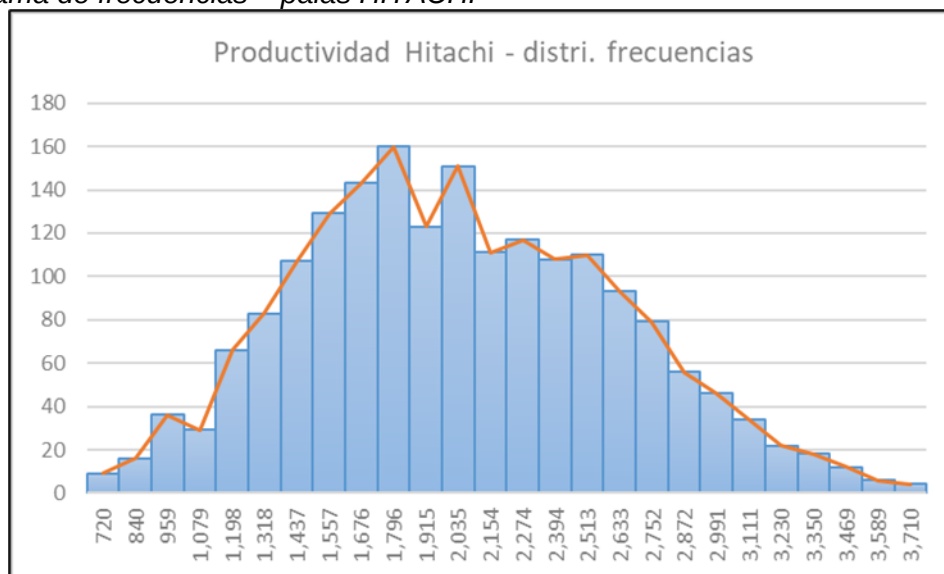
Distribución de frecuencia de productividad de palas HITACHI

Nº DE CLASE (N)	CLASE INFERIOR	CLASE SUPERIOR	MARCA DE CLASE	FRECUENCIA (FI)
1	660.47	779.99	720	9
2	779.99	899.51	840	16
3	899.51	1019.03	959	36
4	1019.03	1138.56	1,079	29
5	1138.56	1258.08	1,198	66
6	1258.08	1377.60	1,318	83
7	1377.60	1497.12	1,437	107
8	1497.12	1616.65	1,557	129
9	1616.65	1736.17	1,676	143
10	1736.17	1855.69	1,796	160
11	1855.69	1975.21	1,915	123
12	1975.21	2094.73	2,035	151
13	2094.73	2214.26	2,154	111
14	2214.26	2333.78	2,274	117
15	2333.78	2453.30	2,394	108
16	2453.30	2572.82	2,513	110
17	2572.82	2692.35	2,633	93
18	2692.35	2811.87	2,752	79
19	2811.87	2931.39	2,872	56
20	2931.39	3050.91	2,991	46
21	3050.91	3170.44	3,111	34
22	3170.44	3289.96	3,230	22
23	3289.96	3409.48	3,350	18
24	3409.48	3529.00	3,469	12
25	3529.00	3648.52	3,589	6
26	3648.52	3770.84	3,710	4

Fuente: Elaboración propia

Figura 23

Histograma de frecuencias – palas HITACHI



Fuente: Elaboración propia

3.1.3 KPIs de equipos de acarreo (camiones)

En particular, para el caso de los camiones de acarreo, se ha considerado la información registrada entre enero y setiembre de 2019, enfocándose en los principales indicadores operativos que influyen directamente en su productividad y eficiencia. Estos indicadores se detallan a continuación.

3.1.3.1 KPIs de camiones CAT.

Tabla 7

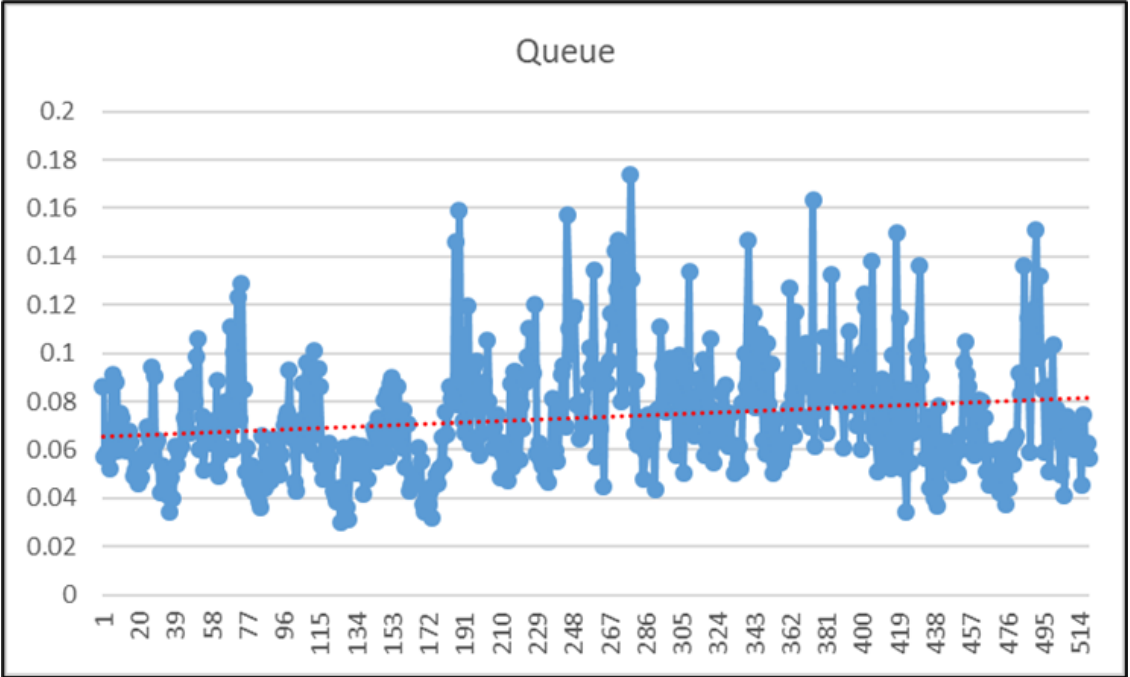
KPIs de camiones CAT

INDICADOR	PROMEDIO	MÍNIMO	MÁXIMO	MEDIANA	DESVIACIÓN ESTÁNDAR
Disponibilidad mecánica	0.90	0.62	1.00	0.91	0.05
Utilización	0.41	0.04	0.71	0.45	0.13
Productividad	331.89	202.47	613.70	318.86	68.25
Productividad efectiva	359.53	214.02	733.70	340.87	81.42
Queue	0.07	0.03	0.17	0.07	0.02
Media cola & spot	293.20	106.86	624.75	284.83	73.90
Media t. ciclo	2,669.90	1,324.58	4,082.81	2,686.08	473.70
EFH vacío	6,320.88	1,545.70	13,880.74	6,224.42	1,704.78
EFH lleno	9,156.33	1,873.10	19,246.87	9,120.13	2,445.00
Velocidad	18.96	14.94	26.72	18.82	1.78
Numero de descargas	149.29	15.00	284.00	153.00	49.13
Producción	35,935.53	3,717.00	68,364.00	36,652.00	11,921.89
Factor de carga	240.62	223.97	258.62	240.59	3.75
EFH total	15,477.21	3,418.79	29,516.93	15,498.92	3,979.78
Cantidad de camiones	25				
Nº de datos	519				

Fuente: Elaboración propia

Figura 24

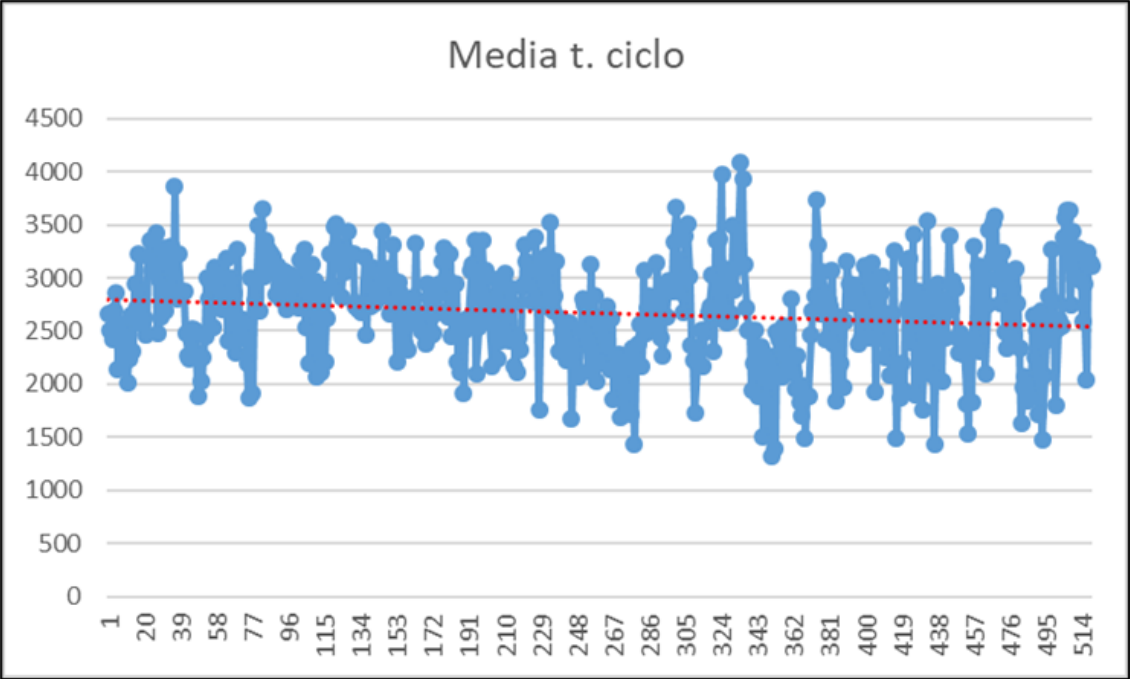
Queue – camiones CAT



Fuente: Elaboración propia

Figura 25

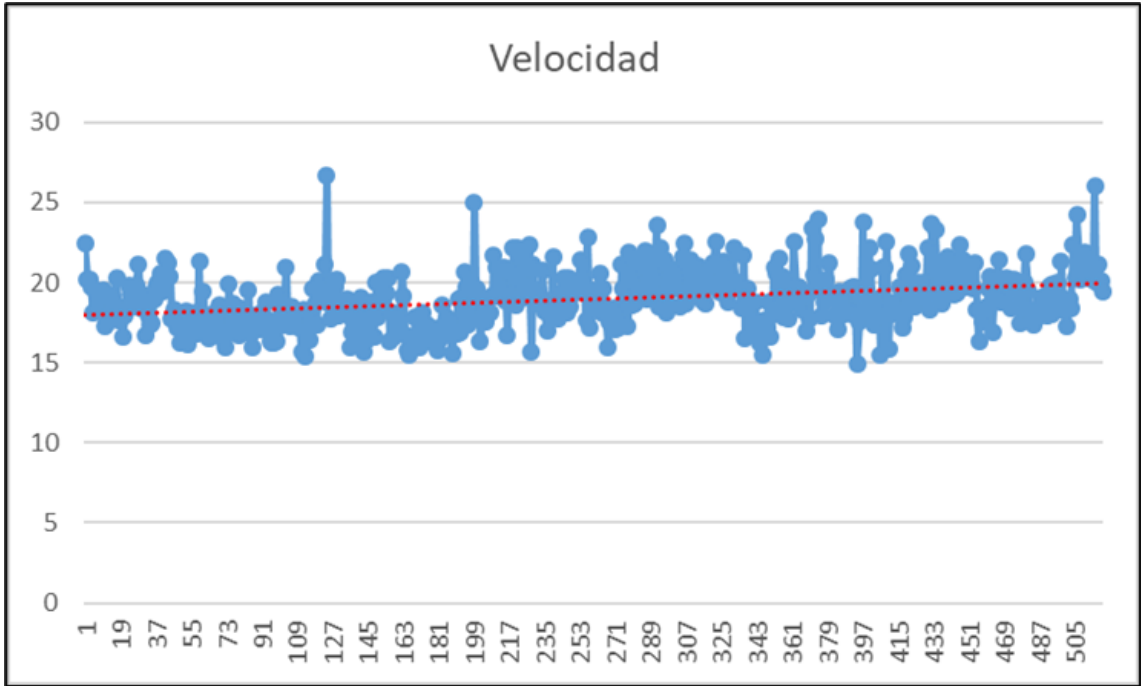
Media t. ciclo – camiones CAT



Fuente: Elaboración propia

Figura 26

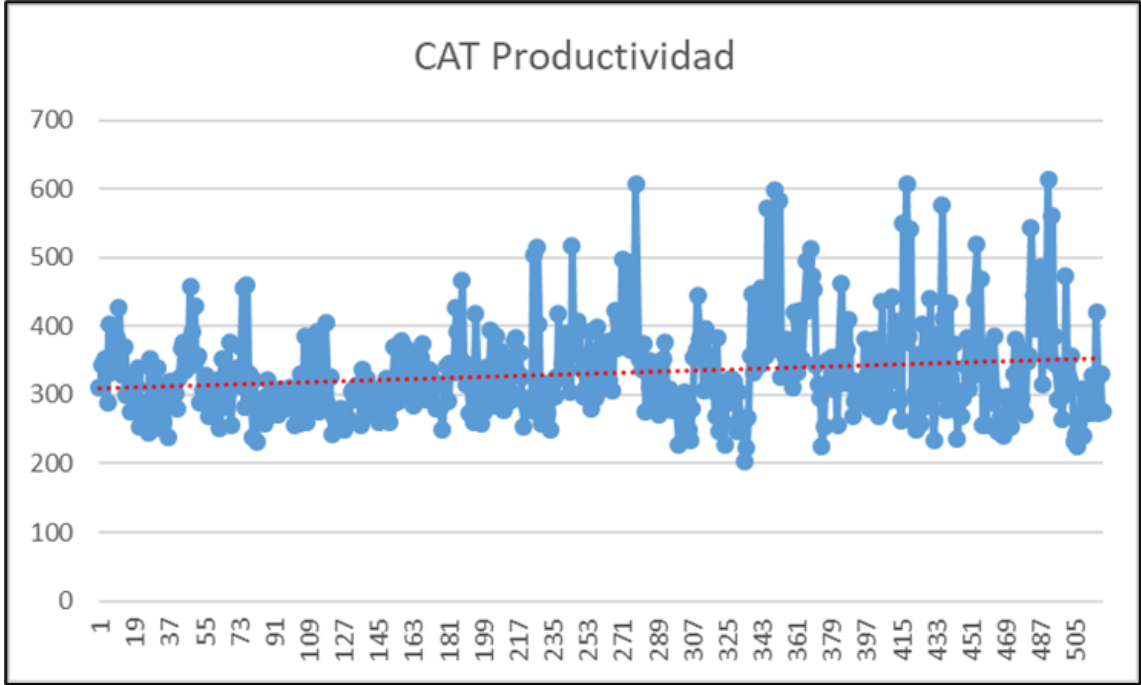
Velocidad – camiones CAT



Fuente: Elaboración propia

Figura 27

Productividad – camiones CAT



Fuente: Elaboración propia

3.1.3.2 KPIs de camiones KOMATSU

Tabla 8

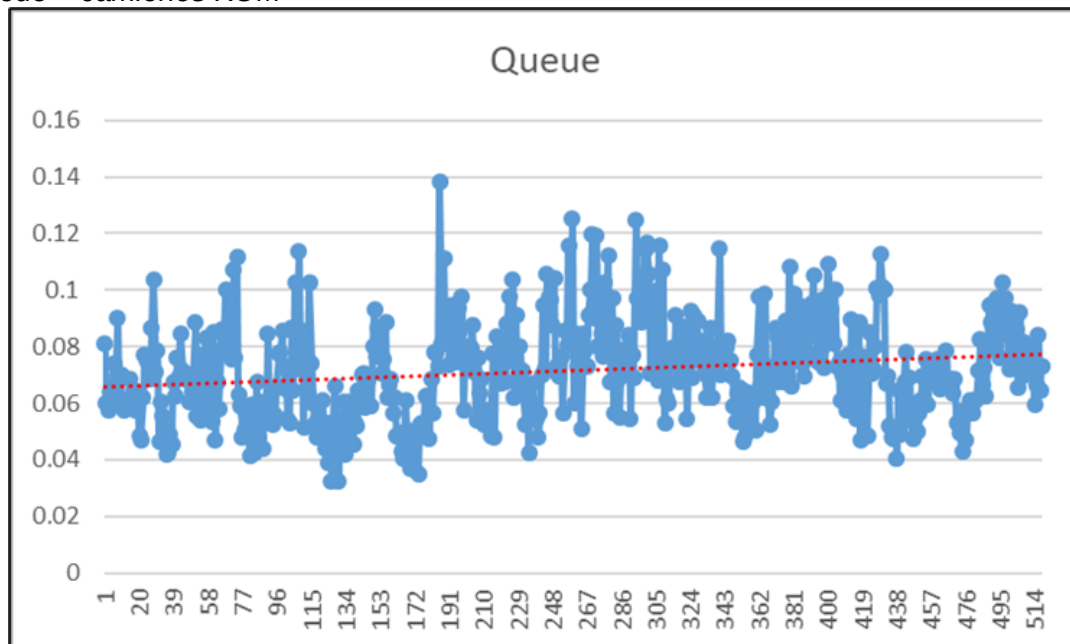
KPIs de camiones KOM

INDICADOR	PROMEDIO	MÍNIMO	MÁXIMO	MEDIANA	DESVIACIÓN ESTÁNDAR
Disponibilidad mecánica	0.88	0.82	0.94	0.88	0.02
Utilización	0.78	0.63	0.82	0.78	0.02
Productividad	423.10	340.98	553.40	420.69	34.83
Productividad efectiva	456.07	355.88	604.56	455.55	39.65
Queue	0.07	0.03	0.14	0.07	0.02
Media cola & spot	314.35	171.79	516.44	307.61	63.91
Media t. ciclo	2,624.37	2,078.34	3,310.60	2,604.55	203.63
EFH vacío	6,472.47	3,956.31	10,192.07	6,446.77	771.66
EFH lleno	9,994.57	7,304.15	14,524.27	9,900.12	1,076.02
Velocidad	19.88	15.44	25.49	20.17	1.52
Numero de descargas	1,034.55	766.00	1,324.00	1,028.50	93.42
Producción	322,077.51	238,641.00	412,221.00	320,325.00	29,309.61
Factor de carga	311.32	303.12	319.30	311.45	2.76
EFH total	16,467.04	11,274.21	23,131.68	16,330.40	1,644.21
Cantidad de camiones	92				
Nº de datos	518				

Fuente: Elaboración propia

Figura 28

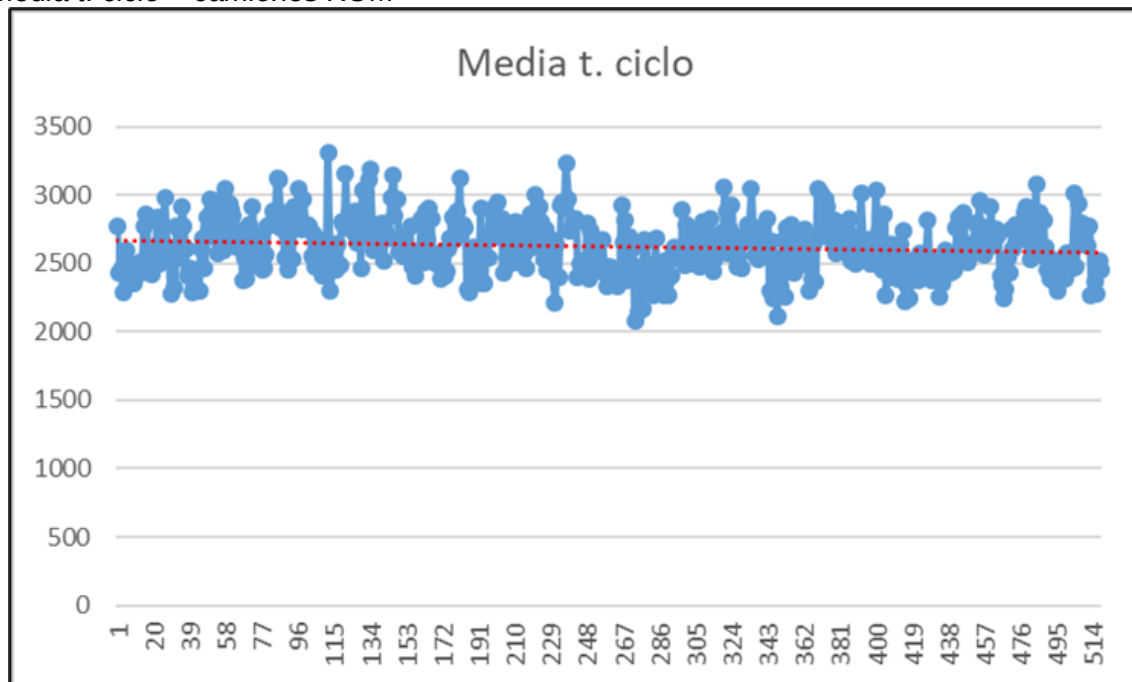
Queue – camiones KOM



Fuente: Elaboración propia

Figura 29

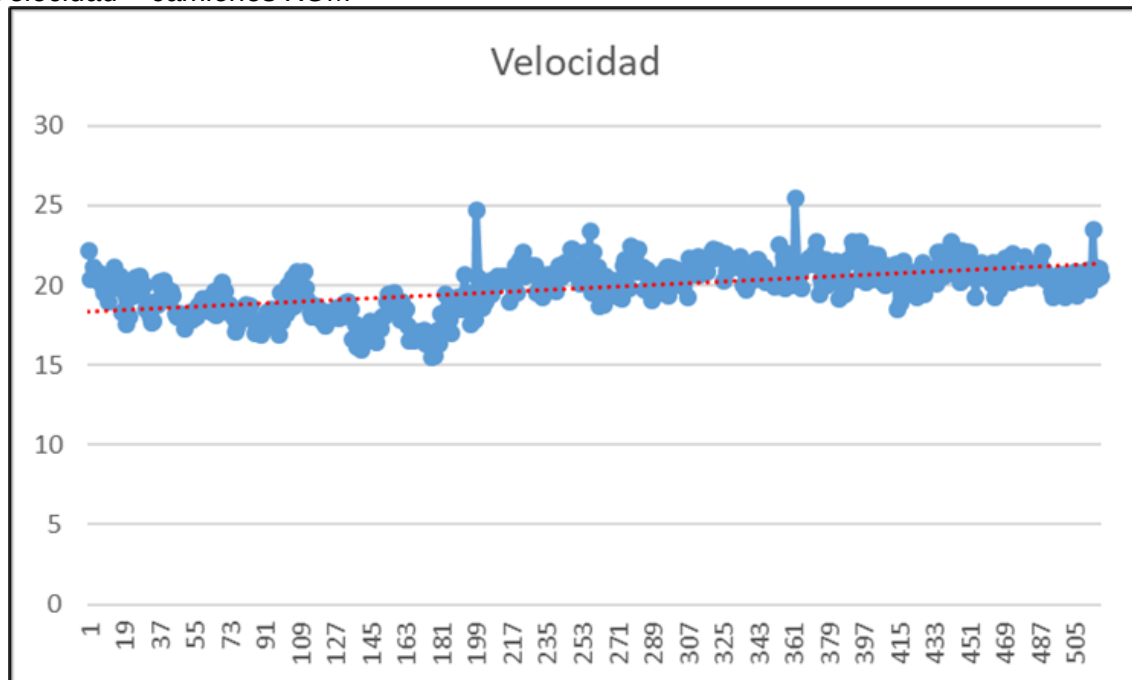
Media t. ciclo – camiones KOM



Fuente: Elaboración propia

Figura 30

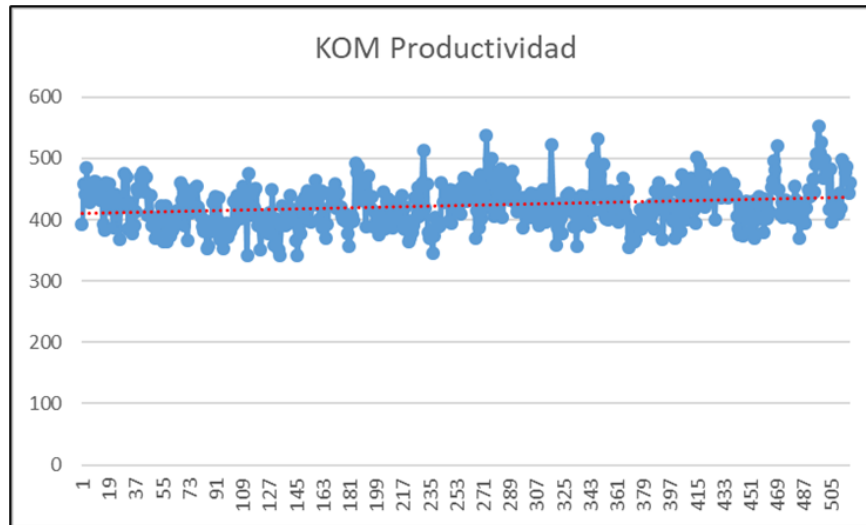
Velocidad – camiones KOM



Fuente: Elaboración propia

Figura 31

Productividad – camiones KOM



Fuente: Elaboración propia

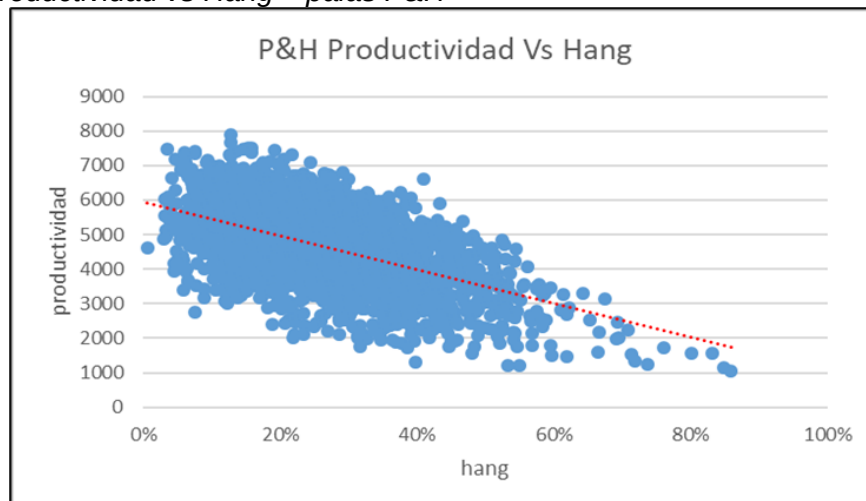
3.2 Procesamiento de la información

3.2.1 Modelamiento de productividad de palas

La productividad de las palas está influenciada por una variedad de factores operativos y técnicos, entre los que se destacan las condiciones de voladura, el grado de fragmentación del material, los tiempos de espera (Queue), los tiempos sin camión (Hang), el estado del frente de carguío, así como la destreza y experiencia del operador. Estos elementos interactúan de manera dinámica, afectando directa o indirectamente el rendimiento por hora de los equipos de carguío.

Figura 32

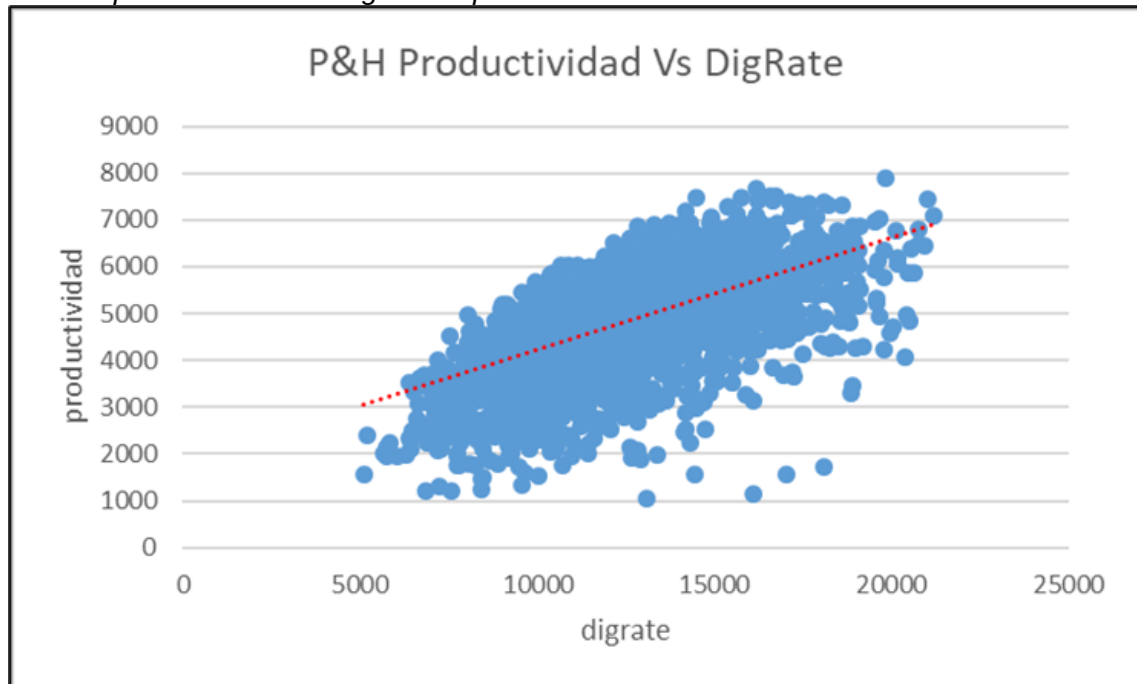
Relación productividad vs Hang – palas P&H



Fuente: Elaboración propia

Figura 33

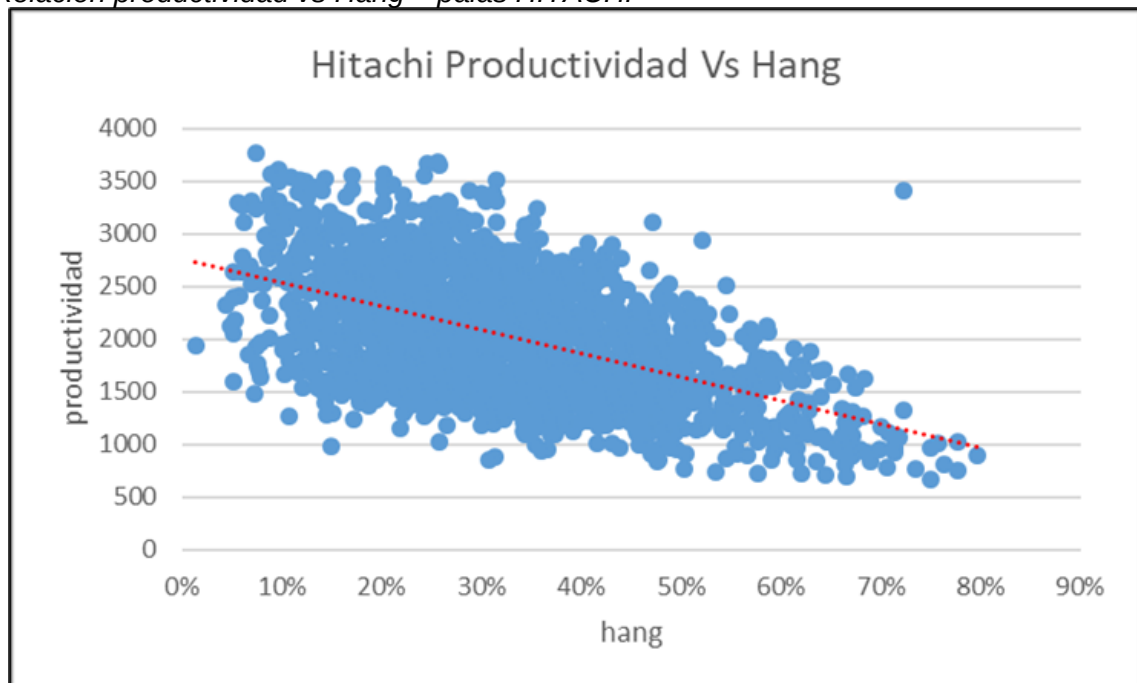
Relación productividad vs DigRate – palas P&H



Fuente: Elaboración propia

Figura 34

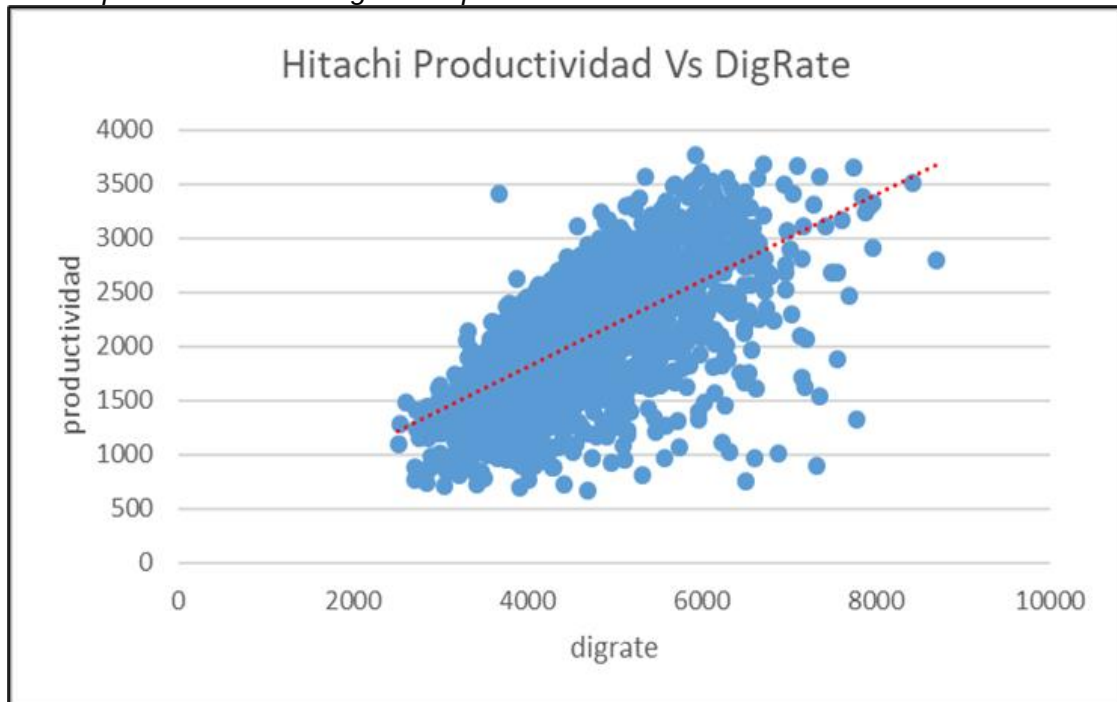
Relación productividad vs Hang – palas HITACHI



Fuente: Elaboración propia

Figura 35

Relación productividad vs DigRate – palas HITACHI



Fuente: Elaboración propia

Se identificaron como factores determinantes en el desempeño de las palas a dos variables específicas: el DigRate (tasa de excavación efectiva) y el Hang (tiempo en que la pala permanece sin camiones disponibles para cargar). Estas dos variables demostraron tener una influencia significativa y directa sobre la productividad de las palas, tanto en términos de aumento como de disminución del rendimiento operativo.

3.2.1.1 Modelo de productividad de palas P&H. Tenemos la siguiente relación entre productividad, DigRate y Hang:

$$\text{Productividad} = A_0 + A_1 * \text{DigRate} + A_2 * \text{Hang} + \mu$$

Definimos la matriz $X=[X1(\text{DigRate});X2(\text{Hang})]$ y la matriz $Y=[Y(\text{productividad})]$.

Realizando regresión lineal por mínimos cuadrados, obtenemos las siguientes matrices.

Tabla 9

Regresión lineal – Productividad vs (DigRate & Hang) – palas P&H

Xt	1	1	1	1
	14872.21813	17285.85547	13519.88086	10632.94819
	0.343507973	0.093400424	0.455080545	0.113381282
Xt .X	3397	41438949.14	837.6261899	
	41438949.14	5.2796E+11	10398698.22	
	837.6261899	10398698.22	250.1393043	
Xt. X^-1	0.007442599	-5.14805E-07	-0.003521278	
	-5.14805E-07	4.60618E-11	-1.90967E-07	
	-0.003521278	-1.90967E-07	0.023728067	
Xt. Y	16123019.63			
	2.02074E+11			
	3760754.809			
Ao	2725.473528		Y	productividad
A1	0.289518418		X1	DigRate
A2	-6127.736943		X2	Hang

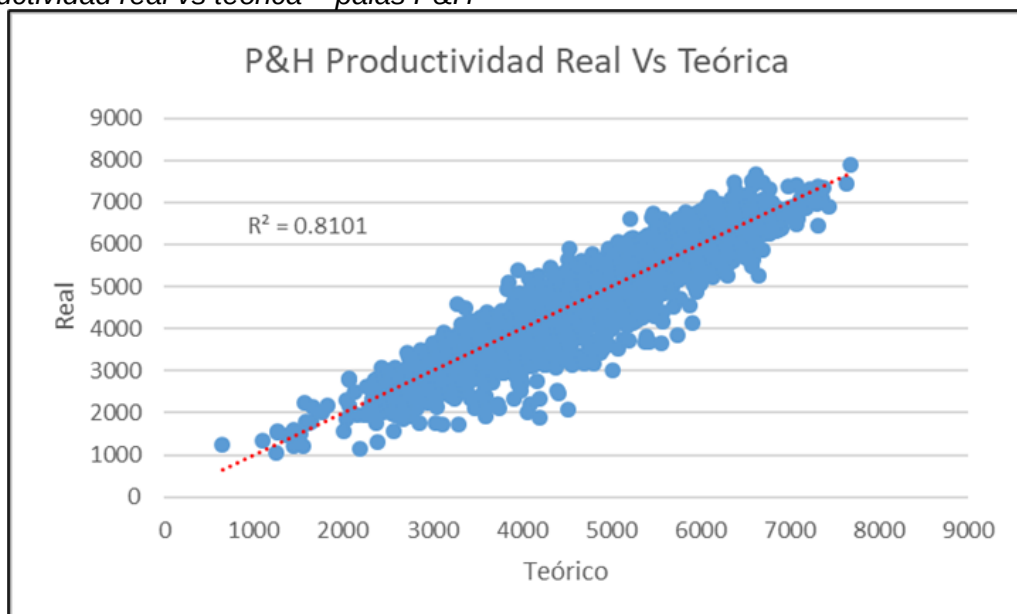
Fuente: Elaboración propia

Reemplazando los coeficientes, se obtiene el modelo de productividad.

$$\text{Productividad} = 2725.474 + 0.289518 \cdot \text{DigRate} - 6127.74 \cdot \text{Hang}$$

Figura 36

Productividad real vs teórica – palas P&H



Fuente: Elaboración propia

Para poder visualizar el comportamiento de la productividad de las palas P&H, se evaluara valores de DigRate y Hang en la ecuación obtenida anteriormente.

Tabla 10

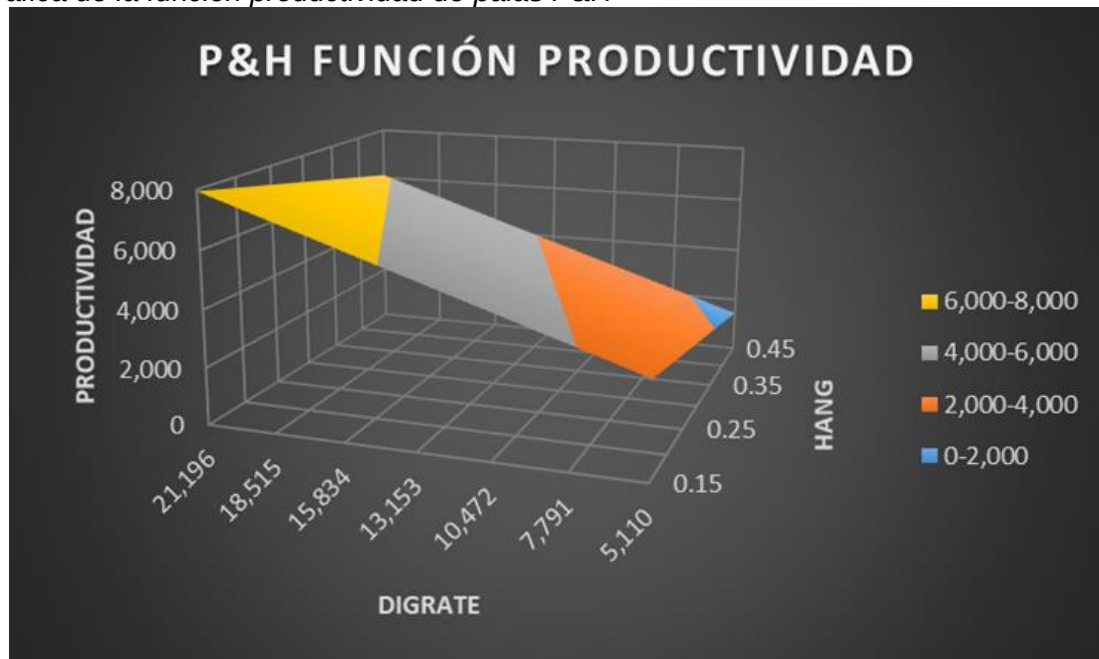
Evolución de productividad en palas P&H

DigRate \ Hang	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45
21,196	7,943	7,637	7,330	7,024	6,717	6,411	6,105
18,515	7,167	6,860	6,554	6,248	5,941	5,635	5,328
15,834	6,391	6,084	5,778	5,471	5,165	4,859	4,552
13,153	5,614	5,308	5,002	4,695	4,389	4,082	3,776
10,472	4,838	4,532	4,225	3,919	3,613	3,306	3,000
7,791	4,062	3,756	3,449	3,143	2,836	2,530	2,224
5,110	3,286	2,979	2,673	2,367	2,060	1,754	1,447

Fuente: Elaboración propia

Figura 37

Grafica de la función productividad de palas P&H



Fuente: Elaboración propia

También se presenta las siguiente relaciones entre Queue, Hang, t.Queue y t.Hang:

$$\text{Hang} = A_0 + A_1 \cdot \ln(\text{Queue}) + \mu$$

Definimos la matriz $X'=[X'(\ln(\text{Queue}))]$ y la matriz $Y=[Y(\text{Hang})]$. Realizando regresión lineal por mínimos cuadrados, obtenemos las siguientes matrices.

Tabla 11

Regresión lineal – Queue vs Hang – palas P&H

Xt	1	1	1	1
	-2.892131879	-2.403959259	-3.350674284	-2.290733106
Xt . X	3397	-9261.217755		
	-9261.217755	26135.20312		
Xt. X ⁻¹	0.008679531	0.003075661		
	0.003075661	0.001128148		
Xt. Y	837.6261899			
	-2438.295371			
Ao	-0.229167657		Y	Hang
A1	-0.174502832		X1	Queue

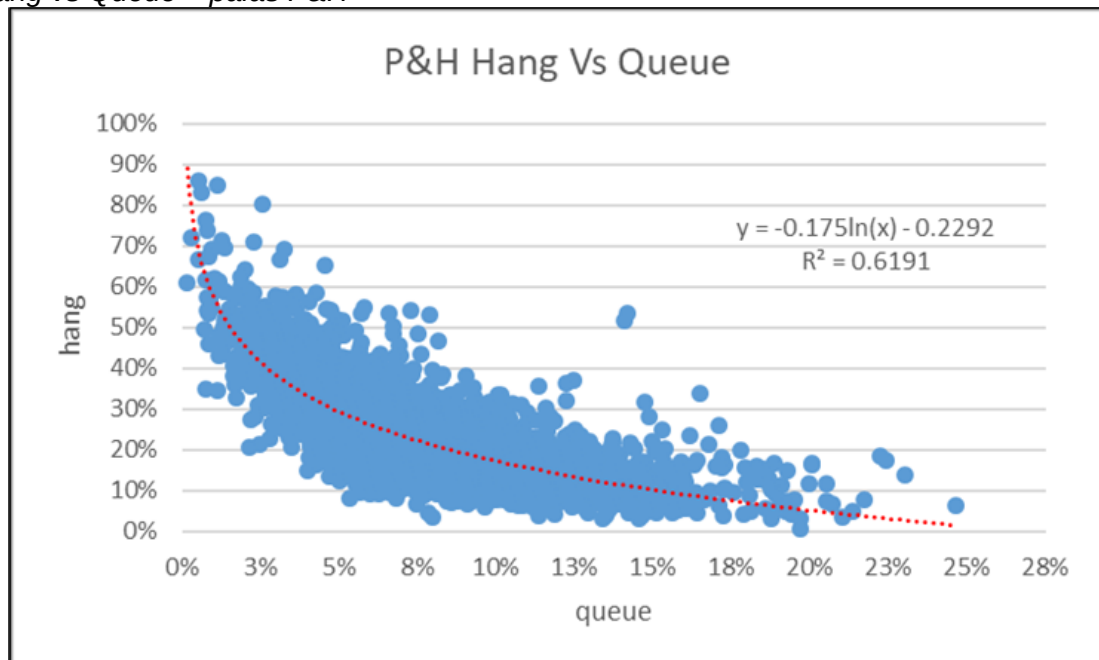
Fuente: Elaboración propia

Reemplazando los coeficientes, se obtiene el modelo de Hang.

$$\text{Hang} = -0.22917 - 0.1745 \cdot \ln(\text{Queue})$$

Figura 38

Hang vs Queue – palas P&H



Fuente: Elaboración propia

$$t. \text{ Hang} = A_0 \cdot e^{A_1 \cdot \text{Hang}} + \mu$$

Definimos la matriz $X=[X(\text{Hang})]$ y la matriz $Y'=[Y'(\ln(t. \text{ Hang}))]$.

Tabla 12

Regresión lineal – t.Hang vs Hang – palas P&H

Xt	1	1	1	1
	0.343507973	0.093400424	0.455080545	0.113381282
Xt .X	3397	837.6261899		
	837.6261899	250.1393043		
Xt. X^-1	0.001688926	-0.005655602		
	-0.005655602	0.02293634		
Xt. Y	-416.8187802			
	128.3044118			
Ao	0.239401183		Y	t.Hang
A1	5.300194622		X1	Hang

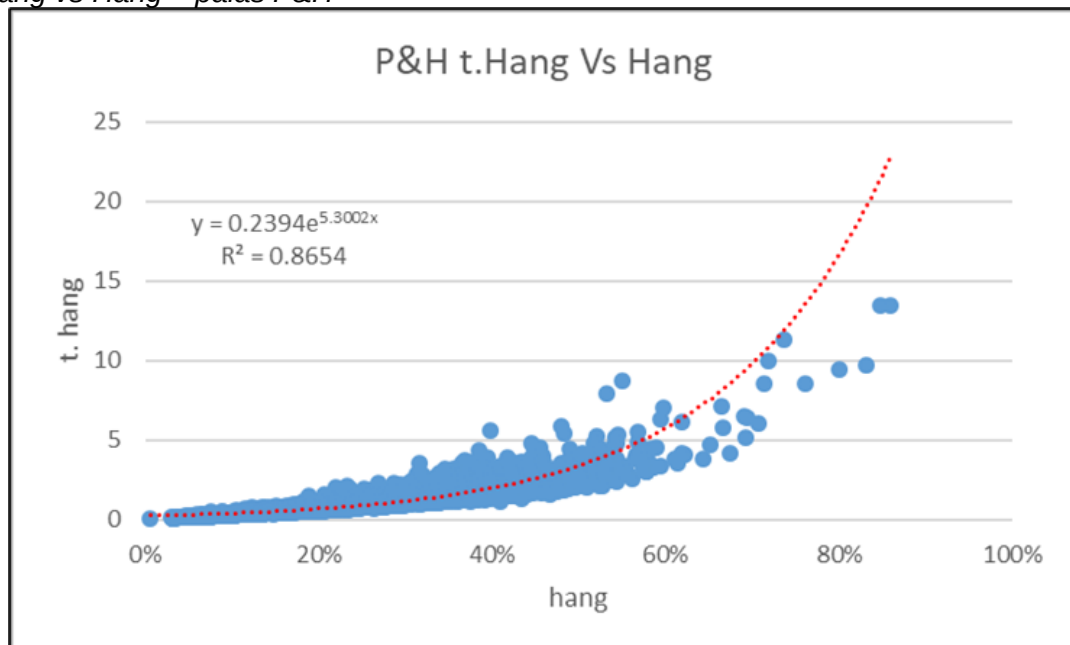
Fuente: Elaboración propia

Reemplazando los coeficientes, se obtiene el modelo de t.Hang.

$$t. Hang = 0.239721 \cdot e^{(5.295527) \cdot Hang}$$

Figura 39

t.Hang vs Hang – palas P&H



Fuente: Elaboración propia

$$t. Queue = Ao + A1 \cdot Queue + \mu$$

Definimos la matriz $X=[X(Queue)]$ y la matriz $Y=[Y(\ln_{10}(t.Queue))]$.

Tabla 13

Regresión lineal – t.Queue vs Queue – palas P&H

Xt	1	1	1	1
	0.055457857	0.090359487	0.035060705	0.10119225
Xt .X	3397	249.7741603		
	249.7741603	22.36291854		
Xt. X^-1	0.00164679	-0.018393197		
	-0.018393197	0.250152744		
Xt. Y	11064.71849			
	986.6364994			
Ao	0.07386723		Y	t.Queue
A1	43.2942763		X1	Queue

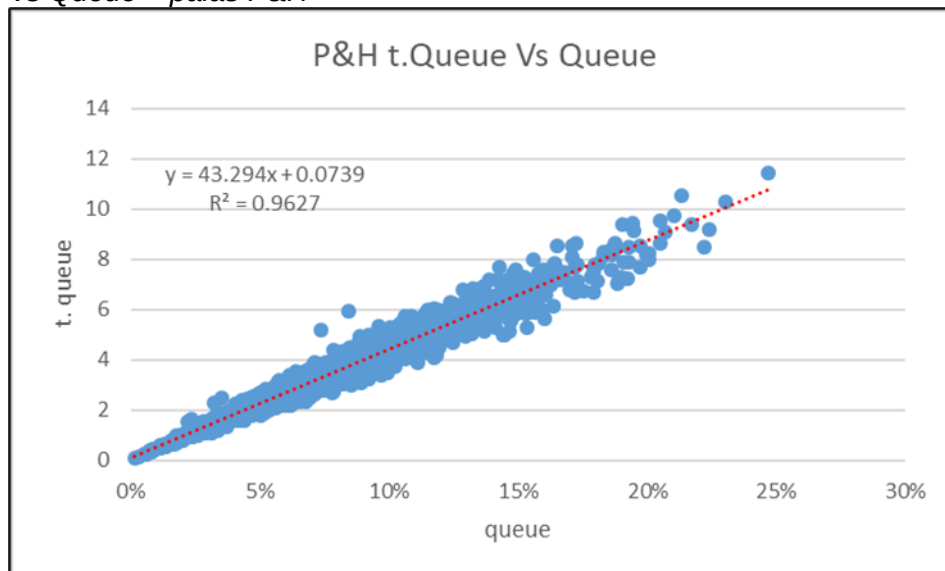
Fuente: Elaboración propia

Reemplazando los coeficientes, se obtiene el modelo de t.Queue.

$$t. Queue = 0.073731 + 43.29521 \cdot Queue$$

Figura 40

t.Queue vs Queue – palas P&H



Fuente: Elaboración propia

3.2.1.2 Modelo de productividad de palas HITACHI

Tenemos la siguiente relación entre productividad, DigRate y Hang:

$$\text{Productividad} = A_0 + A_1 \cdot \text{DigRate} + A_2 \cdot \text{Hang} + \mu$$

Definimos la matriz $X=[X1(\text{DigRate});X2(\text{Hang})]$ y la matriz $Y=[Y(\text{productividad})]$.

Realizando regresión lineal por mínimos cuadrados, obtenemos las siguientes matrices.

Tabla 14

Regresión lineal – Productividad vs (DigRate & Hang) – palas HITACHI

Xt	1	1	1	1
	5078.098655	3252.55516	4233.428428	3970.027114
	0.525385349	0.231545646	0.178135972	0.191408812
Xt .X	1868	8596125.611	598.5233139	
	8596125.611	41323134031	2791895.692	
	598.5233139	2791895.692	228.4803305	
Xt. X ⁻¹	0.013905776	-2.47433E-06	-0.006192533	
	-2.47433E-06	5.79008E-10	-5.93434E-07	
	-0.006192533	-5.93434E-07	0.027850017	
Xt. Y	3814985.433			
	18262000248			
	1140428.743			
Ao	802.0543477		Y	productividad
A1	0.457556407		X1	DigRate
A2	-2700.754346		X2	Hang

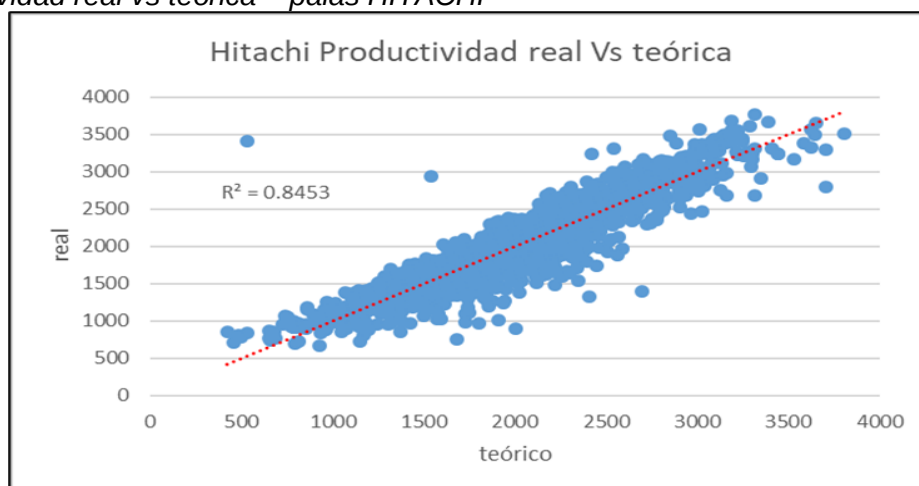
Fuente: Elaboración propia

Reemplazando los coeficientes, se obtiene el modelo de productividad.

$$\text{Productividad} = 802.0543 + 0.457556 \cdot \text{DigRate} - 2700.75 \cdot \text{Hang}$$

Figura 41

Productividad real vs teórica – palas HITACHI



Fuente: Elaboración propia

Para poder visualizar el comportamiento de la productividad de las palas P&H, se evaluara valores de DigRate y Hang en la ecuación obtenida anteriormente.

Tabla 15

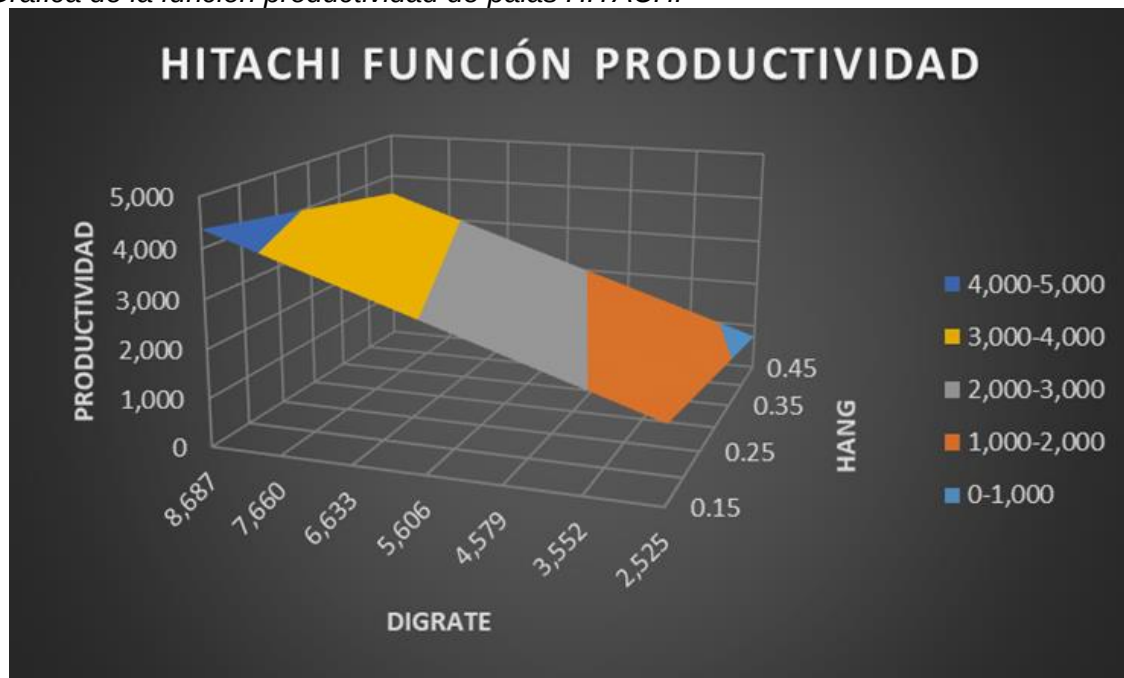
Evolución de productividad en palas HIITACHI

DigRate \ Hang	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45
8,687	4,372	4,237	4,102	3,967	3,832	3,697	3,562
7,660	3,902	3,767	3,632	3,497	3,362	3,227	3,092
6,633	3,432	3,297	3,162	3,027	2,892	2,757	2,622
5,606	2,962	2,827	2,692	2,557	2,422	2,287	2,152
4,579	2,492	2,357	2,222	2,087	1,952	1,817	1,682
3,552	2,022	1,887	1,752	1,617	1,482	1,347	1,212
2,525	1,552	1,417	1,282	1,147	1,012	877	742

Fuente: Elaboración propia

Figura 42

Grafica de la función productividad de palas HITACHI



Fuente: Elaboración propia

También se presenta las siguiente relaciones entre Queue, Hang, t.Queue y t.Hang:

$$\text{Hang} = A_0 + A_1 \cdot \ln(\text{Queue}) + \mu$$

Definimos la matriz $X'=[X'(\ln(\text{Queue}))]$ y la matriz $Y=[Y(\text{Hang})]$. Realizando regresión lineal por mínimos cuadrados, obtenemos las siguientes matrices.

Tabla 16

Regresión lineal – Hang vs Queue – palas HITACHI

Xt	1	1	1	1
	-3.253395876	-1.987773897	-2.598447459	-2.056879259
Xt .X	1868	-5492.266385		
	-5492.266385	17138.79821		
Xt. X^-1	0.009262788	0.002968335		
	0.002968335	0.001009574		
Xt. Y	598.5233139			
	-1899.198569			
Ao	-0.093463524		Y	Hang
A1	-0.140763962		X1	Queue

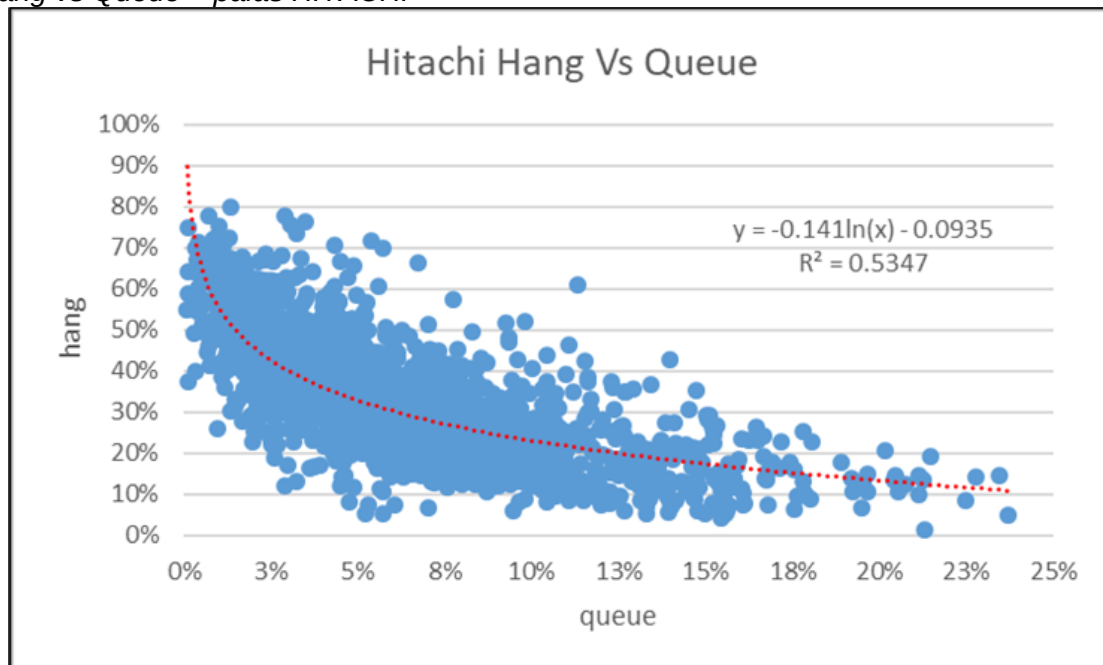
Fuente: Elaboración propia

Reemplazando los coeficientes, se obtiene el modelo de Hang.

$$\text{Hang} = -0.09346 - 0.14076 \cdot \ln(\text{Queue})$$

Figura 43

Hang vs Queue – palas HITACHI



Fuente: Elaboración propia

$$t. \text{Hang} = A_0 \cdot e^{A_1 \cdot \text{Hang}} + \mu$$

Definimos la matriz $X=[X(\text{Hang})]$ y la matriz $Y'=[Y'(\ln(t. \text{Hang}))]$.

Tabla 17

Regresión lineal – t.Hang vs Hang – palas HITACHI

Xt	1	1	1	1
	0.525385349	0.231545646	0.178135972	0.191408812
Xt .X	1868	598.5233139		
	598.5233139	228.4803305		
Xt. X^-1	0.003332021	-0.008728507		
	-0.008728507	0.027241797		
Xt. Y	1807.490604			
	743.5033028			
Ao	0.62683158		Y	t.Hang
A1	4.477672131		X1	Hang

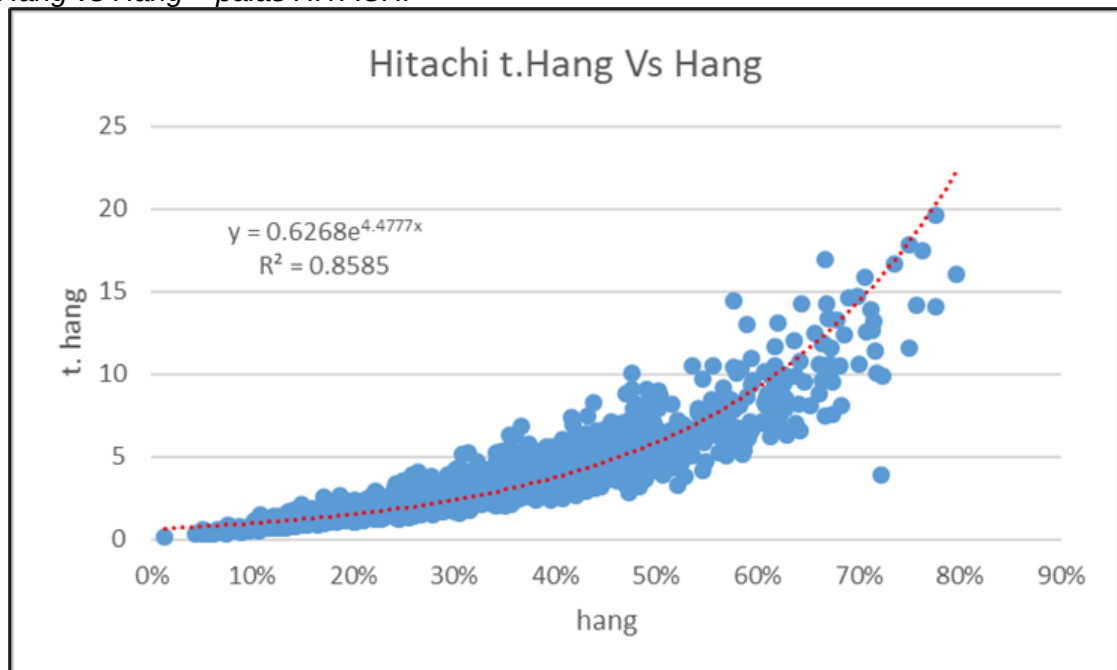
Fuente: Elaboración propia

Reemplazando los coeficientes, se obtiene el modelo de t.Hang.

$$t. \text{ Hang} = 0.622712 \cdot e^{(4.490815) \cdot \text{Hang}}$$

Figura 44

t.Hang vs Hang – palas HITACHI



Fuente: Elaboración propia

$$t. \text{ Queue} = A_0 + A_1 \cdot \text{Queue} + \mu$$

Definimos la matriz $X=[X(\text{Queue})]$ y la matriz $Y=[Y(\ln(t.\text{Queue}))]$.

Tabla 18

Regresión lineal – t.Queue vs Queue – palas HITACHI

Xt	1	1	1	1
	0.038642759	0.137000063	0.074388981	0.127852342
Xt .X	1868	122.4847927		
	122.4847927	11.01996495		
Xt. X^-1	0.001973924	-0.021939788		
	-0.021939788	0.334600918		
Xt. Y	5452.524968			
	490.9604919			
Ao	-0.008698189		Y	t.Queue
A1	44.64858915		X1	Queue

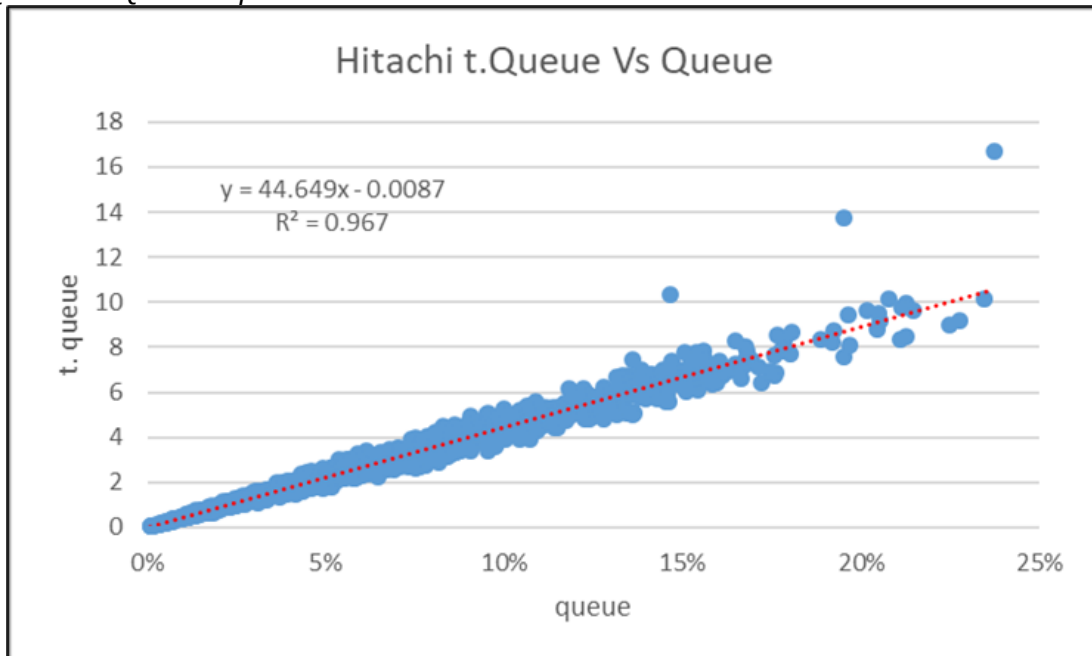
Fuente: Elaboración propia

Reemplazando los coeficientes, se obtiene el modelo de t.Queue.

$$t. \text{Queue} = -0.00854 + 44.65425 \cdot \text{Queue}$$

Figura 45

t.Queue vs Queue – palas HITACHI

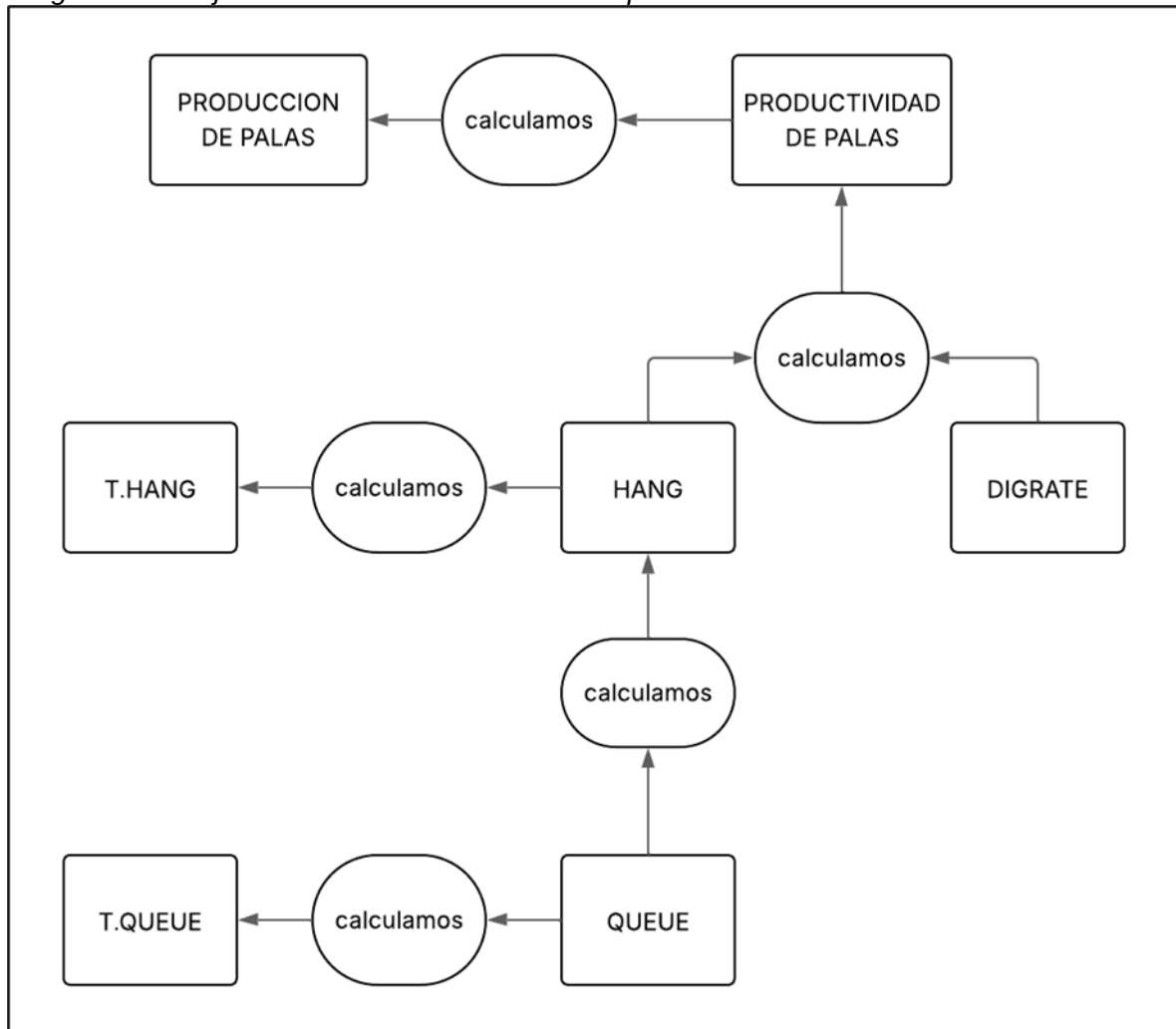


Fuente: Elaboración propia

En la siguiente figura se muestra un diagrama de flujo donde se visualiza la relación entre las variables mostradas para determinar el modelo de productividad de las palas.

Figura 46

Diagrama de flujo de correlación de variables – palas



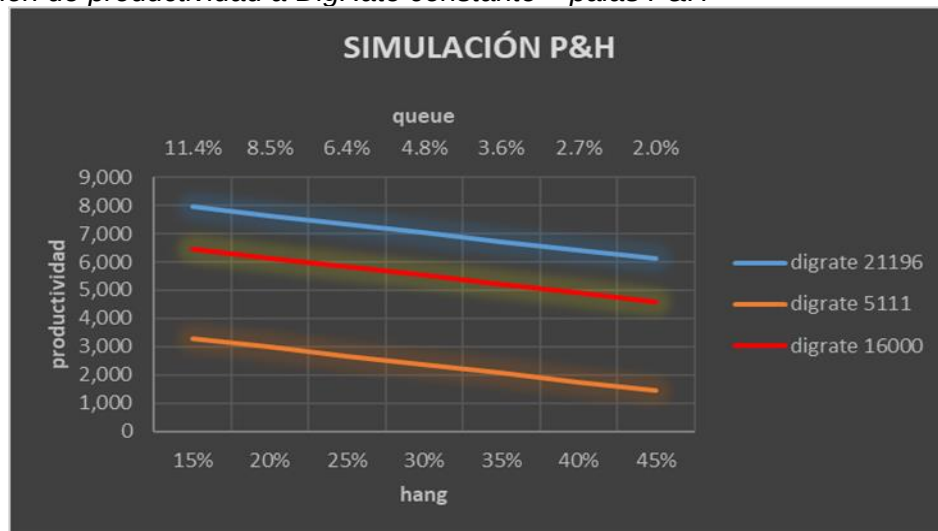
Fuente: Elaboración propia

3.2.1.3 Simulación de productividad (DigRate constante). Usando las funciones obtenidas de productividad (DigRate y Hang) y Hang (Queue). Se determina el rango de valores que tendría la productividad conforme se varían los valores de Hang y Queue. Para mostrar un caso práctico, se usaran DigRate de 16,000 ton/hora para P&H y 5,700 ton/hora para HITACHI. Los valores de Hang oscilara de 15% a 45% en intervalos de 5%, tenemos.

Tabla 19*Simulación de productividad a DigRate constante – palas P&H*

PRODUCTIVIDAD	DigRate 16,000	HANG	QUEUE
6,439	16,000	15%	11.4%
6,132	16,000	20%	8.5%
5,826	16,000	25%	6.4%
5,519	16,000	30%	4.8%
5,213	16,000	35%	3.6%
4,907	16,000	40%	2.7%
4,600	16,000	45%	2.0%

Fuente: Elaboración propia

Figura 47*Simulación de productividad a DigRate constante – palas P&H*

Fuente: Elaboración propia

Para un DigRate constante de 16,000 ton/hr la productividad varía desde 6,400 hasta 4,600 a medida que se incrementa el Hang y disminuimos el Queue.

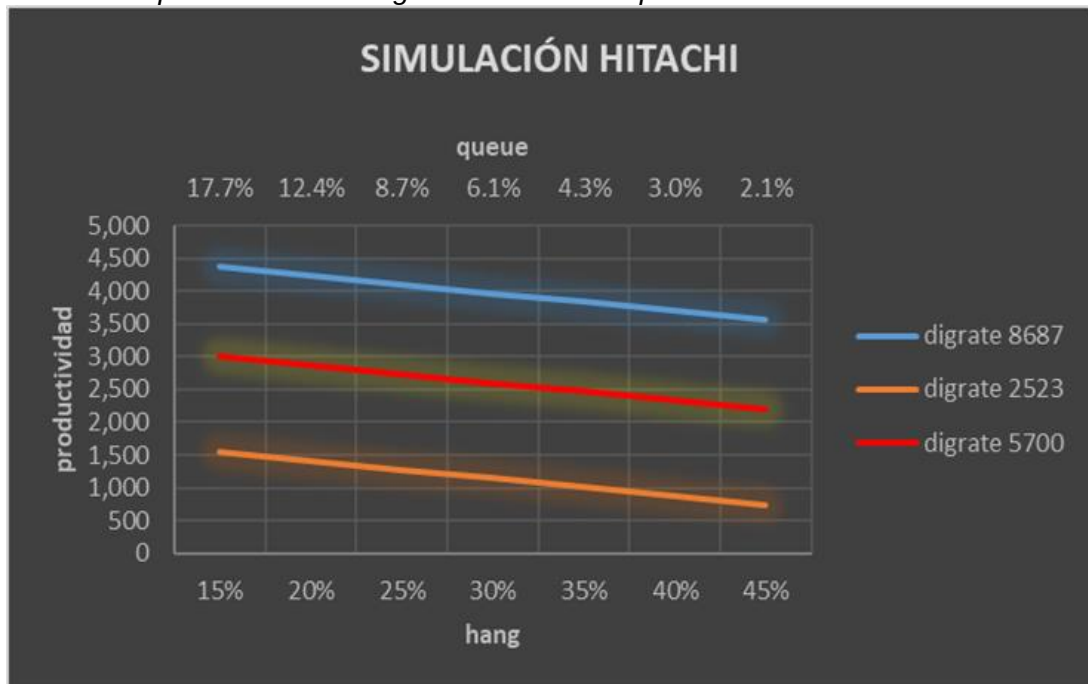
Tabla 20*Simulación de productividad a DigRate constante – palas HITACHI*

PRODUCTIVIDAD	DigRate 5,700	HANG	QUEUE
3,005	5,700	15%	17.7%
2,870	5,700	20%	12.4%
2,735	5,700	25%	8.7%
2,600	5,700	30%	6.1%
2,465	5,700	35%	4.3%
2,330	5,700	40%	3.0%
2,195	5,700	45%	2.1%

Fuente: Elaboración propia

Figura 48

Simulación de productividad a DigRate constante – palas HITACHI



Fuente: Elaboración propia

Para un DigRate constante de 5,700 ton/hr la productividad varía desde 3,000 hasta 2,200 a medida que se incrementa el Hang y disminuimos el Queue.

3.2.1.4 Correlación DigRate vs t.Hang y t.Queue. Para este caso, usando las funciones Hang (Queue), t.Hang (Hang) y t.Queue (Queue). Se determinara la correlación que muestra el DigRate con los parámetros de t.Hang y t.Queue, y su efecto en la productividad de las palas, tenemos.

Tabla 21

Correlación DigRate vs t.Hang y t.Queue – palas P&H

PRODUCTIVIDAD	DigRate	HANG	t. HANG	QUEUE	t. QUEUE
7,393	19,856	18%	0.6	9.8%	4.3
6,223	17,175	24%	0.9	6.8%	3.0
5,052	14,494	31%	1.2	4.7%	2.1
3,882	11,813	37%	1.7	3.2%	1.5
2,712	9,132	43%	2.4	2.2%	1.0
1,542	6,451	50%	3.4	1.6%	0.7

Fuente: Elaboración propia

Figura 49

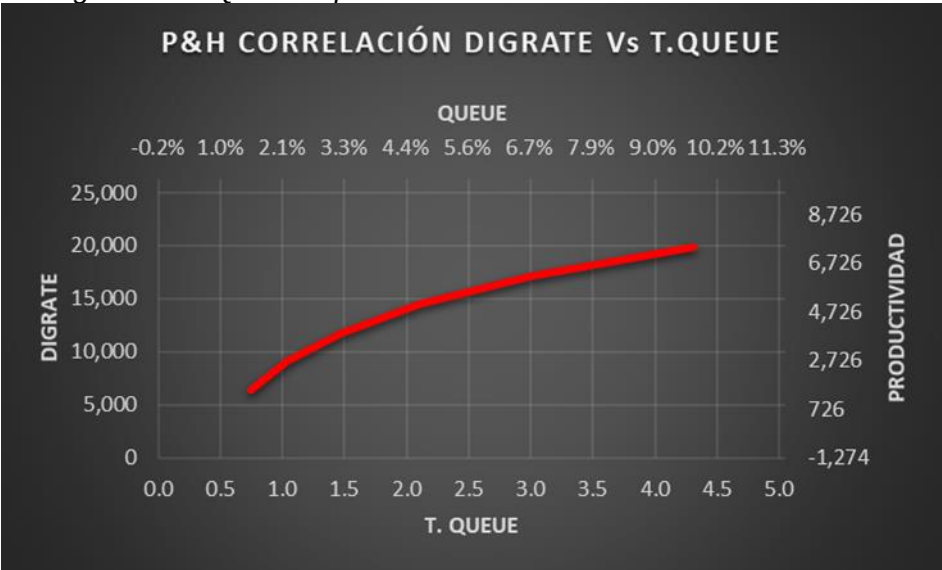
Correlación DigRate vs t.Hang – palas P&H



Fuente: Elaboración propia

Figura 50

Correlación DigRate vs t.Queue – palas P&H



Fuente: Elaboración propia

Tabla 22

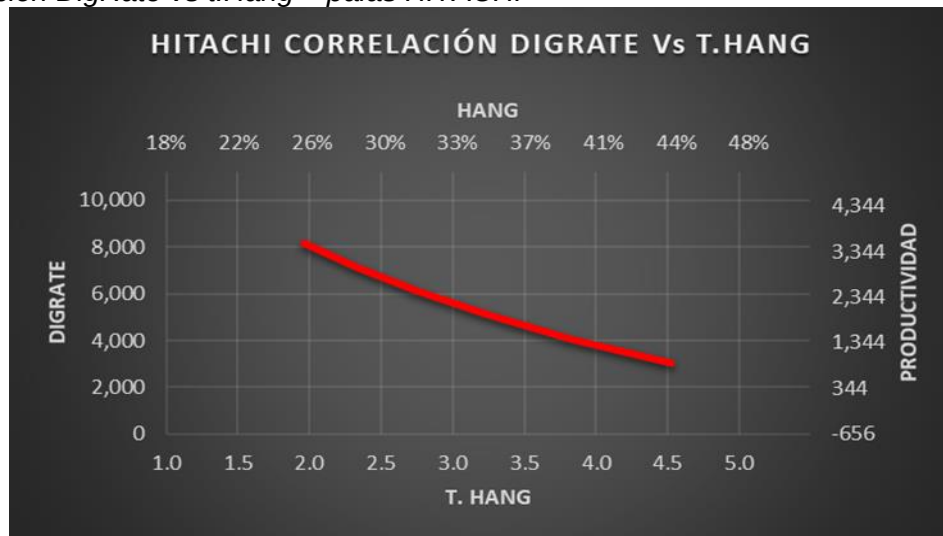
Correlación DigRate vs t.Hang y t.Queue – palas HITACHI

PRODUCTIVIDAD	DigRate	HANG	t. HANG	QUEUE	t. QUEUE
3,529	8,174	26%	2.0	8.4%	3.7
3,003	7,147	29%	2.3	6.5%	2.9
2,477	6,120	33%	2.7	4.9%	2.2
1,951	5,093	37%	3.2	3.8%	1.7
1,425	4,066	40%	3.8	2.9%	1.3
900	3,039	44%	4.5	2.2%	1.0

Fuente: Elaboración propia

Figura 51

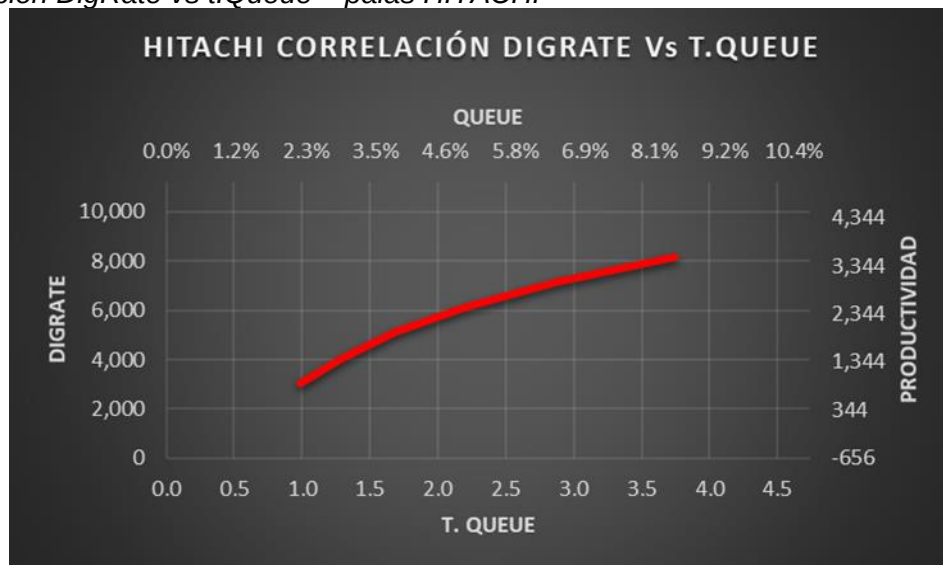
Correlación DigRate vs t.Hang – palas HITACHI



Fuente: Elaboración propia

Figura 52

Correlación DigRate vs t.Queue – palas HITACHI



Fuente: Elaboración propia

Se evidencia que, a medida que el DigRate (tasa de excavación) de una pala aumenta, es fundamental asegurar una disponibilidad continua de camiones, evitando tiempos de espera de la pala (Hang), para así alcanzar niveles óptimos de productividad. Una pala con alta capacidad de excavación requiere una asignación eficiente de flota para no operar por debajo de su potencial.

Por el contrario, cuando el DigRate es bajo, el proceso de carguío se vuelve más lento, por lo que resulta ineficiente asignar múltiples camiones en espera (situación de

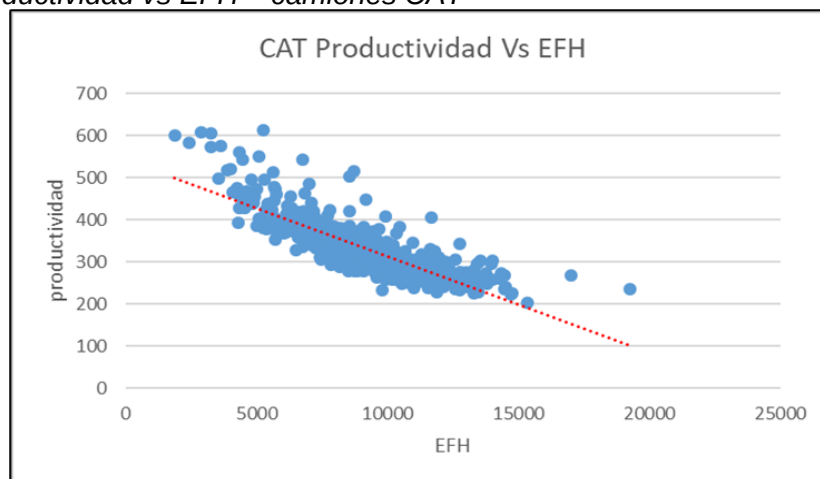
Queue), ya que estos aumentan los tiempos improductivos y no contribuyen a mejorar la producción. En este caso, es preferible reducir la cantidad de camiones en cola para minimizar pérdidas operativas y evitar la acumulación de tiempos inactivos.

3.2.2 Modelamiento de productividad de camiones

La productividad de los camiones de acarreo está influenciada por diversos factores operativos y de entorno, tales como la distancia horizontal equivalente (EFH), la velocidad de desplazamiento, condicionada por el estado de las vías y las condiciones climáticas, el tamaño del equipo, los tiempos de espera (Queue) y la experiencia del operador, entre otros.

Figura 53

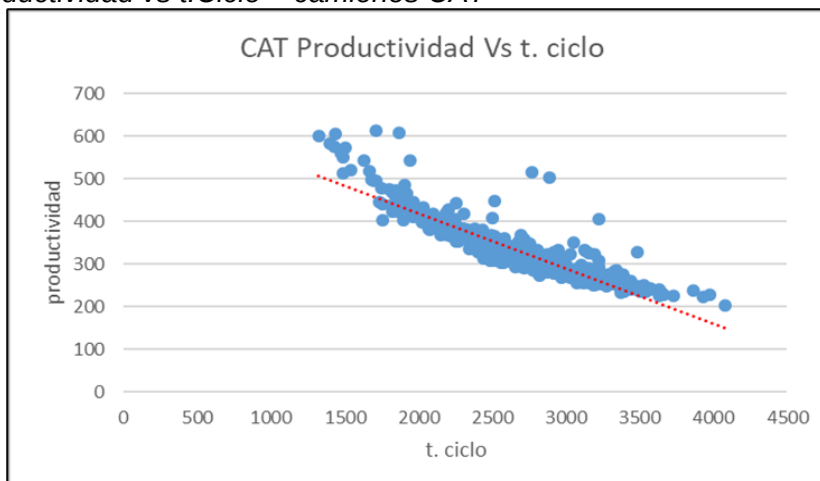
Relación productividad vs EFH – camiones CAT



Fuente: Elaboración propia

Figura 54

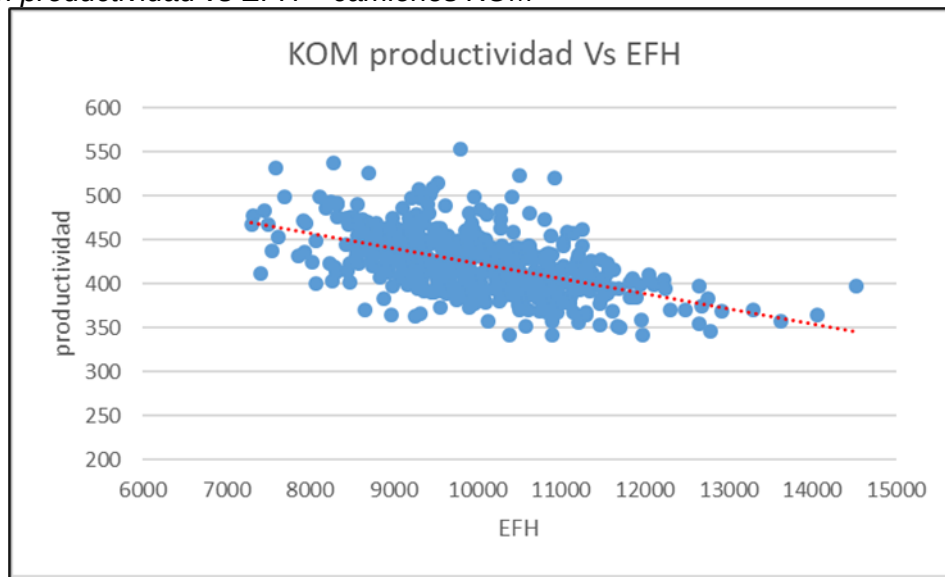
Relación productividad vs t.Ciclo – camiones CAT



Fuente: Elaboración propia

Figura 55

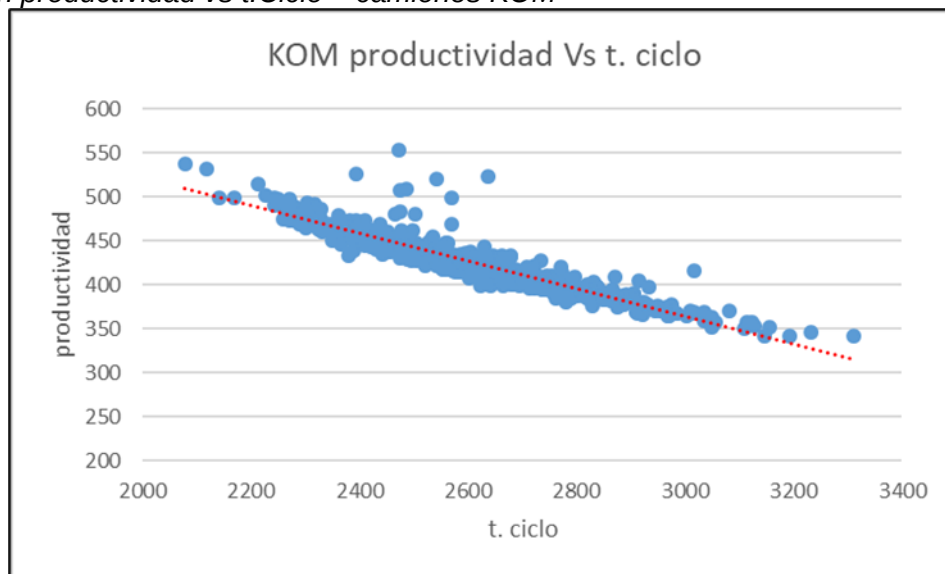
Relación productividad vs EFH – camiones KOM



Fuente: Elaboración propia

Figura 56

Relación productividad vs t.Ciclo – camiones KOM



Fuente: Elaboración propia

Se identificaron dos variables clave que tienen un impacto determinante y directo en el rendimiento de los camiones: la distancia horizontal equivalente (EFH) y el tiempo de ciclo. Estas variables explican de forma contundente las variaciones en productividad, ya que condicionan el tiempo total empleado por cada unidad para completar una operación de acarreo y retorno, lo cual influye directamente en la cantidad de material transportado por hora.

3.2.2.1 Modelo de productividad de camiones CAT. Tenemos la siguiente relación entre productividad, EFH y t.Ciclo:

$$\text{Productividad} = A_0 + A_1 \cdot \text{EFH} + A_2 \cdot \text{t. Ciclo} + \mu$$

Definimos la matriz $X = [X_1(\text{EFH}); X_2(\text{t. Ciclo})]$ y la matriz $Y = [Y(\text{productividad})]$

Realizando regresión lineal por mínimos cuadrados, obtenemos las siguientes matrices.

Tabla 23

Regresión lineal – Productividad vs (EFH & t.Ciclo) – camiones CAT

Xt	1	1	1	1
	9551.981308	10969.9434	9896.148936	9570.681159
	2660.714286	2506.09375	2423.107843	2683.52381
Xt .X	519	4752135.824	1385676.293	
	4752135.824	46608755999	13192850027	
	1385676.293	13192850027	3815848732	
Xt. X ⁻¹	0.06989304	2.71409E-06	-3.47644E-05	
	2.71409E-06	1.10939E-09	-4.82117E-09	
	-3.47644E-05	-4.82117E-09	2.95549E-08	
Xt. Y	172248.957			
	1506655982			
	444800025.7			
Ao	664.9947809		Y	Productividad
A1	-0.005489406		X1	EFH
A2	-0.105938834		X2	t. Ciclo

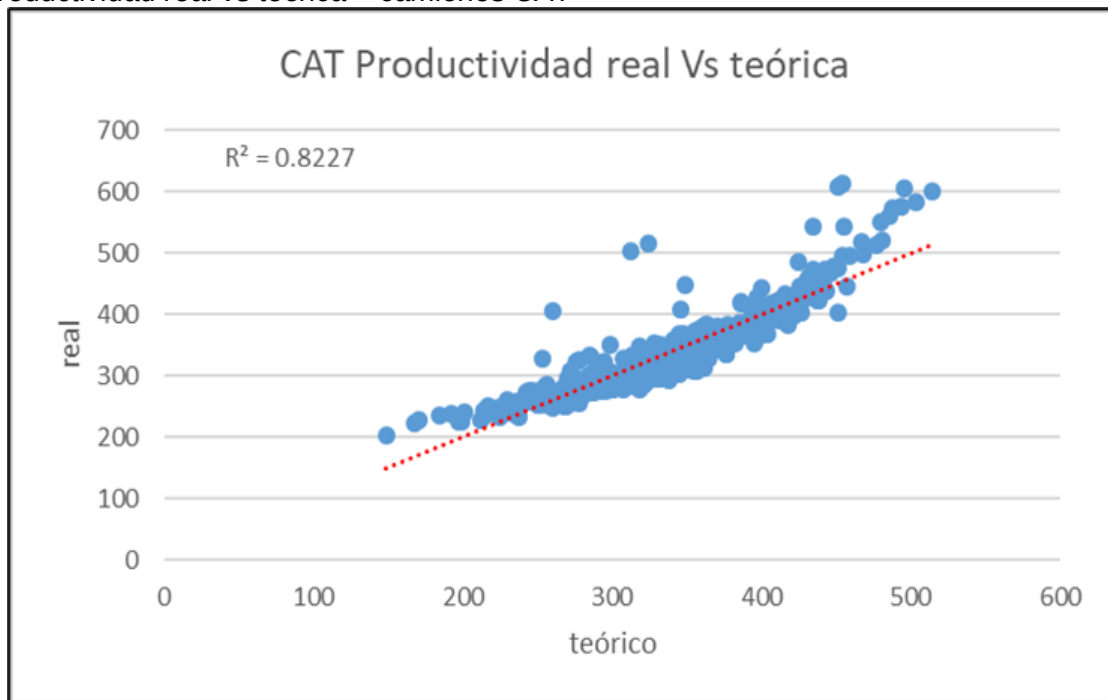
Fuente: Elaboración propia

Reemplazando los coeficientes, se obtiene el modelo de productividad.

$$\text{Productividad} = 664.9948 - 0.00549 \cdot \text{EFH} - 0.10594 \cdot \text{t. ciclo}$$

Figura 57

Productividad real vs teórica – camiones CAT



Fuente: Elaboración propia

Para poder visualizar el comportamiento de la productividad de camiones CAT, se evaluara valores de EFH y t.Ciclo en la ecuación obtenida anteriormente.

Tabla 24

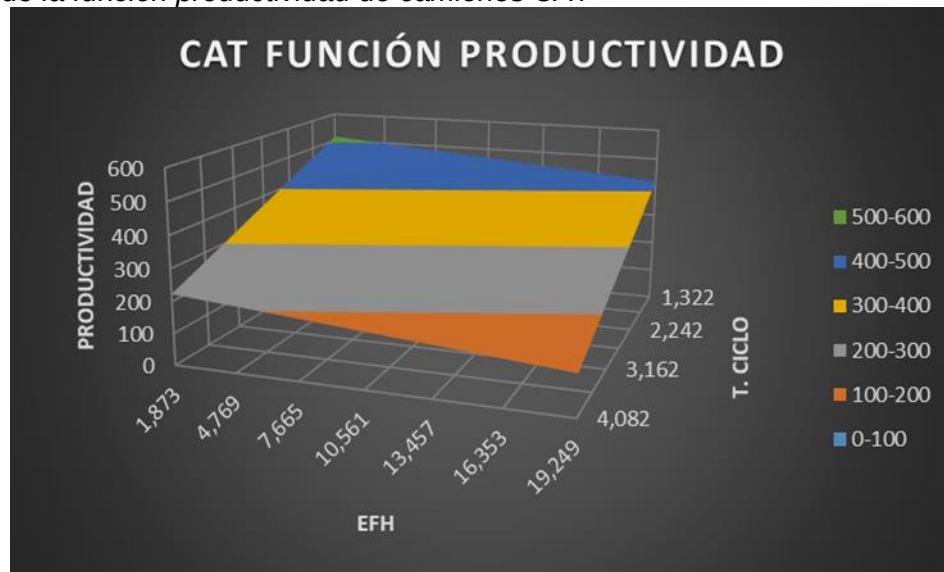
Evolución de productividad en camiones CAT

EFH / t.Ciclo	4,082	3,622	3,162	2,702	2,242	1,782	1,322
1,873	222	271	320	368	417	466	515
4,769	206	255	304	353	401	450	499
7,665	190	239	288	337	385	434	483
10,561	175	223	272	321	370	418	467
13,457	159	207	256	305	354	402	451
16,353	143	192	240	289	338	386	435
19,249	127	176	224	273	322	371	419

Fuente: Elaboración propia

Figura 58

Grafica de la función productividad de camiones CAT



Fuente: Elaboración propia

También se presenta las siguiente relaciones entre t.Ciclo, velocidad y EFH:

$$t. ciclo = A_0 + A_1 \cdot \text{velocidad} + A_2 \cdot \text{EFH}$$

Definimos la matriz $X = [X_1(\text{velocidad}); X_2(\text{EFH})]$ y la matriz $Y = [Y(t. Ciclo)]$

Realizando regresión lineal por mínimos cuadrados, obtenemos las siguientes matrices.

Tabla 25

Regresión lineal – t.Ciclo vs (velocidad & EFH) – camiones CAT

Xt	1	1	1	1
	22.46076256	20.17602511	20.2215381	19.70260795
	9551.981308	10969.9434	9896.148936	9570.681159
Xt .X	519	9842.003985	4752135.824	
	9842.003985	188273.7471	90964895.07	
	4752135.824	90964895.07	46608755999	
Xt. X ⁻¹	0.22192328	-0.011724073	2.54662E-07	
	-0.011724073	0.000712483	-1.95168E-07	
	2.54662E-07	-1.95168E-07	3.76394E-10	
Xt. Y	1385676.293			
	26354617.17			
	13192850027			
A ₀	1890.096394		Y	t. Ciclo
A ₁	-43.38022044		X ₁	velocidad
A ₂	0.175008585		X ₂	EFH

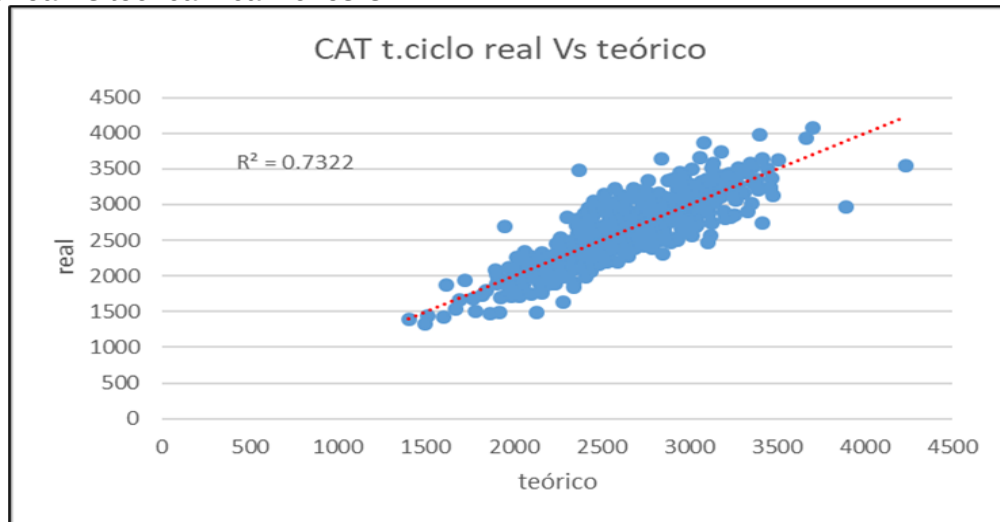
Fuente: Elaboración propia

Reemplazando los coeficientes, se obtiene el modelo de t.Ciclo.

$$t. \text{ ciclo} = 1752.542 - 34.804 \cdot \text{velocidad} + 0.17318 \cdot \text{EFH}$$

Figura 59

t.Ciclo real vs teórica – camiones CAT



Fuente: Elaboración propia

3.2.2.2 Modelo de productividad de camiones KOM. Tenemos la siguiente

relación entre productividad, EFH y t.Ciclo:

$$\text{Productividad} = A_0 + A_1 \cdot \text{EFH} + A_2 \cdot t. \text{ Ciclo} + \mu$$

Definimos la matriz $X = [X_1(\text{EFH}); X_2(t. \text{ Ciclo})]$ y la matriz $Y = [Y(\text{productividad})]$.

Realizando regresión lineal por mínimos cuadrados, obtenemos las siguientes matrices.

Tabla 26

Regresión lineal – Productividad vs (EFH & t.Ciclo) – camiones KOM

Xt	1	1	1	1
	11222.67635	10428.25643	11245.23635	10034.84781
	2777.318126	2437.861616	2460.103486	2287.407021
Xt .X	518	5177187.159	1359423.642	
	5177187.159	52342347329	13653465812	
	1359423.642	13653465812	3589068743	
Xt. X ⁻¹	0.331842671	-4.6992E-06	-0.000107815	
	-4.6992E-06	2.55351E-09	-7.9341E-09	
	-0.000107815	-7.9341E-09	7.12981E-08	
Xt. Y	219168.2742			
	2180195752			
	571798580.7			
Ao	835.9114913		Y	productividad
A1	0.000524572		X1	EFH
A2	-0.159295219		X2	t. Ciclo

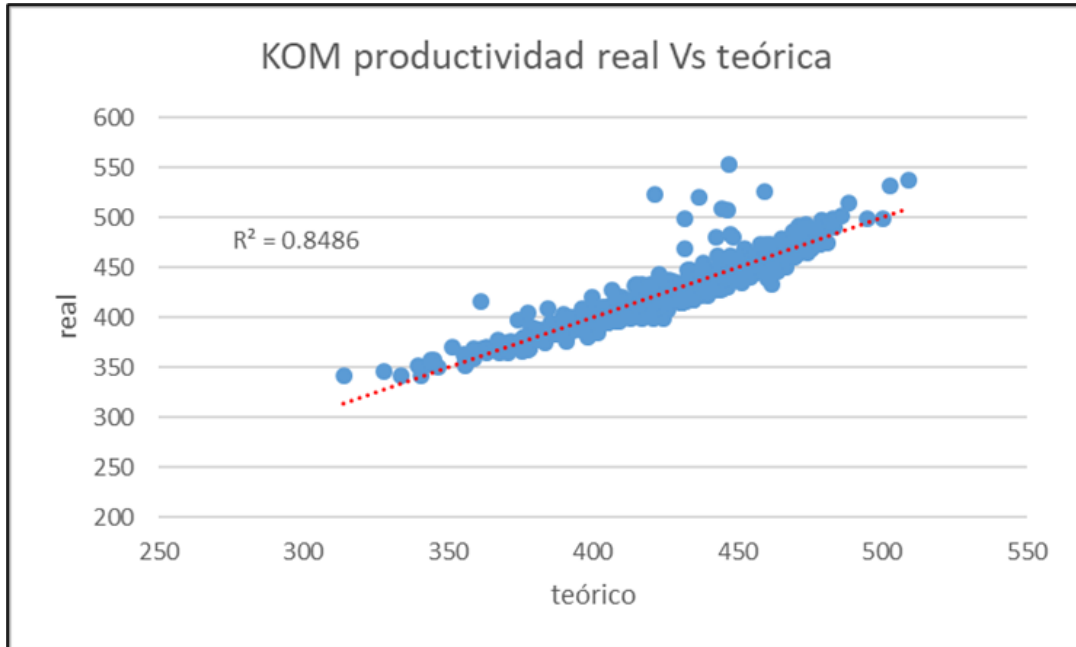
Fuente: Elaboración propia

Reemplazando los coeficientes, se obtiene el modelo de productividad.

$$\text{Productividad} = 835.9115 + 0.000525 \cdot \text{EFH} - 0.1593 \cdot \text{t. ciclo}$$

Figura 60

Productividad real vs teórica – camiones KOM



Fuente: Elaboración propia

Para poder visualizar el comportamiento de la productividad de camiones CAT, se evaluara valores de EFH y t.Ciclo en la ecuación obtenida anteriormente.

Tabla 27

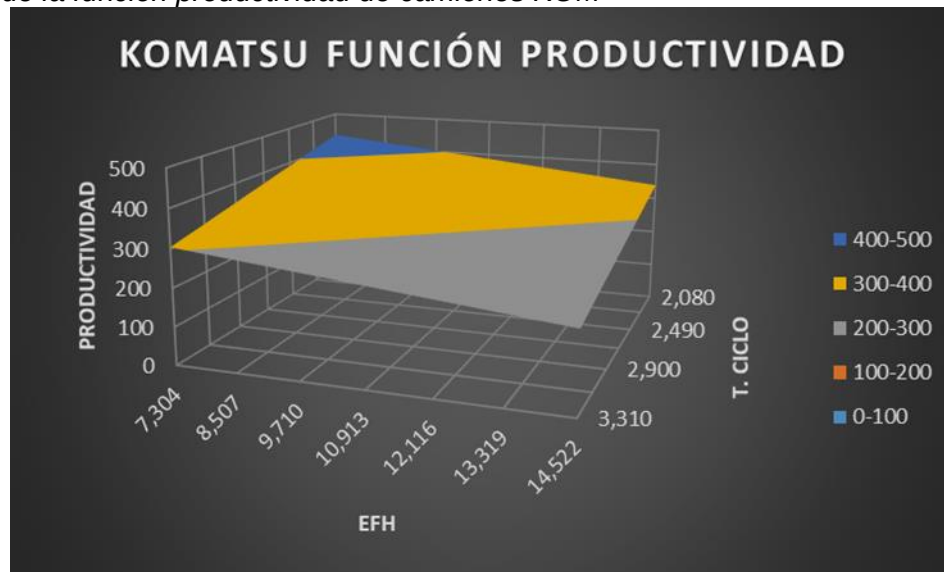
Evolución de productividad en camiones KOM

EFH / t.Ciclo	3,310	3,105	2,900	2,695	2,490	2,285	2,080
7,304	304	326	347	369	391	413	434
8,507	288	310	332	353	375	397	418
9,710	272	294	316	337	359	381	403
10,913	256	278	300	322	343	365	387
12,116	240	262	284	306	327	349	371
13,319	225	246	268	290	311	333	355
14,522	209	230	252	274	296	317	339

Fuente: Elaboración propia

Figura 61

Grafica de la función productividad de camiones KOM



Fuente: Elaboración propia

También se presenta las siguiente relaciones entre t.Ciclo, velocidad y EFH:

$$t. ciclo = A_0 + A_1 \cdot \text{velocidad} + A_2 \cdot \text{EFH}$$

Definimos la matriz $X = [X_1(\text{velocidad}); X_2(\text{EFH})]$ y la matriz $Y = [Y(t. Ciclo)]$.

Realizando regresión lineal por mínimos cuadrados, obtenemos las siguientes matrices.

Tabla 28

Regresión lineal – t.Ciclo vs (velocidad & EFH) – camiones KOM

Xt	1	1	1	1
	22.12742187	20.39345516	21.10759705	20.42153141
	11222.67635	10428.25643	11245.23635	10034.84781
Xt .X	518	10299.28093	5177187.159	
	10299.28093	205977.3275	103171450	
	5177187.159	103171450	52342347329	
Xt. X ⁻¹	0.399078037	-0.014422275	-1.10453E-05	
	-0.014422275	0.000903299	-3.53974E-07	
	-1.10453E-05	-3.53974E-07	1.80931E-09	
Xt. Y	1359423.642			
	27007642.68			
	13653465812			
A ₀	2198.433248		Y	t. Ciclo
A ₁	-42.98228634		X ₁	velocidad
A ₂	0.128123987		X ₂	EFH

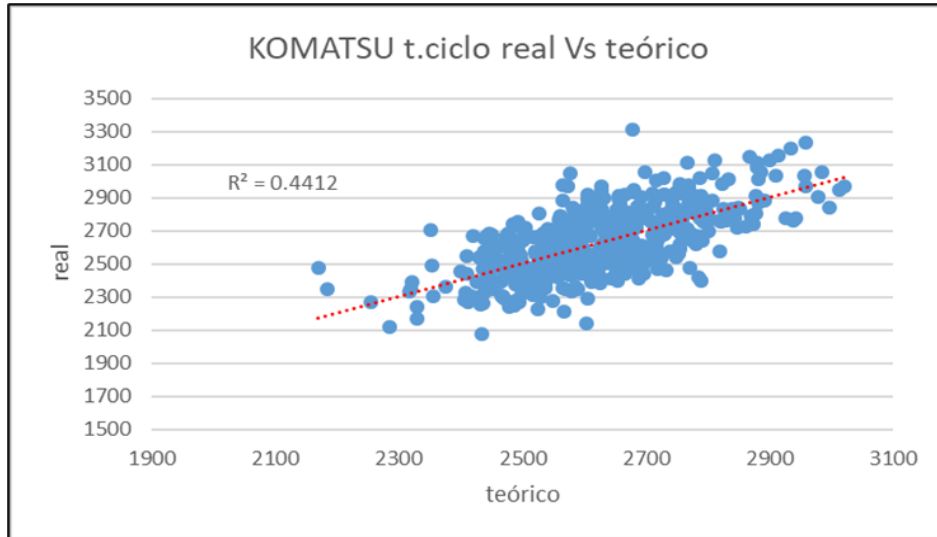
Fuente: Elaboración propia

Reemplazando los coeficientes, se obtiene el modelo de t.Ciclo.

$$t. \text{ ciclo} = 2198.433 - 42.9823 \cdot \text{velocidad} + 0.128124 \cdot \text{EFH}$$

Figura 62

t.Ciclo real vs teórica – camiones KOM

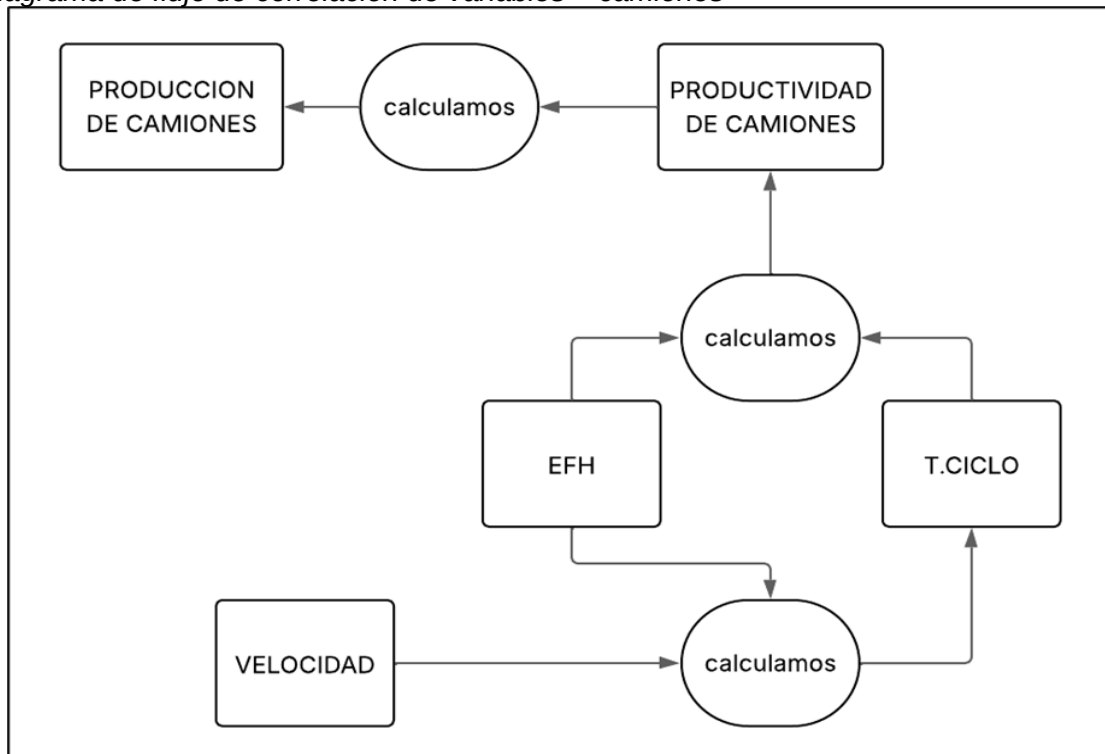


Fuente: Elaboración propia

En la siguiente figura se muestra un diagrama de flujo donde se visualiza la relación entre las variables mostradas para determinar el modelo de productividad de los camiones.

Figura 63

Diagrama de flujo de correlación de variables – camiones



Fuente: Elaboración propia

3.2.2.3 Simulación de producción (EFH constante y velocidad variable).

Usando las funciones obtenidas de productividad (EFH y t.Ciclo) y t.Ciclo (velocidad y EFH). Se determina los valores que tendría la productividad conforme se varían los valores de velocidad. Para mostrar un caso práctico, se usaran EFH de 9,000 metros, tenemos. La producción se obtiene del producto de productividad, disponibilidad, utilización y cantidad de camiones disponibles.

Tabla 29

Simulación de producción (EFH constante) – camiones CAT

SIMULACION VEL CAT DM0.85 UTIL0.82			n HTs	25
velocidad	t.Ciclo	EFH	Productividad	Producción
15	2,814	9,000	317	66,374
16	2,771	9,000	322	67,335
17	2,728	9,000	327	68,296
18	2,684	9,000	331	69,257
19	2,641	9,000	336	70,218
20	2,598	9,000	340	71,179
21	2,554	9,000	345	72,140
22	2,511	9,000	350	73,101
23	2,467	9,000	354	74,062
24	2,424	9,000	359	75,023
25	2,381	9,000	363	75,984

Fuente: Elaboración propia

Tabla 30

Simulación de producción (EFH constante) – camiones KOM

SIMULACION VEL CAT DM0.89 UTIL0.82			n HTs	92
velocidad	t.Ciclo	EFH	Productividad	Producción
15	2,707	9,000	409	329,894
16	2,664	9,000	416	335,410
17	2,621	9,000	423	340,927
18	2,578	9,000	430	346,443
19	2,535	9,000	437	351,960
20	2,492	9,000	444	357,476
21	2,449	9,000	451	362,993
22	2,406	9,000	457	368,509
23	2,363	9,000	464	374,026
24	2,320	9,000	471	379,542
25	2,277	9,000	478	385,059

Fuente: Elaboración propia

En la siguiente tabla se muestra la producción total de la flota completa de camiones, además se calcula la variación de producción por hora.

Tabla 31

Variación de producción por incremento de velocidad

Velocidad	Producción	Δ Producción	Δ Producción / hr
15	396,268	6,477	540
16	402,745	12,955	1,080
17	409,223	19,432	1,619
18	415,700	25,910	2,159
19	422,178	32,387	2,699
20	428,655	38,865	3,239
21	435,133	45,342	3,779
22	441,610	51,820	4,318
23	448,088	58,297	4,858
24	454,565	64,775	5,398
25	461,043		

Fuente: Elaboración propia

Figura 64

Simulación de producción vs velocidad



Fuente: Elaboración propia

Para una distancia horizontal equivalente (EFH) constante de 9 km, se observa que la producción total del turno aumenta en aproximadamente 6,477 toneladas por cada incremento de 1 km/h en la velocidad promedio de los camiones. Esta relación evidencia

que, a mayor velocidad operativa, se logra una reducción significativa en los tiempos de ciclo, lo que se traduce en un incremento notable de la producción total.

3.2.2.4 Simulación de producción (EFH variable y velocidad constante).

Usando las funciones obtenidas de productividad (EFH y t.Ciclo) y t.Ciclo (velocidad y EFH). Se determina los valores que tendría la productividad conforme se varían los valores de velocidad. Para mostrar un caso práctico, se usaran una velocidad de 20 km/h, tenemos. La producción se obtiene del producto de productividad, disponibilidad, utilización y cantidad de camiones disponibles.

Tabla 32

Simulación de producción (velocidad constante) – camiones CAT

SIMULACION VEL CAT DM0.85 UTIL0.82			n HTs	25
velocidad	t.Ciclo	EFH	Productividad	Producción
20	2,248	7,000	388	81,228
20	2,335	7,500	376	78,716
20	2,423	8,000	364	76,204
20	2,510	8,500	352	73,691
20	2,598	9,000	340	71,179
20	2,685	9,500	328	68,667
20	2,773	10,000	316	66,154
20	2,860	10,500	304	63,642
20	2,948	11,000	292	61,130
20	3,035	11,500	280	58,618
20	3,123	12,000	268	56,105

Fuente: Elaboración propia

Tabla 33

Simulación de producción (velocidad constante) – camiones KOM

SIMULACION VEL CAT DM0.89 UTIL0.82			n HTs	92
velocidad	t.Ciclo	EFH	Productividad	Producción
20	2,236	7,000	483	389,519
20	2,300	7,500	474	381,508
20	2,364	8,000	464	373,497
20	2,428	8,500	454	365,487
20	2,492	9,000	444	357,476
20	2,556	9,500	434	349,465
20	2,620	10,000	424	341,455
20	2,684	10,500	414	333,444
20	2,748	11,000	404	325,434
20	2,812	11,500	394	317,423
20	2,876	12,000	384	309,412

Fuente: Elaboración propia

En la siguiente tabla se muestra la producción total de la flota completa de camiones, además se calcula la variación de producción por hora.

Tabla 34

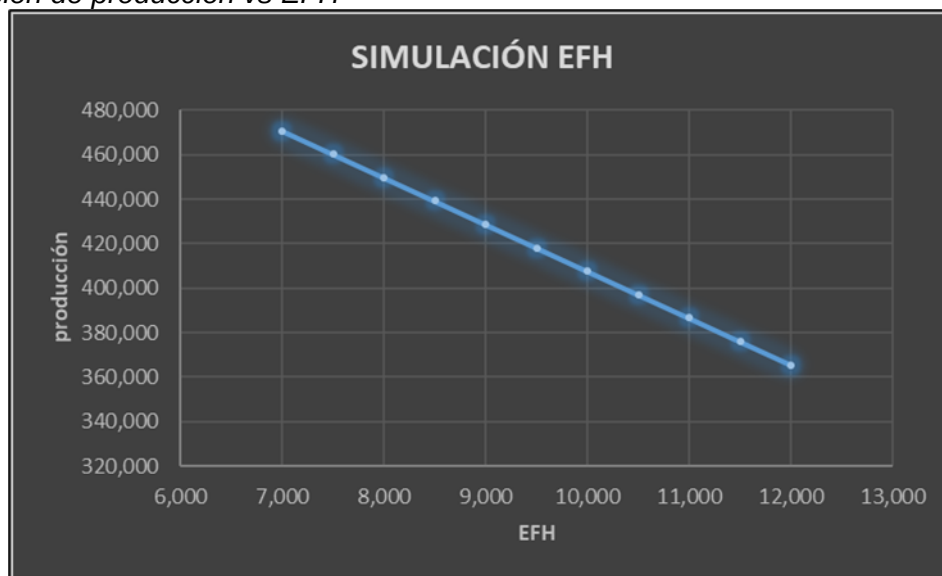
Variación de producción por incremento de EFH

EFH	Producción	Δ Producción	Δ Producción / hr
7,000	470,747	-10,523	-877
7,500	460,224	-21,046	-1,754
8,000	449,701	-31,569	-2,631
8,500	439,178	-42,092	-3,508
9,000	428,655	-52,615	-4,385
9,500	418,132	-63,138	-5,261
10,000	407,609	-73,661	-6,138
10,500	397,086	-84,184	-7,015
11,000	386,563	-94,707	-7,892
11,500	376,040	-105,229	-8,769
12,000	365,517		

Fuente: Elaboración propia

Figura 65

Simulación de producción vs EFH



Fuente: Elaboración propia

Para una velocidad constante de 20 km/h, se evidencia que la producción total del turno disminuye en aproximadamente 21,046 toneladas por cada incremento de 1 kilómetro en la distancia horizontal equivalente (EFH). Este comportamiento refleja el efecto directo que tiene el aumento de la distancia de acarreo sobre los tiempos de ciclo,

generando una menor cantidad de viajes por turno y, en consecuencia, una reducción significativa en la producción.

3.2.3 Modelamiento de variación de productividad de equipos

Para este caso, se tiene en consideración que la variación de productividad de los camiones depende del Queue, mientras que la variación de productividad de las palas depende del Hang, por lo tanto tenemos los siguientes modelos:

3.2.3.1 Modelo de variación de productividad de camiones CAT. Tenemos la siguiente relación entre Δ productividad y Queue:

$$\Delta\text{Productividad} = A_0 + A_1 \cdot \text{queue}$$

Definimos la matriz $X = [X(\text{Queue})]$ y la matriz $Y = [Y(\Delta\text{productividad})]$. Realizando regresión lineal por mínimos cuadrados, obtenemos las siguientes matrices.

Tabla 35

Regresión lineal – Δ Productividad vs Queue – camiones CAT

Xt	1	1	1	1
	0.086237645	0.05714693	0.059066271	0.056873101
Xt .X	519	38.03862209		
	38.03862209	3.08752432		
Xt. X ⁻¹	0.019856949	-0.24463969		
	-0.24463969	3.33787062		
Xt. Y	14344.68398			
	1227.455321			
Ao	-15.4426259		Y	Δ Productividad
A1	587.8080118		X1	Queue

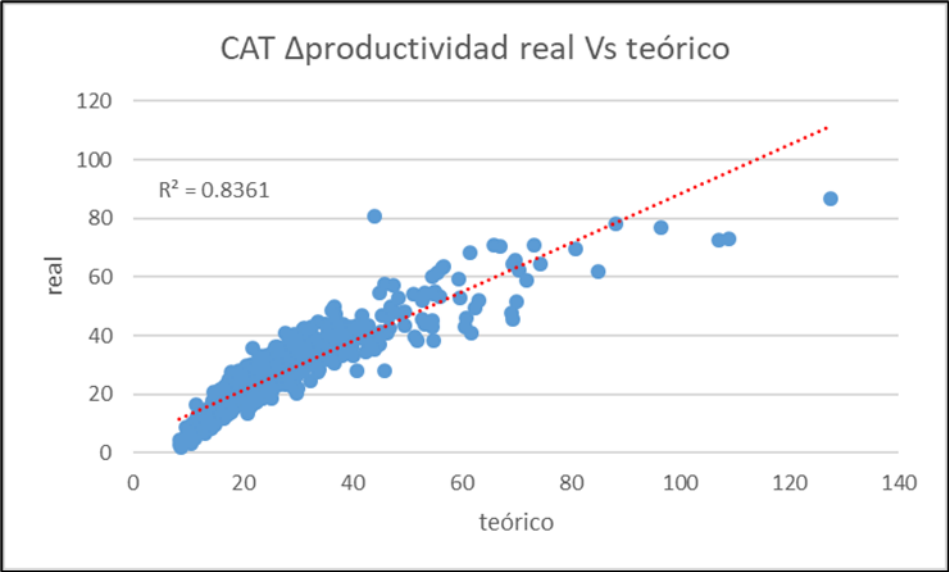
Fuente: Elaboración propia

Reemplazando los coeficientes, se obtiene el modelo de productividad.

$$\Delta\text{Productividad} = -15.4426 + 587.808 \cdot \text{queue}$$

Figura 66

ΔProductividad real vs teórica – camiones CAT



Fuente: Elaboración propia

3.2.3.2 Modelo de variación de productividad de camiones KOM. Tenemos la siguiente relación entre Δproductividad y Queue:

$$\Delta\text{Productividad} = A_0 + A_1 \cdot \text{queue}$$

Definimos la matriz $X = [X(\text{Queue})]$ y la matriz $Y = [Y(\Delta\text{productividad})]$. Realizando regresión lineal por mínimos cuadrados, obtenemos las siguientes matrices.

Tabla 36

Regresión lineal – ΔProductividad vs Queue – camiones KOM

Xt	1	1	1	1
	0.080938121	0.060012631	0.057248892	0.064020242
Xt .X	518	37.16829469		
	37.16829469	2.827213091		
Xt. X^-1	0.034056961	-0.447733905		
	-0.447733905	6.239892485		
Xt. Y	17075.22451			
	1307.760589			
Ao	-3.998502676		Y	ΔProductividad
A1	515.1285271		X1	Queue

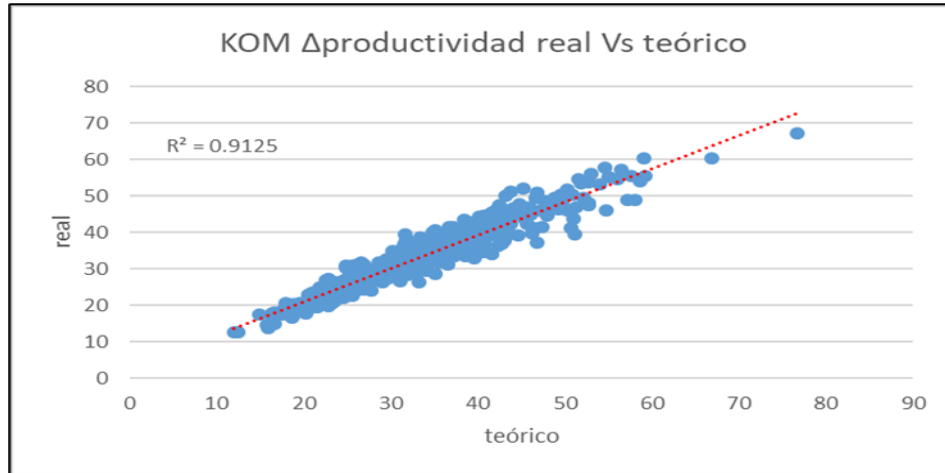
Fuente: Elaboración propia

Reemplazando los coeficientes, se obtiene el modelo de productividad.

$$\Delta\text{Productividad} = -3.9985 + 515.1285 \cdot \text{queue}$$

Figura 67

ΔProductividad real vs teórica – camiones KOM



Fuente: Elaboración propia

3.2.3.3 Modelo de variación de productividad de palas P&H. Tenemos la siguiente relación entre Δproductividad y Hang:

$$\Delta\text{Productividad} = A_0 + A_1 \cdot \text{hang}$$

Definimos la matriz $X = [X(\text{Hang})]$ y la matriz $Y = [Y(\Delta\text{productividad})]$. Realizando regresión lineal por mínimos cuadrados, obtenemos las siguientes matrices.

Tabla 37

Regresión lineal – ΔProductividad vs Hang – palas P&H

Xt	1	1	1	1
	0.34350797	0.09340042	0.45508055	0.11338128
Xt.X	3397	837.62619		
	837.62619	250.139304		
Xt.X^-1	0.00168893	-0.0056556		
	-0.0056556	0.02293634		
Xt.Y	6062546.61			
	1783980.87			
Ao	149.704643		Y	ΔProductividad
A1	6630.64265		X1	Hang

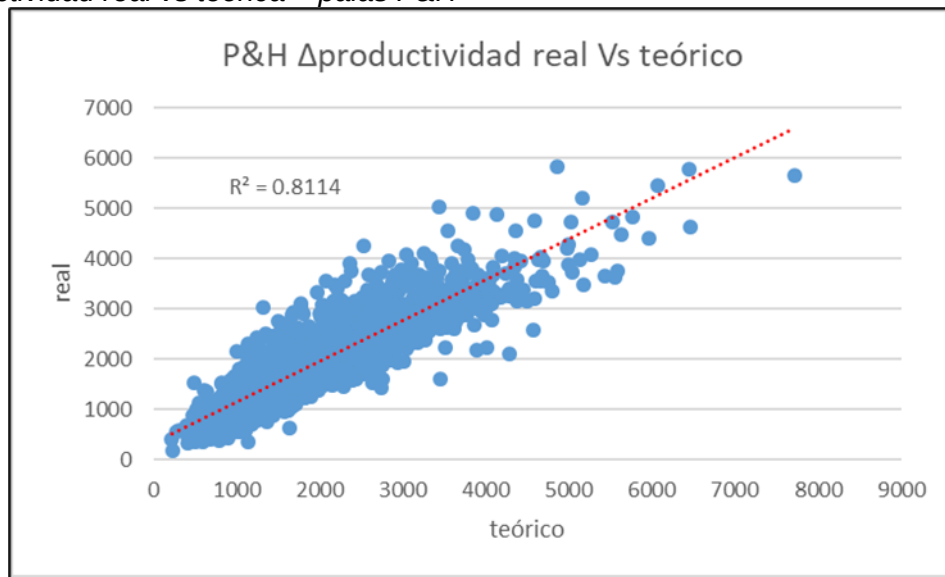
Fuente: Elaboración propia

Reemplazando los coeficientes, se obtiene el modelo de productividad.

$$\Delta\text{Productividad} = 149.7046 + 6630.643 \cdot \text{hang}$$

Figura 68

ΔProductividad real vs teórica – palas P&H



Fuente: Elaboración propia

3.2.3.4 Modelo de variación de productividad de palas HITACHI. Tenemos la siguiente relación entre Δproductividad y Hang:

$$\Delta\text{Productividad} = A_0 + A_1 \cdot \text{hang}$$

Definimos la matriz $X = [X(\text{Hang})]$ y la matriz $Y = [Y(\Delta\text{productividad})]$. Realizando regresión lineal por mínimos cuadrados, obtenemos las siguientes matrices.

Tabla 38

Regresión lineal – ΔProductividad vs Hang – palas HITACHI

Xt	1	1	1	1
	0.52538535	0.23154565	0.17813597	0.19140881
Xt .X	1868	598.523314		
	598.523314	228.48033		
Xt. X ⁻¹	0.00333202	-0.00872851		
	-0.00872851	0.0272418		
Xt. Y	2250782			
	840471.588			
Ao	163.590427		Y	ΔProductividad
A1	3249.9905		X1	Hang

Fuente: Elaboración propia

Reemplazando los coeficientes, se obtiene el modelo de productividad.

$$\Delta\text{Productividad} = 163.5904 + 3249.991 \cdot \text{hang}$$

Δ Productividad real vs teórica – palas HITACHI

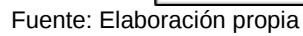


Figura 70

```
graph TD; Q[QUEUE] --> C1((calculamos)); C1 --> H[HANG]; H --> C2((calculamos)); C2 --> VP[VARIACION DE PRODUCTIVIDAD DE PALAS]; VP --> C3((calculamos)); C3 --> VPP[VARIACION DE PRODUCCION DE PALAS]; VPP --> C4((calculamos)); C4 --> VPC[VARIACION DE PRODUCTIVIDAD DE CAMIONES]; VPC --> C5((calculamos)); C5 --> VPCam[VARIACION DE PRODUCCION DE CAMIONES];
```

Diagrama de flujo de la construcción de variables para la variación de productividad de palas y camiones:

- Se comienza con el nodo **QUEUE** (rectángulo).
- Se calcula (**calculamos**, óvalo) el valor de **HANG** (rectángulo).
- Se calcula (**calculamos**, óvalo) la **VARIACION DE PRODUCTIVIDAD DE PALAS** (rectángulo).
- Se calcula (**calculamos**, óvalo) la **VARIACION DE PRODUCCION DE PALAS** (rectángulo).
- Se calcula (**calculamos**, óvalo) la **VARIACION DE PRODUCTIVIDAD DE CAMIONES** (rectángulo).
- Se calcula (**calculamos**, óvalo) la **VARIACION DE PRODUCCION DE CAMIONES** (rectángulo).

81

Capítulo IV. Análisis e interpretación de resultados

4.1 Análisis de resultados

4.1.1 Evaluación de productividad y producción

Para esta evaluación, se considerará como costo de oportunidad el costo en US\$/ton asociado a tener un equipo inactivo, es decir, el impacto económico por pérdida de producción debido a tiempos improductivos en la operación. Este enfoque permite cuantificar el efecto real de las ineficiencias operativas dentro del sistema pala-camión.

Además, se integrarán parámetros operacionales clave como el DigRate (tasa efectiva de excavación), la disponibilidad mecánica y la utilización operativa de los equipos involucrados, los cuales determinan la capacidad real del sistema. Estos valores se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 39

Parámetros operativos para evaluación de productividad de equipos

PALAS P&H	DM	90%	UTIL	83%	DIGRATE	16,000	n SH	7	\$/ton SH	90
PALAS HITACHI	DM	90%	UTIL	78%	DIGRATE	6,000	n SH	4	\$/ton SH	40
CAMIONES KOM	DM	89%	UTIL	82.6%	n HTs	92	hrs turno	12	\$/ton HT	160
CAMIONES CAT	DM	85%	UTIL	82%	n HTs	25	horas	1	\$/ton HT	140

Fuente: Elaboración propia

Utilizando las funciones obtenidas de los modelamientos mostrados en el capítulo anterior, obtenemos las siguientes tablas. El indicador que se variara será el Queue, valor del cual se obtienen los demás indicadores, tenemos:

Tabla 40

Evolución de productividad y producción (sistema P&H – CAT – KOM)

Queue	t. Queue	Hang	t. Hang	productividad	producción	Δproducción - Queue	Δproducción	US\$ Queue	Δproducción - Hang	Δproducción	US\$ Hang
4%	1.8	33%	1.39	5,320	333,824	15	1,257	196,027	2,355	12,312	1,108,111
5%	2.2	29%	1.13	5,559	348,797	20	1,709	266,397	2,096	10,962	986,604
6%	2.7	26%	0.96	5,754	361,030	25	2,160	336,766	1,885	9,859	887,325
7%	3.1	23%	0.83	5,918	371,373	31	2,611	407,135	1,707	8,927	803,385
8%	3.5	21%	0.73	6,061	380,332	36	3,063	477,505	1,553	8,119	730,674
9%	4.0	19%	0.66	6,187	388,235	41	3,514	547,874	1,416	7,406	666,538
10%	4.4	17%	0.60	6,300	395,305	47	3,966	618,243	1,294	6,769	609,166
11%	4.8	16%	0.55	6,402	401,700	52	4,417	688,613	1,184	6,192	557,267
12%	5.3	14%	0.50	6,495	407,538	57	4,868	758,982	1,083	5,665	509,887
13%	5.7	13%	0.47	6,580	412,908	63	5,320	829,351	991	5,181	466,302
14%	6.1	11%	0.44	6,660	417,881	68	5,771	899,721	905	4,733	425,948
15%	6.6	10%	0.41	6,733	422,510	73	6,222	970,090	825	4,315	388,380
16%	7.0	9%	0.39	6,802	426,840	78	6,674	1,040,459	751	3,925	353,237
17%	7.4	8%	0.37	6,867	430,908	84	7,125	1,110,829	680	3,558	320,225
18%	7.9	7%	0.35	6,928	434,743	89	7,577	1,181,198	614	3,212	289,101
19%	8.3	6%	0.33	6,986	438,371	94	8,028	1,251,567	552	2,885	259,660
20%	8.7	5%	0.31	7,041	441,813	100	8,479	1,321,937	492	2,575	231,729

Fuente: Elaboración propia

Tabla 41

Evolución de productividad y producción (sistema HITACHI – CAT – KOM)

Queue	t. Queue	Hang	t. Hang	productividad	producción	Δproducción - Queue	Δproducción	US\$ Queue	Δproducción - Hang	Δproducción	US\$ Hang
4%	1.8	36%	3.1	2,576	86,804	15	1,257	196,027	1,332	3,741	149,656
5%	2.2	33%	2.7	2,661	89,663	20	1,709	266,397	1,230	3,455	138,190
6%	2.7	30%	2.4	2,730	91,998	25	2,160	336,766	1,147	3,221	128,822
7%	3.1	28%	2.2	2,789	93,973	31	2,611	407,135	1,076	3,023	120,901
8%	3.6	26%	2.0	2,840	95,684	36	3,063	477,505	1,015	2,851	114,040
9%	4.0	25%	1.9	2,884	97,192	41	3,514	547,874	961	2,700	107,987
10%	4.5	23%	1.8	2,924	98,542	47	3,966	618,243	913	2,564	102,573
11%	4.9	22%	1.7	2,961	99,763	52	4,417	688,613	870	2,442	97,676
12%	5.3	20%	1.6	2,994	100,878	57	4,868	758,982	830	2,330	93,205
13%	5.8	19%	1.5	3,024	101,903	63	5,320	829,351	793	2,227	89,092
14%	6.2	18%	1.4	3,052	102,852	68	5,771	899,721	759	2,132	85,284
15%	6.7	17%	1.4	3,079	103,736	73	6,222	970,090	728	2,043	81,739
16%	7.1	16%	1.3	3,103	104,563	78	6,674	1,040,459	698	1,961	78,423
17%	7.6	16%	1.3	3,126	105,339	84	7,125	1,110,829	670	1,883	75,307
18%	8.0	15%	1.2	3,148	106,072	89	7,577	1,181,198	644	1,809	72,370
19%	8.5	14%	1.2	3,168	106,764	94	8,028	1,251,567	620	1,740	69,592
20%	8.9	13%	1.1	3,188	107,421	100	8,479	1,321,937	596	1,674	66,957

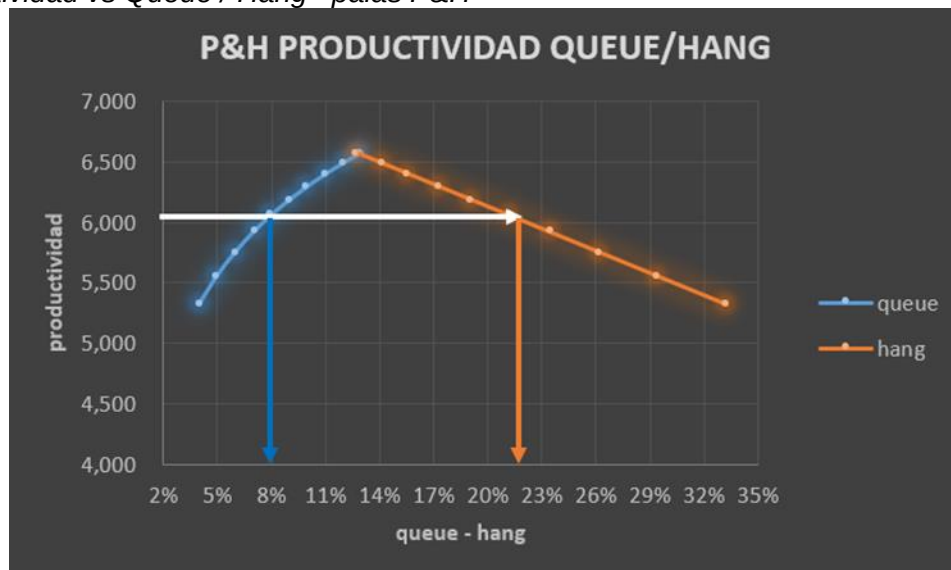
Fuente: Elaboración propia

Al generar una gráfica que muestre la variación de la productividad respecto a la variación de Queue / Hang y t.Queue / Hang, y proyectando la productividad esperada, se obtiene los valores de Queue y Hang requeridos para lograr dicho objetivo.

Para este análisis se tiene como productividad objetivo para las palas P&H 6,000 ton/hora y para las palas HITACHI 2,850 ton/hora. En las siguientes figuras se observa las proyecciones y determinación de parámetros.

Figura 71

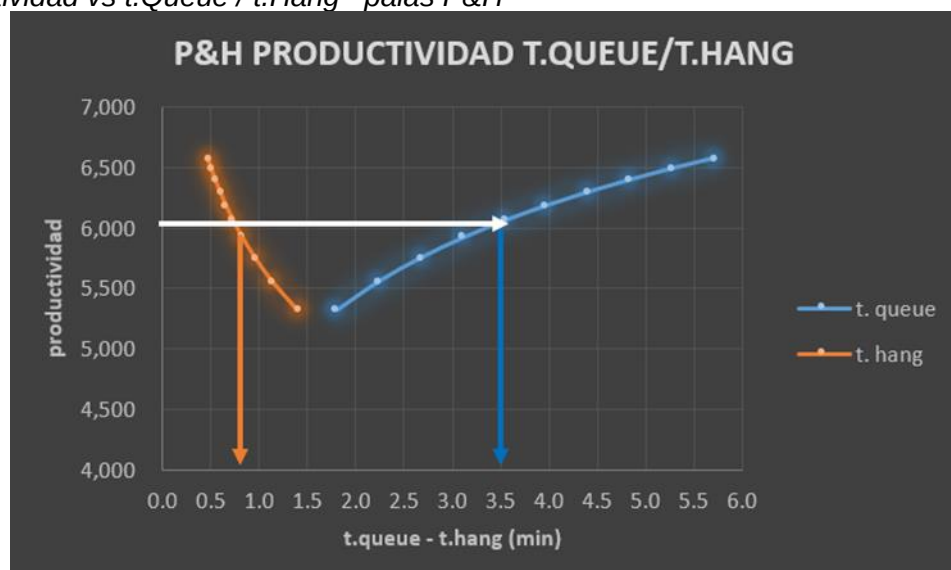
Productividad vs Queue / Hang– palas P&H



Fuente: Elaboración propia

Figura 72

Productividad vs t.Queue / t.Hang– palas P&H

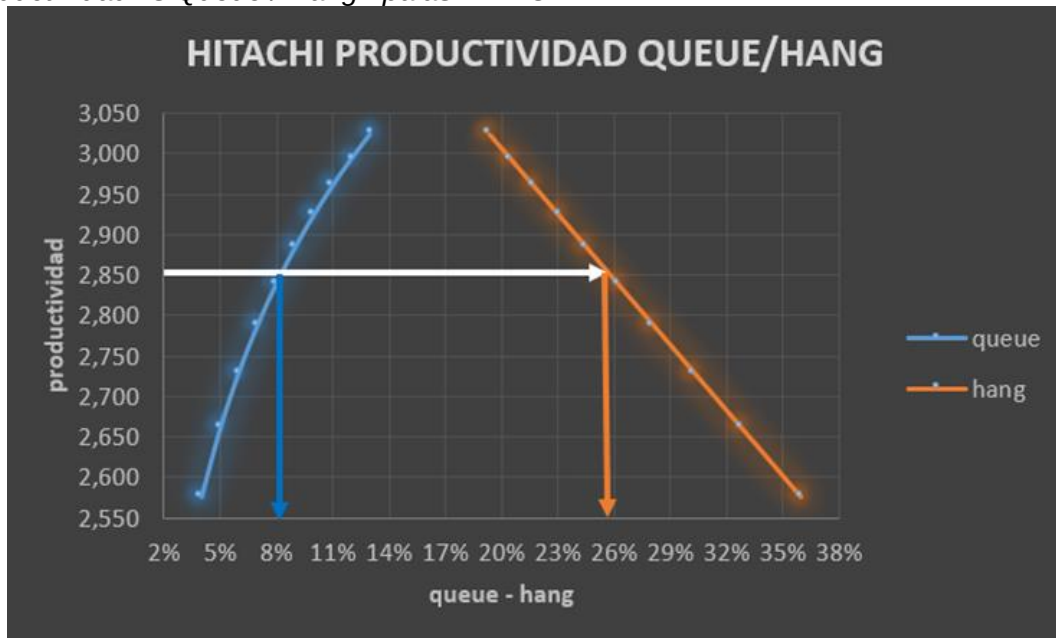


Fuente: Elaboración propia

En las figuras anteriores se determina que el Queue y Hang adecuado para lograr la productividad objetivo de 6,000 ton/hora son de 8% (3.5 min) y 21% (0.73 min).

Figura 73

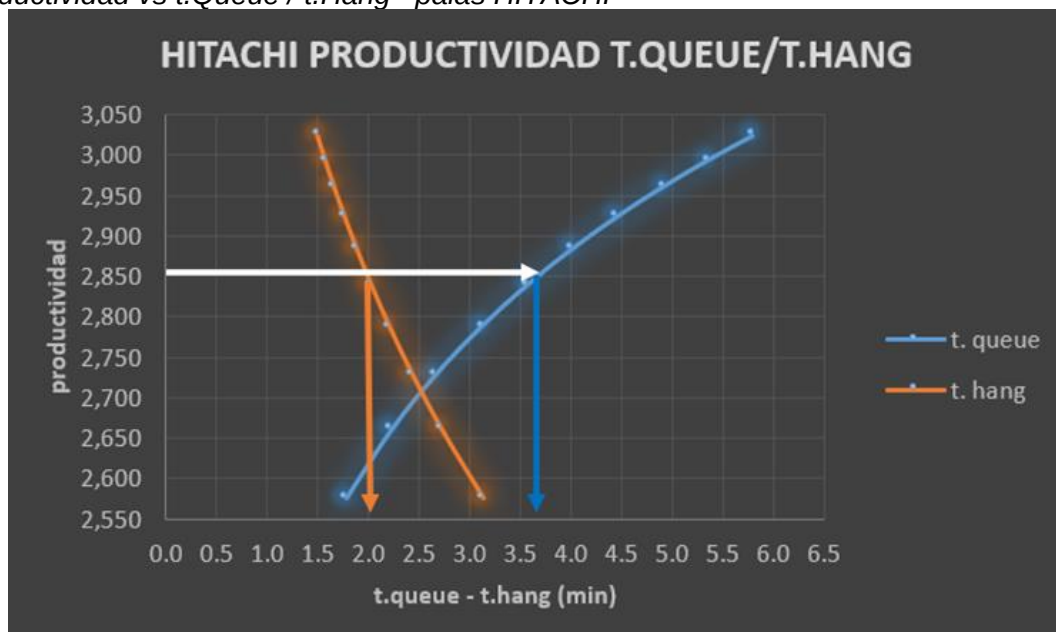
Productividad vs Queue / Hang– palas HITACHI



Fuente: Elaboración propia

Figura 74

Productividad vs t.Queue / t.Hang– palas HITACHI



Fuente: Elaboración propia

De igual manera para este caso, para lograr la productividad objetivo se requiere tener un Queue de 8% (3.6 min) y un Hang de 26% (2.0 min).

4.1.2 Evaluación de capacidad de carguío

En esta sección se evaluará cómo varían los indicadores Queue (tiempo de espera de camiones en pala) y Hang (tiempo de espera de la pala por falta de camiones) en función de la producción total del sistema. El objetivo principal es determinar cuál es el punto adecuado hasta el cual es conveniente permitir un incremento del Queue sin afectar negativamente la productividad, y hasta qué nivel es factible reducir el Hang para maximizar el rendimiento del equipo de carguío sin incurrir en una sobreasignación ineficiente de flota.

Para ello se toman los valores de Queue y Hang obtenidos en las tablas 40 y 41, y se compara con la producción obtenida de todas las palas P&H y HITACHI.

Tabla 42

Evolución de la producción variación de Queue y Hang

Queue	Producción	Hang
4%	420,629	33%
5%	438,459	29%
6%	453,028	26%
7%	465,346	23%
8%	476,016	21%
9%	485,428	19%
10%	493,847	17%
11%	501,463	16%
12%	508,415	14%
13%	514,811	13%

Fuente: Elaboración propia

Figura 75

Evaluación de capacidad de carguío



Fuente: Elaboración propia

Se evidencia que, al incrementar moderadamente el Queue, la producción total del turno mejora, al mantener la pala en operación continua. Del mismo modo, al reducir el Hang, se optimiza el tiempo de carguío, lo que también contribuye a un aumento significativo en la producción. Estos resultados reflejan la importancia de una asignación eficiente de flota para minimizar tiempos improductivos y maximizar el rendimiento.

4.1.3 Evaluación económica

El objetivo de esta evaluación es determinar los valores adecuados de Queue y Hang en los que se registran las menores pérdidas de producción y costos, considerando la limitación en la cantidad de equipos disponibles. El análisis busca identificar el punto de equilibrio donde la asignación de flota permite maximizar el rendimiento del sistema pala-camión sin incurrir en tiempos improductivos excesivos ni en sobredemanda de recursos.

Para ello se tomaran los valores de variación de producción y costos obtenidos en las tablas 40 y 41. Mediante graficas se buscara el punto que genere menor perdida de producción y costos.

Tabla 43

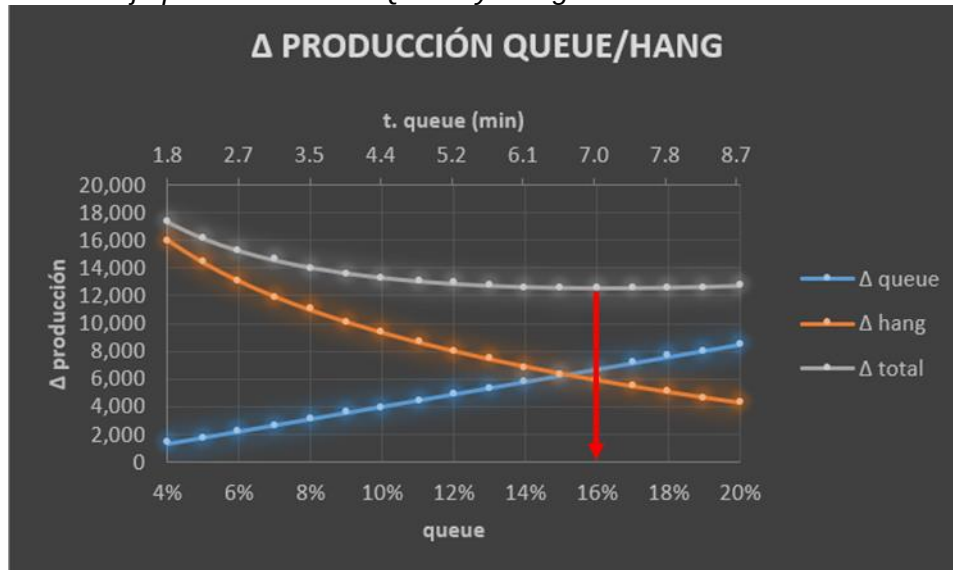
Evolución de la costos variación de Queue y Hang

Queue	Δ Queue	Δ Hang	Δ total	US\$ Queue	US\$ Hang	US\$ total
4%	1,257	16,054	17,311	196,027	1,257,768	1,453,795
5%	1,709	14,417	16,126	266,397	1,124,794	1,391,190
6%	2,160	13,080	15,240	336,766	1,016,146	1,352,912
7%	2,611	11,949	14,560	407,135	924,286	1,331,422
8%	3,063	10,970	14,032	477,505	844,713	1,322,218
9%	3,514	10,106	13,620	547,874	774,525	1,322,399
10%	3,966	9,333	13,298	618,243	711,740	1,329,983
11%	4,417	8,634	13,051	688,613	654,943	1,343,556
12%	4,868	7,996	12,864	758,982	603,092	1,362,074
13%	5,320	7,408	12,728	829,351	555,394	1,384,745
14%	5,771	6,865	12,636	899,721	511,232	1,410,953
15%	6,222	6,359	12,581	970,090	470,119	1,440,208
16%	6,674	5,885	12,559	1,040,459	431,659	1,472,119
17%	7,125	5,441	12,566	1,110,829	395,532	1,506,361
18%	7,577	5,021	12,598	1,181,198	361,471	1,542,669
19%	8,028	4,625	12,653	1,251,567	329,252	1,580,819
20%	8,479	4,249	12,728	1,321,937	298,686	1,620,622

Fuente: Elaboración propia

Figura 76

Perdida de tonelaje por variación de Queue y Hang



Fuente: Elaboración propia

Figura 77

Perdida de costos por variación de Queue y Hang



Fuente: Elaboración propia

A medida que el Queue se incrementa, tanto la pérdida de tonelaje como los costos asociados disminuyen progresivamente hasta alcanzar un punto mínimo, a partir del cual comienzan a aumentar nuevamente. Este comportamiento refleja la existencia de un punto de equilibrio en la asignación de camiones. Según el análisis, el valor adecuado de Queue se encuentra aproximadamente en un 8%, correspondiente al mínimo de la curva de pérdidas, donde se logra la mejor relación entre eficiencia operativa y uso de recursos.

Una vez obtenido el valor de Queue que genera menores perdidas de producción y costos, se calculara el beneficio económico que este genera respecto al valor de Queue que se tenía inicialmente. En este caso el t.Queue planificado inicial era de 2.1 minutos (5%), con las evaluaciones anteriores se determinó un Queue de 8% (3.5 min).

Tabla 44

Calculo de beneficio económico por cambio de Queue (5% - 8%)

Queue 5%-8%	Toneladas	US\$ beneficio
turno	37,557	68,972
día	75,113	137,945
1	2,253,397	4,138,344
2	4,506,794	8,276,687
3	6,760,191	12,415,031
4	9,013,588	16,553,374
5	11,266,984	20,691,718
6	13,520,381	24,830,061
7	15,773,778	28,968,405
8	18,027,175	33,106,748
9	20,280,572	37,245,092
10	22,533,969	41,383,435
11	24,787,366	45,521,779
12	27,040,763	49,660,122

Fuente: Elaboración propia

Figura 78

Beneficio económico acumulado por cambio de Queue



Fuente: Elaboración propia

El beneficio calculado para el Queue y Hang adecuado (Queue de 2.1 min a 3.5 min) sería de 27,040,763 toneladas al año, que representa US\$49,660,122 al año.

4.2 Validación de hipótesis

Esta sección tiene como objetivo contrastar la hipótesis planteada, para ello se plantea la hipótesis nula y alterna, tenemos:

H0: Un adecuado modelamiento de las indicadores operativos no permitirá incrementar la productividad de equipos de carguío y acarreo.

HA: Un adecuado modelamiento de las indicadores operativos permitirá incrementar la productividad de equipos de carguío y acarreo.

Para ello se evaluara los valores de productividad de palas P&H y HITACHI, obtenidos durante un mes de operación de la mina, luego de aplicar los modelos para cálculo de Queue y Hang adecuados. Para el caso de las palas P&H se cuenta con $n_1 = 360$ datos y para las palas HITACHI $n_2 = 240$ datos.

En la siguiente tabla se observa la productividad de las palas obtenidas en este primer mes de uso de los modelos determinados.

Tabla 45

Resumen de resultados de productividad de palas

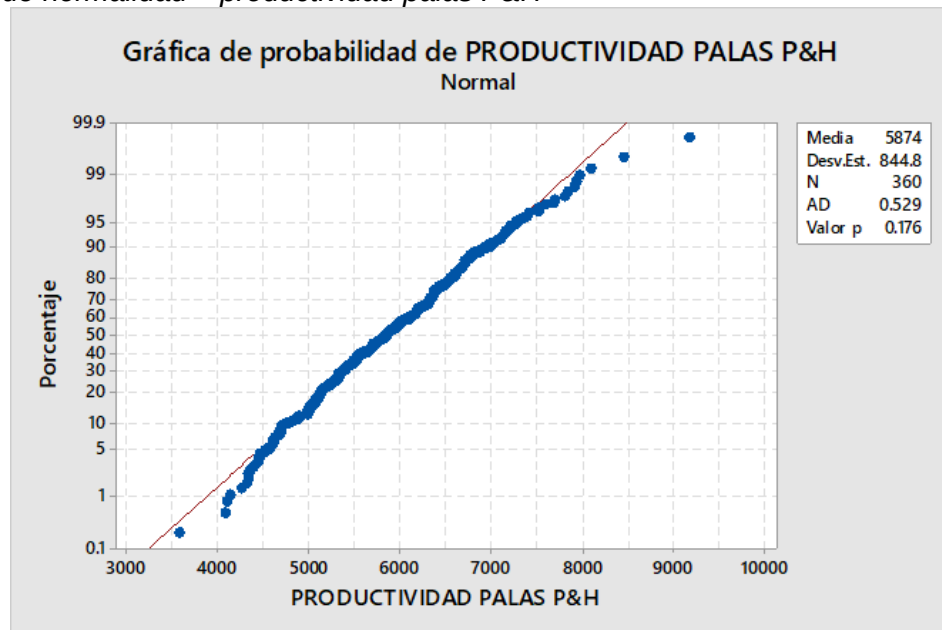
INDICADOR	PALAS P&H		PALAS HITACHI	
	Antes	Después	Antes	Después
Productividad	4,746.25	5,874.00	2,042.28	2,697.00
Hang	25%	21%	32%	26%
t.Hang	1.10	0.70	3.29	2.00
Queue	7%	8%	7%	8%
t.Queue	3.26	3.50	2.92	3.60
Nº de datos	3,397	360	1,868	240

Fuente: Elaboración propia

Iniciamos realizando la prueba de normalidad de los datos para determinar el tipo de prueba a realizar, para concluir que los datos presentan distribución normal el valor de p debe ser mayor a 0.05, usando el software Minitab tenemos:

Figura 79

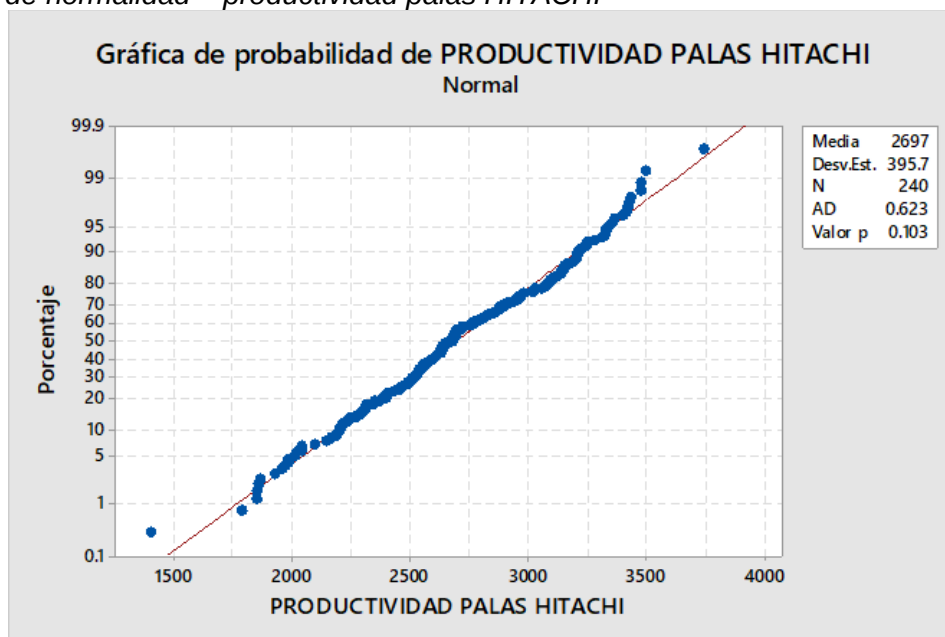
Prueba de normalidad – productividad palas P&H



Fuente: Elaboración propia

Figura 80

Prueba de normalidad – productividad palas HITACHI



Fuente: Elaboración propia

Debido a que en ambos casos el valor de p es mayor a 0.05, se concluye que las distribuciones son normales. Por lo que la prueba estadística a usar es la prueba Z.

Para poder rechazar la hipótesis nula, al realizar la prueba Z se debe obtener un valor de p menor a 0.05, tenemos:

Figura 81

Prueba de Z – productividad palas P&H

Z de una muestra: PRODUCTIVIDAD PALAS P&H				
Estadísticas descriptivas				
N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media	Límite inferior de 95% para μ
360	5874.4	844.8	53.9	5785.7
μ : media de PRODUCTIVIDAD PALAS P&H Desviación estándar conocida = 1022.85				
Prueba				
Hipótesis nula	$H_0: \mu = 4746.25$			
Hipótesis alterna	$H_1: \mu > 4746.25$			
Valor Z	Valor p			
20.93	0.000			

Fuente: Elaboración propia

Figura 82

Prueba de Z – productividad palas HITACHI

Z de una muestra: PRODUCTIVIDAD PALAS HITACHI				
Estadísticas descriptivas				
N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media	Límite inferior de 95% para μ
240	2696.9	395.7	37.9	2634.5
μ : media de PRODUCTIVIDAD PALAS HITACHI Desviación estándar conocida = 587.33				
Prueba				
Hipótesis nula	$H_0: \mu = 2042.28$			
Hipótesis alterna	$H_1: \mu > 2042.28$			
Valor Z	Valor p			
17.27	0.000			

Fuente: Elaboración propia

En ambos casos el valor de p es menor a 0.05, por lo que se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna. Por lo tanto, un adecuado modelamiento de las indicadores operativos permitirá incrementar la productividad de equipos de carguío y acarreo.

Conclusiones

El presente estudio permitió identificar y modelar las principales variables operativas que influyen en la eficiencia del sistema pala-camión, siendo el Queue y el Hang los factores con mayor impacto directo en la productividad y los costos de operación.

A través del análisis costo-beneficio, se concluye que no existen valores fijos de Queue y Hang, ya que estos están condicionados por otros indicadores clave como la disponibilidad mecánica, utilización, DigRate, cantidad de equipos, productividad global y costos unitarios. Por ello, el punto adecuado debe ser evaluado de manera dinámica y adaptativa.

Para los costos y condiciones operativas simuladas en este trabajo, se determinó que los valores óptimos para la pala P&H corresponden a un Queue del 8% (3.5 min) y Hang del 21% (0.73 min). En el caso de la pala Hitachi, los valores adecuados estimados fueron un Queue del 8% (3.6 min) y un Hang del 26% (2.0 min).

Se evidenció que un aumento controlado del Queue genera una mejora en la productividad hasta un punto adecuado, tras el cual las pérdidas comienzan a aumentar. Este comportamiento en forma de curva permite identificar el mínimo de pérdidas y el máximo beneficio operativo, lo cual respalda la necesidad de modelar ambos tiempos en función de condiciones reales y no de metas fijas.

El modelo propuesto demostró que, al ajustar los valores actuales del sistema (por ejemplo, Queue de 2.1 min y Hang de 2.0 min) hacia sus valores óptimos, se obtendría un beneficio operativo estimado de 27,040,763 toneladas anuales, equivalente a 49,660,122 USD al año, bajo los costos ficticios utilizados en el análisis.

El escenario de menor costo operativo evidenció una alta eficiencia del sistema pala-camión, alcanzando una productividad promedio de aproximadamente 3.7 mil toneladas por hombre-guardia por turno. Este rendimiento fue posible gracias a una gestión optimizada de los tiempos de espera (Queue) e inactividad (Hang), que permitió maximizar la capacidad productiva con el menor costo unitario.

Recomendaciones

Se recomienda implementar un sistema de seguimiento mensual del Queue y Hang óptimo, integrado con los planes de producción, que permita ajustar continuamente estos valores en función del comportamiento real del sistema y de los recursos disponibles.

Finalmente, se recomienda replantear el presupuesto actual de los tiempos de espera del sistema pala-camión, ajustando el Queue y Hang programado a valores más realistas y alineados con el máximo beneficio operativo posible, como parte de una estrategia de mejora continua en la gestión de flotas.

Referencias bibliográficas

- Araujo, R. (2018). *Optimización de la flota de volquetes en el acarreo, para incrementar la producción en la mina Los Andes Peru Gold – Huamachuco* [Tesis de título, Universidad Nacional de Trujillo]. <https://hdl.handle.net/20.500.14414/11045>
- Attia, M., Aoulmi, Z., Fehdi, C. & Attia, M. (2024). *Using queuing theory and cost-emission analysis in an open-pit phosphate mine*. International Journal of Sustainable Development Planning. <https://www.iieta.org/download/file/fid/130620>
- Gutiérrez, J. (2017). *Teoría de colas aplicada al carguío y acarreo en una mina de hierro* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Ingeniería]. <http://hdl.handle.net/20.500.14076/17738>
- Gujarati, D. & Porter, D. (2009). *Econometría* (5.^a ed.). McGraw-Hill.
- Kaungu, E., Githiria, J., Mutua, S. & Mauti, D. (2021). *Optimization of shovel-truck haulage system in an open pit using queuing approach*. Arabian Journal of Geosciences, 14(11). <https://www.researchgate.net/publication/351850710>
- Koryagin, M. & Voronov, A. (2017). *Improving the organization of the shovel-truck systems in open-pit coal mines*. Transport Problems, 12(2), 113–122. <https://www.researchgate.net/publication/318266167>
- Kutner, M., Nachtsheim, C., Neter, J. & Li, W. (2004). *Applied Linear Statistical Models* (5th ed.). McGraw-Hill/Irwin.
- López, A. (2021). *Gestión y optimización de operaciones mineras*. Lima: Ediciones UNI.
- Montgomery, D. , Peck, E. & Vining, G. (2012). *Introduction to Linear Regression Analysis* (5th ed.). John Wiley & Sons.
- Oscátegui, J. & Flores, J. (2023). *Modelo de control de tiempos improductivos en el proceso de carguío y acarreo mediante el uso de software de simulación Arena en una unidad minera superficial del centro del Perú* [Trabajo de suficiencia profesional, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. <http://hdl.handle.net/10757/671239>

- Ercelebi, S. & Bascetin, A. (2009). *Optimization of shovel-truck system for surface mining*. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 109, 433–439. <https://scielo.org.za/pdf/jsaimm/v109n7/06.pdf>
- Quiquia, G. (2015). *Mejoramiento continuo en la gestión del ciclo de acarreo de camiones en minería a tajo abierto en Antamina, Cerro Verde, Toquepala, Cuajone, Yanacocha, Alto Chicama, Las Bambas, Cerro Corona, Antapaccay y Pucamarca* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Ingeniería]. <http://hdl.handle.net/20.500.14076/2181>
- Ríos, D. (2014). *Optimización del sistema de carguío-transporte para el incremento de producción minera Antamina S.A.* [Monografía de bachiller, Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo].
- Rist, R. & Smith, M. (2016). *Improving shovel-truck productivity through operational efficiencies at Tarkwa Mine*. Tarkwa Mine Conference Proceedings. <https://conference.umat.edu.gh/wp-content/uploads/2020/08/Improving-Shovel-Truck-Productivity-through-Operational-Efficiencies-at-Gold-Fields-Ghana-Limited-Tarkwa-Mine.pdf>
- Saldaña, A. (2013). *Productividad en el ciclo de carguío y acarreo en el tajo Chaquicocha bajo clima severo – Minera Yanacocha* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Ingeniería]. <http://hdl.handle.net/20.500.14076/1150>
- Tomairo, E. (2018). *Aplicación del modelo matemático de simulación a las operaciones mineras unitarias de carguío y acarreo en tajos abiertos* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Ingeniería]. <http://hdl.handle.net/20.500.14076/17105>.