

**UNIVERSIDAD NACIONAL SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO**  
**FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA, MINAS Y METALURGICA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA DE MINAS**



**TESIS**

**IMPLICANCIAS DE LA SIMULACIÓN DE MONTECARLO EN LA EVALUACIÓN  
DE INDICADORES DE EQUIPOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA  
PLATAFORMA DH21-007 EN VIA TICONA TAJO FERROBAMBA SUR EN  
UNIDAD MINERA LAS BAMBAS - APURIMAC**

**PRESENTADO POR:**

Br. LUIS MAURICIO CONDORI COLQUE

**PARA OPTAR AL TITULO PROFESIONAL  
DE INGENIERO DE MINAS**

**ASESOR:**

MGT. JOSE ALFREDO OLAVE APAZA

**CUSCO - PERU**

**2025**



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

VICE RECTORADO DE INVESTIGACIÓN

**INFORME DE ORIGINALIDAD**

(Aprobado por Resolución Nro.CU-303-2020-UNSAAC)

El que suscribe asesor del trabajo de investigación titulado: **“IMPLICANCIAS DE LA SIMULACIÓN DE MONTECARLO EN LA EVALUACIÓN DE INDICADORES DE EQUIPOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA PLATAFORMA DH21-007 EN VIA TICONA TAJO FERROBAMBA SUR EN UNIDAD MINERA LAS BAMBAS-APURIMAC”**

Presentado por **LUIS MAURICIO CONDORI COLQUE**, con DNI 73304554 y código universitario Nro. **134533** para optar al Título Profesional de: **INGENIERO DE MINAS**. Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 02 (dos) veces, mediante el software antiplagio Turnitin, conforme al Artículo 6° del presente reglamento y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de: **10 % (diez por ciento)**.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación, tesis, textos, libros, revistas, artículos científicos, material de enseñanza y otros (Art. 7, inc. 2 y 3)

Porcentaje	Evaluación y acciones.	Marque con una X
<b>Del 1 al 10 %</b>	<b>No se considera plagio.</b>	<b>X</b>
Del 11 al 30%	Devolver al usuario para las correcciones.	-----
Mayores a 31 %	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, quien a su vez eleva el informe a la autoridad académica para que tome las acciones correspondientes. Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a ley.	-----

Por tanto, en mi condición de Asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y adjunto la primera hoja del reporte del software antiplagio.

Cusco, 21 de agosto de 2025.

FIRMA

POST FIRMA: Mgt. Ing. José Alfredo Olave Apaza

DNI Nro.: 23929435

ORCID ID: 0009-0001-3581-8959

Se adjunta:

1. Reporte Generado por el sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema Antiplagio: 27259:485322110

# LUIS MAURICIO CONDORI COLQUE

## IMPLICANCIAS DE LA SIMULACIÓN DE MONTECARLO EN LA EVALUACIÓN DE INDICADORES DE EQUIPOS PARA LA CONST

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

### Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:485322110

Fecha de entrega

21 ago 2025, 10:02 a.m. GMT-5

Fecha de descarga

21 ago 2025, 10:11 a.m. GMT-5

Nombre del archivo

IMPLICANCIAS DE LA SIMULACIÓN DE MONTECARLO EN LA EVALUACIÓN DE INDICADORES DE EQ....pdf

Tamaño del archivo

9.7 MB

167 páginas

25.491 palabras

153.673 caracteres

# 10% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

## Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Texto mencionado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 20 palabras)
- ▶ Trabajos entregados

## Exclusiones

- ▶ N.º de fuentes excluidas

---

## Fuentes principales

- 10%  Fuentes de Internet
- 0%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

---

## Marcas de integridad

### N.º de alerta de integridad para revisión

-  **Texto oculto**  
14 caracteres sospechosos en N.º de páginas  
El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

## **DEDICATORIA**

Este trabajo de investigación se lo dedico con todo mi cariño a mi querida familia: a mis padres, Luis Alberto y Mauricia, por su amor incondicional y constante apoyo; a mi hermano Erick, por estar siempre a mi lado; y de manera muy especial a mi compañera de vida, Mitzi Alisaa. Gracias a su respaldo, comprensión y compañía inquebrantable, pude culminar esta tesis. Su presencia ha sido fundamental para convertirme en un hombre de bien, comprometido con el servicio a la sociedad.

## AGRADECIMIENTOS

A Dios, Padre Celestial, creador del cielo y de la tierra, quien ha sido mi gran fortaleza a lo largo de mi vida. Su presencia constante me brindó sabiduría en este hermoso camino académico universitario, dándome las fuerzas necesarias para superar los desafíos y alcanzar este importante logro.

A los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, por transmitirme los conocimientos fundamentales para afrontar con responsabilidad y preparación el mundo laboral minero, permitiéndome consolidar y hacer realidad el sueño de convertirme en Ingeniero.

A mi asesor, Mgt. José Alfredo Olave Apaza, le expreso mi más sincero agradecimiento por su valioso apoyo, orientación y paciencia. Su amplio conocimiento fue vital para desarrollar de la mejor manera este trabajo de investigación.

## INTRODUCCIÓN

La investigación desarrollada en el presente se subdivide en cinco capítulos, donde se profundiza las implicancias de la simulación de Montecarlo en la evaluación de indicadores de equipos para la construcción de la plataforma Dh21-007 en vía Ticona tajo Ferrobamba sur en unidad minera las Bambas-Apurímac, la simulación utilizada se apoya del lenguaje de programación R, él cual es una herramienta central de la presente investigación, ya que desarrolla la comparación de las posibilidades de mejora mediante una metodología estadística como es la simulación Montecarlo.

En el Capítulo I, se pone en evidencia la problemática que presenta la evaluación de indicadores de equipos para la construcción de la plataforma Dh21-007 en vía Ticona tajo Ferrobamba sur en unidad minera las Bambas-Apurímac.

En el capítulo II, se desarrolla el marco teórico, donde se analiza los antecedentes de la investigación, rescatando la peculiaridad de la simulación de Montecarlo en operaciones mineras.

En el capítulo III, presenta la metodología de la investigación, caracterizándose por ser correlacional, y cuantitativa.

En el capítulo IV, desarrolla la propuesta mediante la Simulación de Montecarlo en la evaluación de indicadores de equipos de línea amarilla.

En el capítulo V, se muestra la discusión de resultados y se pone en evidencia los logros obtenidos.

## RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo evaluar los indicadores de desempeño operacional de los equipos utilizados en la construcción de la plataforma DH21-007, ubicada en la vía Ticona del Tajo Ferrobamba Sur en la Unidad Minera Las Bambas – Apurímac, mediante la aplicación de la simulación de Montecarlo. La metodología fue de tipo cuantitativa, con un enfoque correlacional, descriptivo y predictivo. Se utilizó un diseño no experimental de corte transversal, considerando como población todos los equipos de línea amarilla de la empresa EPSA, y como muestra aquellos que participaron en dicha plataforma. La recolección de datos se realizó mediante observación directa, revisión documental y registros de horómetros, procesando la información en hojas de cálculo Excel y en simulaciones desarrolladas en el lenguaje R. Los principales indicadores analizados fueron: toneladas por cuchara, tiempo por ciclo, horas efectivas por guardia y metros cúbicos movidos por hora. Los resultados muestran que existen discrepancias entre las capacidades nominales y reales de los equipos, atribuibles a deficiencias en el mantenimiento y variabilidad operativa. La simulación permitió predecir escenarios de mejora, proponiendo estrategias que podrían incrementar la eficiencia y reducir tiempos improductivos hasta en un 20 %, optimizando así la gestión operativa de los equipos.

**Palabras clave:** Simulación de Montecarlo, indicadores de rendimiento, equipos de línea amarilla, eficiencia operativa, minería superficial.

## ABSTRACT

This research aimed to evaluate the operational performance indicators of the equipment used in the construction of platform DH21-007, located on the Ticona road of the Ferrobamba Sur Pit in the Las Bambas Mining Unit – Apurímac, through the application of Monte Carlo simulation. The methodology was quantitative, with a correlational, descriptive, and predictive approach. A non-experimental cross-sectional design was used, with the population consisting of all yellow-line equipment from the EPSA company, and the sample focusing on those deployed on the platform. Data collection included direct observation, document review, and hour meter logs, while data processing was carried out using Excel spreadsheets and simulations coded in R. The main indicators evaluated were: tons per bucket, cycle time, effective hours per shift, and cubic meters moved per hour. Results revealed discrepancies between the nominal and actual performance of the equipment, mainly due to maintenance issues and operational variability. The simulation enabled the prediction of improvement scenarios, proposing strategies that could increase efficiency and reduce unproductive time by up to 20%, thereby optimizing equipment management.

**Keywords:** Monte Carlo simulation, performance indicators, yellow-line equipment, operational efficiency, surface mining.

## ÍNDICE

DEDICATORIA .....	II
AGRADECIMIENTOS .....	III
INTRODUCCIÓN .....	IV
RESUMEN .....	V
ABSTRACT .....	VI
1. CAPÍTULO I.....	1
PROBLEMÁTICA DE LA INVESTIGACIÓN.....	1
1.1. Planteamiento del problema.....	1
1.2. Formulación del problema .....	3
1.2.1. Problema general.....	3
1.2.2. Problemas específicos .....	3
1.3. Justificación.....	3
1.4. Objetivos de la investigación .....	4
1.4.1. Objetivo general .....	4
1.4.2. Objetivos específicos.....	4
1.5. Delimitación de la investigación.....	4
1.5.1. Delimitación geográfica.....	4
1.5.2. Delimitación temporal.....	4

2. CAPÍTULO II.....	5
MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN .....	5
2.1. Antecedentes de la investigación .....	5
2.1.1. Antecedentes internacionales .....	5
2.1.2. Antecedentes nacionales .....	6
2.2. Bases teóricas .....	8
2.2.1. La minería en el Perú y procesos de obtención de cobre .....	8
2.2.2. Gestión logística en operaciones mineras. ....	9
2.2.3. Movimiento de tierras en operaciones .....	10
2.2.4. Vías.....	10
2.2.5. Operaciones de carguío y acarreo .....	10
2.2.6. Indicadores de producción .....	13
2.2.7. Selección de los equipos .....	15
2.2.8. Confiabilidad de los equipos .....	16
2.2.9. Método Montecarlo .....	17
2.2.10. Simulación de Montecarlo aplicada a minería .....	17
2.2.11. Indicadores clave de desempeño (kpis) en maquinaria minera.....	18
2.2.12. Lenguaje de programación r.....	19
2.2.13. Costos mineros .....	19
2.2.14. Costos fijos.....	20

2.2.15. Costos variables.....	20
2.2.16. Costos de operación .....	20
2.2.17. Definición de términos básicos .....	21
2.3. Hipótesis.....	24
2.3.1. Hipótesis general .....	24
2.3.2. Hipótesis específicas .....	24
2.3.3. Variables e indicadores .....	24
2.4. Operacionalización de las variables .....	25
3. CAPÍTULO III .....	27
METODOLOGIA DE LA INVESTIGACIÓN .....	27
3.1. Tipo de investigación .....	27
3.2. Nivel de investigación.....	27
3.3. Diseño de la investigación.....	28
3.4. Población.....	28
3.5. Muestra.....	28
3.6. Técnicas e instrumentos de captura de información .....	28
3.6.1. Técnicas de recolección de datos .....	28
3.6.2. Instrumentos de recolección de datos.....	29
3.7. Técnicas de procesamiento de datos .....	30

4. CAPÍTULO IV .....	31
EVALUACIÓN DE INDICADORES DE EQUIPOS Y SU IMPLICANCIAS DE LA SIMULACIÓN DE MONTECARLO EN LA .....	31
4.1. Diagnóstico actual de los equipos implicados en la construcción de la plataforma dh21-007.....	34
4.1.1. Análisis del estado operativo de los equipos.....	37
4.1.2. Evaluación de indicadores actuales de desempeño .....	55
4.1.3. Identificación de oportunidades de mejora .....	67
4.2. Aplicación de la simulación de montecarlo en la evaluación de indicadores de equipos.....	74
4.2.1. Justificación del uso de la simulación de montecarlo .....	74
4.2.2. Parámetros de entrada y supuestos del modelo.....	75
4.2.3. Implementación del modelo en software especializado .....	80
4.2.4. Código r: simulación de montecarlo con gráficas de ojivas (frecuencia acumulada).....	81
4.3. Escenarios simulados y análisis probabilístico .....	90
4.3.1. Simulación de diferentes escenarios operativos.....	91
4.3.2. Evaluación de la variabilidad de los indicadores .....	97
4.3.3. Validación de los resultados obtenidos .....	97
4.4. Evaluación de los indicadores clave de desempeño (kpis) .....	99

4.4.1. Análisis de toneladas por cuchara (ton/cuch).....	100
4.4.2. Evaluación del tiempo por ciclo (hr/ciclo).....	101
4.4.3. Cálculo de horas por guardia (hr/guardia).....	102
4.4.4. Determinación de metros cúbicos por hora (m <sup>3</sup> /hr) .....	103
4.5. Impacto de la simulación de montecarlo en las operaciones normales.....	104
4.5.1. Comparación de los resultados simulados con los valores históricos.....	105
4.5.2. Identificación de mejoras en la eficiencia operativa .....	107
4.5.3. Evaluación del impacto en la planificación de las operaciones .....	110
4.6. Influencia en los costos de alquiler de equipos .....	114
4.6.1. Análisis de costos antes y después de la simulación.....	114
5. CAPÍTULO V .....	118
DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	118
5.1. Comparación con Gómez Montoya (2020): Confiabilidad y Disponibilidad Mecánica .....	118
5.2. Comparación con Quispe Aguilar (2022): Variabilidad de Indicadores Productivos.....	118
5.3. COMPARACIÓN CON <i>Cornejo Castro Samuel, S. (2022), VALIDACIÓN DE SIMULACIONES</i> .....	119
5.4. Implicancias Comunes en los Estudios Comparados.....	119
CONCLUSIONES .....	120

RECOMENDACIONES.....	123
6. BIBLIOGRAFÍA.....	124
7. ANEXOS .....	126
ANEXO 1 .....	126
1.1. Ubicación geográfica.....	126
1.2. Accesibilidad.....	127
1.3. Depósitos y reservas minerales .....	128
1.4. Recursos .....	129
1.4.1. Flora y fauna.....	129
1.5. Geología .....	129
1.5.1. Geología regional .....	129
1.5.2. Franjas metalogenéticas .....	130
1.5.3. Franja xv de pórfidos skarn de cu-mo(au y zn).....	130
1.6. Procesos operativos de minera las bambas .....	131
1.6.1. Accesos.....	131
1.6.2. Secuencia de minado .....	132
1.6.3. Operaciones mina.....	133
1.6.4. Ciclo de minado .....	134
1.6.5. Maquinaria empleada en el área del tajo ferrobamba .....	138
ANEXO 2 .....	142

ANEXO 3 .....145

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b>	Operacionalización de las variables.....	25
<b>Tabla 2</b>	Especificaciones de la excavadora hidráulica 336 – Dimensiones.....	40
<b>Tabla 3</b>	Especificaciones de la excavadora hidráulica 336 – Rangos y fuerzas de trabajo .....	42
<b>Tabla 4</b>	Retroexcavadora jcb 3cx – Rendimiento .....	44
<b>Tabla 5</b>	Retroexcavadora jcb 3cx – Dimensiones.....	45
<b>Tabla 6</b>	Especificaciones técnicas rodillos vibratorios .....	48
<b>Tabla 7</b>	Tractor de Cadenas D8T Cat Motor .....	56
<b>Tabla 8</b>	Tractor de Cadenas D8T Cat Pesos .....	57
<b>Tabla 9</b>	Tractor de Cadenas D8T Cat Capacidades de llenado de servicio .....	57
<b>Tabla 10</b>	Tractor de Cadenas D8T Cat Transmisión .....	58
<b>Tabla 11</b>	Tractor de Cadenas D8T Cat Hojas .....	58
<b>Tabla 12</b>	Tractor de Cadenas D8T Cat Dimensiones.....	59
<b>Tabla 13</b>	Especificaciones de la excavadora hidráulica 336 – Motor.....	61
<b>Tabla 14</b>	Especificaciones de la excavadora hidráulica 336 – Mecanismo de balance .....	61
<b>Tabla 15</b>	Especificaciones de la excavadora hidráulica 336 – Pesos.....	62
<b>Tabla 16</b>	Especificaciones de la excavadora hidráulica 336 – Cadena.....	62
<b>Tabla 17</b>	Especificaciones de la excavadora hidráulica 336 – Mando .....	62

<b>Tabla 18</b>	Especificaciones de la excavadora hidráulica 336 – Sistema hidráulico...	63
<b>Tabla 19</b>	Especificaciones de la excavadora hidráulica 336 – Capacidades de servicio de reabastecimiento .....	64
<b>Tabla 20</b>	Especificaciones de la excavadora hidráulica 336 – Estándares .....	64
<b>Tabla 21</b>	Especificaciones de la excavadora hidráulica 336 – Desempeño del sonido .....	65

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b>	Ciclo típico de carguío y acarreo en minería superficial. ....	12
<b>Figura 2</b>	Plano de la plataforma .....	33
<b>Figura 3</b>	Especificaciones de la excavadora hidráulica 336 – Dimensiones.....	39
<b>Figura 4</b>	Especificaciones de la excavadora hidráulica 336 – Dimensiones.....	40
<b>Figura 5</b>	Especificaciones de la excavadora hidráulica 336 – Rangos y fuerzas de trabajo .....	41
<b>Figura 6</b>	Especificaciones de la excavadora hidráulica 336 – Rangos y fuerzas de trabajo .....	42
<b>Figura 7</b>	Retroexcavadora jcb 3cx – Rendimiento .....	43
<b>Figura 8</b>	Retroexcavadora jcb 3cx – Rendimiento .....	44
<b>Figura 9</b>	Retroexcavadora jcb 3cx – Dimensiones.....	45
<b>Figura 10</b>	Retroexcavadora jcb 3cx – Dimensiones.....	45
<b>Figura 11</b>	Especificaciones técnicas rodillos vibratorios – Dimensiones .....	47
<b>Figura 12</b>	Especificaciones técnicas rodillos vibratorios .....	48
<b>Figura 13</b>	La motoniveladora Caterpillar 14H.....	52
<b>Figura 14</b>	El modelo Actros .....	54
<b>Figura 15</b>	Tractor de Cadenas D8T Cat Motor .....	56
<b>Figura 16</b>	Tractor de Cadenas D8T Cat Pesos .....	57
<b>Figura 17</b>	Tractor de Cadenas D8T Cat Capacidades de llenado de servicio .....	57

<b>Figura 18</b>	Tractor de Cadenas D8T Cat Transmisión .....	58
<b>Figura 19</b>	Tractor de Cadenas D8T Cat Hojas .....	58
<b>Figura 20</b>	Tractor de Cadenas D8T Cat Dimensiones.....	59
<b>Figura 21</b>	Especificaciones de la excavadora hidráulica 336 – Motor.....	61
<b>Figura 22</b>	Especificaciones de la excavadora hidráulica 336 – Mecanismo de balanceo .....	61
<b>Figura 23</b>	Especificaciones de la excavadora hidráulica 336 – Pesos.....	62
<b>Figura 24</b>	Especificaciones de la excavadora hidráulica 336 – Cadena.....	62
<b>Figura 25</b>	Especificaciones de la excavadora hidráulica 336 – Mando .....	62
<b>Figura 26</b>	Especificaciones de la excavadora hidráulica 336 – Sistema hidráulico...	63
<b>Figura 27</b>	Especificaciones de la excavadora hidráulica 336 – Capacidades de servicio de reabastecimiento .....	64
<b>Figura 28</b>	Especificaciones de la excavadora hidráulica 336 – Estándares .....	64
<b>Figura 29</b>	Especificaciones de la excavadora hidráulica 336 – Desempeño del sonido .....	65
<b>Figura 30</b>	Visualización del archivo DICIEMBRE_2024.xlsx.....	77
<b>Figura 31</b>	Visualización del archivo data.xlsx .....	78
<b>Figura 32</b>	Código parte 1.....	81
<b>Figura 33</b>	Código parte 2.....	82
<b>Figura 34</b>	Simulación de Montecarlo para escenario base .....	92

<b>Figura 35</b>	Simulación de Montecarlo para escenario optimizado .....	93
<b>Figura 36</b>	Simulación de Montecarlo para escenario adverso.....	94
<b>Figura 37</b>	Graficar la variabilidad entre escenarios .....	94
<b>Figura 38</b>	Cálculo del MAE .....	98
<b>Figura 39</b>	Comparación entre escenarios simulados .....	108
<b>Figura 40</b>	Comparación de escenarios para la planificación operativa.....	111
<b>Figura 41</b>	Ubicación geográfica. ....	126
<b>Figura 42</b>	Accesibilidad. ....	127
<b>Figura 43</b>	Depósitos y reservas minerales.....	128
<b>Figura 44</b>	Leyes de mineral.....	128
<b>Figura 45</b>	Reservas de mineral.....	129
<b>Figura 46</b>	Accesos hacia el área operativa. ....	132
<b>Figura 47</b>	Secuencia de minado. ....	133
<b>Figura 48</b>	Equipos de línea amarilla empleadas en el tajo ferrobamba.....	139
<b>Figura 49</b>	Equipos de línea amarilla de carguío.....	140
<b>Figura 50</b>	Equipos de línea amarilla de acarreo. ....	141
<b>Figura 51</b>	Foto de campo 1.....	142
<b>Figura 52</b>	Foto de campo 2.....	142
<b>Figura 53</b>	Foto de campo 3.....	143
<b>Figura 54</b>	Foto de campo 4.....	143

<b>Figura 55</b>	Foto de campo 5.....	144
<b>Figura 56</b>	Foto de partes diarias de trabajo de los equipos de línea amarilla.....	145
<b>Figura 57</b>	Foto de partes diarias de trabajo de los equipos de línea amarilla.....	146
<b>Figura 58</b>	Especificaciones de la plataforma.....	147

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

<b>Gráfica 1</b>	Resumen de horas trabajadas.....	56
<b>Gráfica 2</b>	Frecuencia Acumulada del Material Movido Total.....	86
<b>Gráfica 3</b>	Frecuencia Acumulada de Material Movido por Excavadora .....	87
<b>Gráfica 4</b>	Frecuencia Acumulada de Material Movido por Tractor .....	88
<b>Gráfica 5</b>	Frecuencia Acumulada de Material Movido por Rodillo .....	89
<b>Gráfica 6</b>	Graficar la variabilidad entre escenarios .....	95
<b>Gráfica 7</b>	Comparación entre escenarios simulados .....	109
<b>Gráfica 8</b>	Comparación de escenarios para la planificación operativa.....	113

## CAPÍTULO I

### PROBLEMÁTICA DE LA INVESTIGACIÓN

#### 1.1.Planteamiento del problema

En la actualidad, las operaciones de movimiento de tierras en proyectos de minería superficial enfrentan múltiples desafíos relacionados con la gestión eficiente de los equipos pesados, especialmente aquellos clasificados como línea amarilla. En el contexto específico de la construcción de la plataforma DH21-007 en la vía Ticona del Tajo Ferrobamba Sur, dentro de la Unidad Minera Las Bambas – Apurímac, se ha evidenciado una problemática recurrente: la ausencia de un sistema formalizado y cuantitativo para evaluar el desempeño real de los equipos operativos. Esta carencia limita la capacidad de supervisión y control, generando incertidumbre en la toma de decisiones relacionadas con productividad, asignación de recursos y planificación logística.

Los reportes de operación reflejan inconsistencias entre las capacidades nominales de los equipos y sus rendimientos efectivos en campo, lo cual puede estar vinculado a diversos factores como el desgaste mecánico, deficiencias en el mantenimiento, condiciones geotécnicas adversas o diferencias en la pericia de los operadores. Sin embargo, al no contar con una metodología estructurada que permita cuantificar y analizar estos indicadores bajo un enfoque estadístico, resulta difícil distinguir entre variabilidad aceptable y desviaciones significativas que afecten los resultados del proyecto.

A ello se suma la falta de herramientas de análisis que consideren la incertidumbre operativa como parte inherente del entorno minero, caracterizado por condiciones cambiantes y múltiples variables interdependientes. En consecuencia, la toma de decisiones técnicas y

económicas se ve limitada por una escasa base de datos fiable y por la inexistencia de modelos que permitan simular escenarios alternativos para anticipar comportamientos críticos de los equipos.

Este vacío técnico y metodológico genera impactos tanto en el cumplimiento de los plazos constructivos como en los costos de operación, provocando sobrecostos por alquiler de maquinaria, tiempos muertos no programados, baja utilización efectiva de los equipos y disminución en los indicadores clave de rendimiento (KPIs). En este contexto, surge la necesidad de abordar esta problemática mediante una investigación que permita entender y cuantificar el comportamiento real de los equipos bajo condiciones operativas específicas, evidenciando así la importancia de incorporar técnicas modernas de análisis y modelamiento en la gestión de maquinaria en proyectos mineros.

## **1.2. Formulación del problema**

### ***1.2.1. Problema general***

- ¿Qué implicancias conlleva la simulación de Montecarlo para evaluar los indicadores de equipos para la construcción de la plataforma Dh21-007 en vía Ticona tajo Ferrobamba sur – Unidad Minera las Bambas - Apurímac?

### ***1.2.2. Problemas específicos***

- ¿Cuál es la situación actual de los equipos implicados en la construcción de la plataforma Dh21-007 en vía Ticona tajo Ferrobamba sur – Unidad Minera las Bambas - Apurímac?
- ¿Qué impacto tiene la evaluación de los indicadores de equipos implicados en la construcción de la plataforma Dh21-007 en vía Ticona tajo Ferrobamba sur – Unidad Minera las Bambas – Apurímac mediante la simulación de Montecarlo?
- ¿Cuál es la influencia en los costos de alquiler de equipos en la construcción de la plataforma Dh21-007 en vía Ticona tajo Ferrobamba sur – Unidad Minera las Bambas - Apurímac?

## **1.3. Justificación**

La presente investigación tiene importancia desde el punto de vista técnico – analítico, ya que comprenderá de un análisis mediante herramientas estadísticas para evaluar los indicadores de equipos implicados en la construcción de la plataforma Dh21-007 en vía Ticona tajo Ferrobamba sur – Unidad Minera las Bambas - Apurímac.

## **1.4. Objetivos de la investigación**

### ***1.4.1. Objetivo general***

- Determinar las implicancias que conlleva la utilización de la simulación de Montecarlo para evaluar los indicadores de equipos implicados en la construcción de la plataforma Dh21-007 en via Ticona tajo Ferrobamba sur – Unidad Minera las Bambas - Apurimac.

### ***1.4.2. Objetivos específicos***

- Determinar la situación actual de los equipos implicados en la construcción de la plataforma Dh21-007 en via Ticona tajo Ferrobamba sur – Unidad Minera las Bambas - Apurimac.
- Determinar el impacto que tiene la evaluación de los indicadores de equipos implicados en la construcción de la plataforma Dh21-007 en via Ticona tajo Ferrobamba sur – Unidad Minera las Bambas – Apurimac mediante la simulación de Montecarlo.
- Determinar la influencia en los costos de alquiler de equipos implicados en la construcción de la plataforma Dh21-007 en via Ticona tajo Ferrobamba sur – Unidad Minera las Bambas - Apurimac.

## **1.5. Delimitación de la investigación**

### ***1.5.1. Delimitación geográfica.***

En cuanto respecto a la delimitación espacial; la investigación se realizó únicamente en la plataforma Dh21-007 en via Ticona tajo Ferrobamba sur – Unidad Minera las Bambas - Apurímac.

### ***1.5.2. Delimitación temporal.***

Con respecto a la delimitación temporal; el trabajo de investigación se realizó en el periodo comprendido entre los meses de Julio y Octubre del año 2024.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN

#### 2.1. Antecedentes de la investigación

##### 2.1.1. *Antecedentes internacionales*

*Gómez Montoya, J. M. (2020). Aplicación de la simulación de Monte Carlo para la confiabilidad de los equipos en la minería a cielo abierto.*

Universidad de Chile – Departamento de Ingeniería de Minas.

La investigación desarrollada por Gómez Montoya (2020) tuvo como objetivo evaluar la confiabilidad operativa de camiones de acarreo y palas hidráulicas en una operación minera a tajo abierto en Chile, utilizando la simulación de Montecarlo como herramienta principal para modelar la incertidumbre asociada a los tiempos de falla y reparación de los equipos. Para ello, se emplearon registros históricos de mantenimiento y se ajustaron distribuciones estadísticas a variables como el tiempo medio entre fallas (MTBF) y el tiempo medio de reparación (MTTR), generando una base de datos probabilística que alimentó el modelo de simulación.

Los resultados evidenciaron que la disponibilidad mecánica de los equipos podría incrementarse hasta en un 12 % si se optimizan los intervalos de mantenimiento preventivo basados en los escenarios simulados. Asimismo, se identificaron ventanas operativas críticas donde la probabilidad de falla se elevaba significativamente debido a sobrecarga o condiciones adversas del terreno. Este estudio demuestra que el uso de técnicas probabilísticas permite anticipar cuellos de botella operativos y mejorar la toma de decisiones en la gestión de maquinaria minera, siendo plenamente aplicable a otros contextos con alta variabilidad operativa como la construcción de plataformas.

### ***2.1.2. Antecedentes nacionales***

***Quispe Aguilar, J. (2022). Evaluación del rendimiento de maquinaria pesada con simulación probabilística en la construcción de plataformas mineras en Apurímac.***

Universidad Nacional de Ingeniería – Facultad de Ingeniería Civil.

En esta investigación, Quispe Aguilar analiza el rendimiento de excavadoras hidráulicas, tractores de oruga y rodillos compactadores utilizados en la construcción de plataformas de perforación en proyectos mineros de Apurímac, empleando simulaciones probabilísticas para modelar el comportamiento operativo de los equipos. A través de datos de campo recolectados durante cuatro meses y registros de horómetros, se construyeron modelos estadísticos para variables como tiempo de ciclo, producción por jornada y consumo de combustible. Posteriormente, estos modelos fueron integrados en simulaciones de Montecarlo para generar escenarios de planificación operativa bajo condiciones reales de incertidumbre.

Los hallazgos del estudio revelaron que los indicadores de rendimiento, tales como metros cúbicos movidos por hora y horas efectivas por turno, presentaban una desviación estándar superior al 15 %, lo cual demuestra la necesidad de incluir herramientas de simulación para una planificación robusta. El autor concluye que incorporar análisis probabilístico permite mejorar la asignación de equipos, reducir ineficiencias por sobreestimación de capacidades y prever el impacto económico de las paradas no programadas. Esta tesis aporta evidencia valiosa sobre el uso práctico de la simulación estadística en el contexto minero peruano.

*Cornejo Castro Samuel, S. (2022). Optimización – Simulación de carguío y acarreo en tajo abierto utilizando NSGAI y programación lineal entera.*

Pontificia Universidad Católica del Perú – Facultad de Ingeniería de Minas.

Tesis con el objetivo de desarrollar dos modelos de optimización que busquen minimizar los costos de transporte y maximizar la recuperación del mineral enviado a planta incrementando el valor de dicho proceso, uno de ellos será una heurística y el otro un modelo de programación lineal entera.

Se concluye que una vez desarrollado el modelo se observó que la hipótesis pudo corroborarse, elaborándose un modelo que logre representar el problema a una escala suficientemente real como para calcular cronogramas de solución consistentes y poder diferenciar entre una y otra solución, una vez realizado ello se contravalidó el resultado utilizando un software de simulación estocástica comercial para analizar la robustez de los resultados. En conclusión, el modelo logró resolver el problema de creación de cronogramas de producción óptimos maximizando sus beneficios en parámetros excluyentes entre sí mismos (blending, tiempo de ejecución y balanceo de trabajo), donde el tiempo de cálculo fue razonable.

El tiempo de cálculo para las soluciones utilizando ambos algoritmos es bastante razonable dado el tamaño total de posibles soluciones (mayor a 1028 posibles soluciones). Siendo 7416 segundos para el algoritmo NSGA y 114 segundos para el algoritmo de programación lineal. Debe de considerarse que estos resultados se obtuvieron en un contexto de implementación no-optimizada, donde las estructuras de datos, módulos y el lenguaje utilizado podrían mejorarse y obtener mejores resultados en términos de tiempo de cómputo permitiendo soluciones más variadas. Esta diferencia puede explicarse de la siguiente manera: El algoritmo NSGAI requiere considerablemente mayor tiempo de cálculo dada la necesidad de simulación y evaluación de cada

una de las soluciones para cada una de las generaciones evaluadas, en este caso, cada generación constaba de 20 soluciones que evolucionarían por 100 generaciones; esto resulta a su vez en un total de 2000 simulaciones de los cronogramas, evaluaciones de cada uno de sus funciones objetivo lo que resulta en un total de 6000 funciones objetivo evaluadas, las cuales a su vez mientras más grandes y complejas sean incrementan el tiempo de cálculo

## **2.2. Bases teóricas**

### ***2.2.1. La minería en el Perú y procesos de obtención de cobre***

Podemos señalar que el Perú es un país minero, y no de ahora, sino desde la época Inca, quizás antes, no obstante, estamos de acuerdo en afirmar que la minería se encuentra presente en los diversos escenarios de desarrollo y progreso del país. En la última década el Perú experimento un desarrollo productivo en el sector minero, aunado a una bonanza económica generada por el aumento del precio del cobre, lo que determinó un mayor ingreso fiscal. Las causas que generaron este inusual crecimiento se encuentran asociadas a una inusual coyuntura internacional, producto de la demanda china por productos tradicionales, en especial commodities como el cobre, así como el aporte de políticas que promovieron y mantuvieron el apoyo en la inversión privada.

El cobre se encuentra principalmente en forma de minerales sulfurados como la calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), bornita ( $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ ) y calcosina ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ). “La forma más usada para extraer el cobre es la de cielo abierto o tajo abierto, el proceso de extracción requiere varios procesos, se inicia con la perforación e instalación de explosivos químicos, los cuales al detonar ocasionan la fractura de la roca, luego de lo cual es cargado y clasificado, dependiendo de la cantidad de mineral que pueda extraerse, podría ser derivado al botadero y/o al proceso de lixiviación sin pasar por chancado (material con baja cantidad de mineral) o al proceso de chancado primario, (material con alta cantidad de mineral) donde comienza el proceso de extracción de cobre”. (Parra Nuñez, 2011) “En

el proceso de chancado, se genera la reducción del tamaño de los fragmentos obtenidos en la voladura, ello con la finalidad de someterlos a proceso de molienda y lixiviación (extracción de la materia soluble de una mezcla mediante la acción de un disolvente líquido) en pilas, regularmente la medida requerida para este proceso es de 7 pulgadas, la cual puede variar de acuerdo con los procesos implementados.” (Parra Nuñez, 2011)

“Posteriormente, este material es llevado a grandes molinos cilíndricos, donde es triturado hasta alcanzar una medida de alrededor de 0.18 milímetros, es en esta etapa que pueden generarse varios procesos de extracción, los cuales pueden ser: - Extracción de cobre a partir de menas sulfuradas (pirometalurgia) - Extracción de cobre a partir de menas de óxido (hidrometalurgia) El método más usado es el de minerales de sulfuro, cuyo proceso tiene cuatro etapas luego de lo cual se obtiene el cobre.” (Parra Nuñez, 2011)

### ***2.2.2. Gestión logística en operaciones mineras.***

Tomando en consideración que el proceso productivo del cobre no influye en su cotización mundial, no es menos cierto que un proceso costoso puede generar menores ganancias, por consiguiente, controlar la cadena de abastecimiento de cada insumo, producto y equipo utilizado resulta imprescindible y crítico. Frente a ello, mejorar la cadena de suministro en cada una de las etapas resulta un objetivo estratégico de las empresas mineras, la mejora continua a través del sistema ISO, el uso de tecnología y herramientas informáticas, así como mejorar las relaciones con los proveedores, resulta determinante en el proceso productivo. “La mayor preocupación en este período de costos en alza, porque indiscutiblemente al elevarse la demanda por el metal rojo, los insumos utilizados aumentan su precio, es generar innovaciones y mayores eficiencias, para asegurar que la industria del cobre logre seguir siendo competitiva, aun cuando el precio del cobre se estabilice.” Para ello, existen diversas teorías y aportes que inciden en la mejora de la

productividad, las cuales pueden ser utilizadas en los diversos escenarios productos, en tal sentido, para efectos de la presente tesis, únicamente nos enfocaremos en el proceso de transporte de mineral. (Arenas Ramos, 2021)

### ***2.2.3. Movimiento de tierras en operaciones***

Para el movimiento de tierras en obras complementarias de infraestructura en minería se utiliza equipos de carguío (excavadoras, cargadores frontales y palas), camiones de transporte, que constituyen unidades primordiales en el movimiento de tierras. Los equipos auxiliares típicos incluyen tractores, máquinas niveladoras, camiones de servicio, transportadores de explosivos, perforadoras secundarias y grúas. (Bustamante Morales, 2022)

### ***2.2.4. Vías***

Son las estructuras diarias dentro de una operación de movimiento de tierras, a través de las cuales se extrae material o se efectúan los movimientos de equipos y servicios entre diferentes puntos de esta. Se caracterizan fundamentalmente por su anchura y su pendiente dentro de una disposición espacial determinada. (Barreto Taipe, 2017)

#### ***2.2.4.1. Vías de acceso***

Caminos de uso esporádico que se utilizan para el acceso de los equipos, generalmente de arranque de material de botaderos. Las anchuras son pequeñas y pueden ser vías de un solo carril o de dos carriles, las pendientes son superiores a las de las pistas. (Barreto Taipe, 2017)

### ***2.2.5. Operaciones de carguío y acarreo***

#### ***2.2.5.1. Carguío***

Es una etapa del ciclo del minado, que consiste en la carga de material (mineral o estéril) fragmentado del yacimiento para conducirlo a los posibles destinos, ya sea a planta, stock de mineral o botaderos de estéril. La operación de carguío involucra el desarrollo de una serie de

funciones que aseguran que el proceso se lleve a cabo con normalidad y eficiencia. Esta etapa se ocupa de definir los sectores de carga, las direcciones de carguío (a frentes de carga, posición de equipos de carguío y nivel de pisos) y el destino de los materiales de acuerdo con leyes de clasificación según políticas de cada empresa y tonelajes definidas previamente. (Barreto Taipe, 2017)

#### **2.2.5.2. Acarreo**

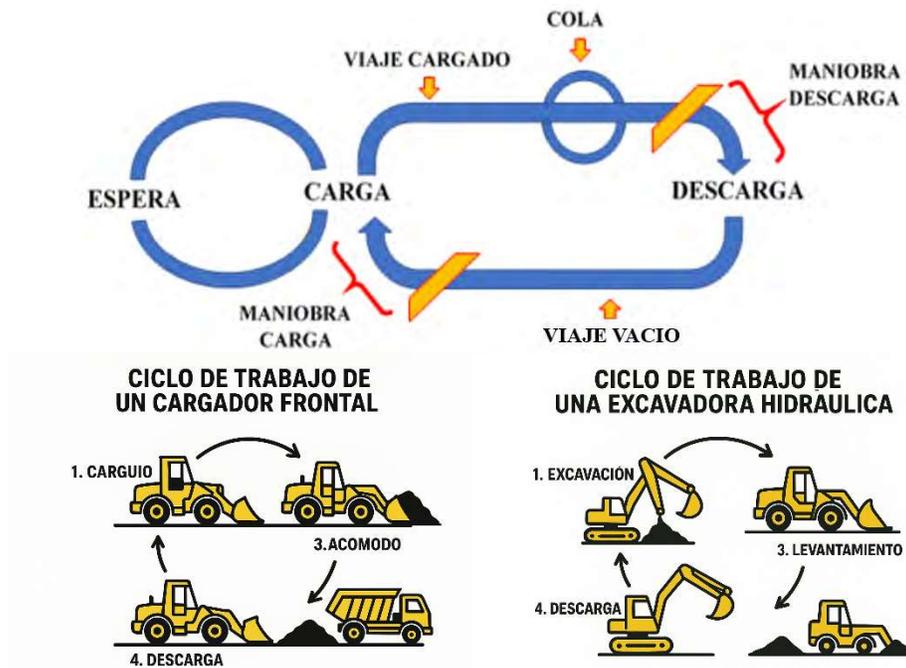
Es la operación del ciclo de minado posterior al carguío, que consiste en el traslado de material mineralizado y/o estéril desde el yacimiento hacia los posibles destinos, ya sea el chancado, stock de mineral o botaderos. Las funciones involucradas en el proceso de transporte son las siguientes: Aquí se planifica bien la definición de las rutas de transporte y del destino de los materiales de acuerdo con leyes de mineral y tonelajes ya definidos. (Barreto Taipe, 2017)

#### **2.2.5.3. Ciclo de carguío y acarreo**

En cualquier trabajo de remoción de tierra, las máquinas se adaptan a un ciclo de trabajo determinado. En este ciclo se incluyen operaciones de carga, acarreo, descarga y vuelta al lugar inicial, con algunas variaciones en ciertos casos. (Bustamante Morales, 2022)

**Figura 1**

*Ciclo típico de carguío y acarreo en minería superficial.*



*Fuente:* (Bustamante Morales, 2022)

Arriba (ciclo de carguío y acarreo en minería superficial) / Izquierda (Ciclo de trabajo de un cargador frontal) /Derecha (Ciclo de trabajo de una excavadora hidráulica)

#### **2.2.5.4. Equipos de carguío y acarreo**

En el contexto de la minería superficial y la gestión de los sistemas de carguío y acarreo, es necesario contar con diversos equipos especializados para llevar a cabo estas tareas. Algunos de los equipos comunes utilizados en este tipo de operaciones son:

**CARGADOR FRONTAL.** El cargador frontal también denominada cargadora, o pala cargadora, pala cargadora frontal. El cargador es una máquina que puede estar equipada con orugas o ruedas y tiene una cuchara grande en la parte delantera. Estos equipos se utilizan para cargar, transportar y en algunos casos, excavar en distancias cortas. (Amable Salazar, 2017)

- *Cargador Sobre Ruedas.* - Son los cargadores que ruedan encima de llantas, en cuanto a su evolución de mejoras y en tamaño han seguido al tamaño de los volquetes, que

llego en la década de 1990 alcanzaron capacidades de hasta 25 m<sup>3</sup>, este equipo se utiliza mayormente en los grandes proyectos como es la minería, pero en las obras de construcción civil se usan cargadores medianos como es hasta de 6.0 m<sup>3</sup>. (Amable Salazar, 2017)

**EXCAVADORA.** La excavadora es una máquina que se utiliza tanto en faenas de explotaciones mineras, como en obras civiles. Las excavadoras hidráulicas tienen muchas variaciones. Pueden estar montadas sobre orugas o sobre ruedas y disponer de distintos accesorios de operación. Con cada opción de tipo, modelo, accesorios y tamaños, se tienen diferentes aplicaciones, por lo tanto, distintas ventajas económicas. La potencia hidráulica es la clave de las ventajas que ofrecen estas máquinas. El control hidráulico de los componentes de la máquina proporciona mayor rapidez en los tiempos de los ciclos, mejor control de los accesorios, mejor eficiencia total, suavidad y facilidad de operación y un control positivo que permite una mayor precisión en el carguío de material. (Amable Salazar, 2017)

**VOLQUETE.** son vehículos automóviles que poseen un dispositivo mecánico para volcar la carga que transportan en un cajón que reposa sobre el chasis del vehículo. La composición mecánica de los volquetes depende precisamente del volumen de material que pueda transportar el cajón. (Amable Salazar, 2017)

#### **2.2.6. Indicadores de producción**

Al implementar el plan de mejoramiento del sistema de carguío y acarreo utilizando la metodología Six Sigma, es importante establecer indicadores de producción para evaluar el desempeño de los equipos y procesos.

Los indicadores de producción son medidas financieras o no financieras utilizadas para evaluar el nivel de logro de los objetivos establecidos previamente. Estos indicadores suelen estar

incluidos en el plan estratégico de la organización y reflejan su desempeño en un período específico. Los indicadores se aplican en varias áreas de una empresa, como compras, ventas, logística y servicio al cliente. (Bustamante Morales, 2022)

#### 2.2.6.1. Indicadores de productividad de equipos

**DISPONIBILIDAD (%D):** Corresponde al tiempo en el que el equipo está disponible para ser usado con respecto al tiempo total programado. Nos indica que porcentaje del tiempo total el equipo está operativo. (Saldaña, 2013)

$$DISPONIBILIDAD(\%D) = \frac{\textit{Tiempo Operativo}}{\textit{Tiempo Total}}$$

**USO DE LA DISPONIBILIDAD (UD):** El porcentaje de tiempo que el equipo está encendido, en producción o en demoras, respecto al tiempo que está disponible mecánicamente. Este parámetro involucra directamente a los Stand By. (Saldaña, 2013)

$$UD = \frac{\textit{Tiempo Operando} + \textit{Demora}}{\textit{Tiempo Operativo}}$$

**USO DEL EQUIPO (USE):** El porcentaje de tiempo en que el equipo está produciendo, respecto del total de tiempo en que está con el motor encendido. Este parámetro involucra directamente a las demoras operativas. (Saldaña, 2013)

$$USE = \frac{\textit{Tiempo Operando efectivo}}{\textit{Tiempo Operando efectivo} + \textit{Demora}}$$

**UTILIZACIÓN (%U):** El porcentaje de tiempo en que el equipo está produciendo, respecto del total de tiempo disponible mecánicamente. Es una media de la eficiencia del aprovechamiento de los recursos por parte de Operaciones. (Saldaña, 2013)

$$USAGE = \frac{\textit{Tiempo Operando efectivo}}{\textit{Tiempo Operativo}}$$

**TIEMPO POR CICLO(MIN/CICLO):** Es el tiempo promedio de carguío de tolva de volquete realizado por un equipo de carguío.

$$CICLO = \frac{\text{Tiempo de carguío de volquetes}}{1 \text{ ciclo de carguío}}$$

**RENDIMIENTO(TON/UCH):** Es la relación del material movido o cargado por el número de cucharas realizadas por el equipo de carguío:

$$REND = \frac{\text{Toneladas de material suelto}}{\#Cucharas de equipo de carguío}$$

### 2.2.7. Selección de los equipos

Se debe tener una serie de condiciones esenciales para el proceso de carguío y acarreo, ya que de ello dependerá la eficacia al momento de realizar dichas tareas (Anchiraico Giraldo & Rojas Oré, 2020). Las condiciones que se debe considerar son:

- a) **Naturaleza de los materiales.** Es necesario obtener los datos de densidad del material, el incremento de volumen en la roca después de la explotación (factor de esponjamiento) y su nivel de abrasividad. Estos tres valores son fundamentales para seleccionar adecuadamente los equipos de acarreo y transporte. (Aguero Marcelo & Ramirez Gonzales, 2020)
- b) **Requerimientos de producción.** El rendimiento de la mina está estrechamente vinculado con las labores de carguío y acarreo, ya que la cantidad de mineral que llega a la planta para su procesamiento depende de estos equipos. Por lo tanto, es crucial buscar realizar estas tareas con el menor costo posible, a fin de obtener mayores beneficios económicos. Es fundamental trabajar con la premisa de minimizar los costos de carga y transporte del mineral. (Aguero Marcelo & Ramirez Gonzales, 2020)

- c) **Condiciones de operación.** En ocasiones, las condiciones de diseño de la mina pueden presentar circunstancias desfavorables que pueden causar problemas graves en los equipos, ya que estos fueron seleccionados teniendo en cuenta las pendientes, distancias de recorrido, curvas, giros, entre otros. Con el fin de evitar paradas inesperadas en el proceso de las operaciones, es necesario realizar una simulación más precisa y anticipada de los equipos, teniendo en cuenta los posibles problemas que puedan surgir por diversas razones. (Aguero Marcelo & Ramirez Gonzales, 2020)
- d) **Capacidad del equipo.** Esto adquiere una gran importancia debido a que la cantidad de mineral/esrertil que se carga y transporta en los equipos tiene un impacto directo en la eficiencia y efectividad de las operaciones. Es crucial establecer un ritmo de carga programado que sea equilibrado con las capacidades de traslado del proceso. (Aguero Marcelo & Ramirez Gonzales, 2020)
- e) **Tipo de motor.** Esto debe ir en función de las restricciones operativas.
- f) **Trabajos posteriores.** Debemos considerar la utilización total de los equipos en todas las labores que se requieran, sin sobrepasar el nivel de saturación de estos. Es por ello por lo que se debe tomar en cuenta ciertos indicadores de productividad, como la disponibilidad mecánica, utilización efectiva y rendimiento operativo para darles el mejor uso posible a través del tiempo. (Aguero Marcelo & Ramirez Gonzales, 2020)

### ***2.2.8. Confiabilidad de los equipos***

La confiabilidad de un equipo es la frecuencia con la cual ocurren las fallas en el tiempo. Si no hay fallas el equipo es 100% confiable, si la frecuencia de fallas es muy baja, la confiabilidad del equipo es aún aceptable, pero si la frecuencia es alta, el equipo es poco confiable. La confiabilidad está estrechamente relacionada con la calidad de un producto, una baja calidad del

producto implica una disminución de su confiabilidad; entonces, la probabilidad de que un equipo desempeñe satisfactoriamente las funciones para los cuales es diseñado, durante un periodo de tiempo específico y bajo las condiciones de operación, ambientales y del entorno se definen como confiabilidad. (Aguero Marcelo & Ramirez Gonzales, 2020)

### ***2.2.9. Método Montecarlo***

El Método Monte Carlo es atribuido a Stanislav Ulam y a John Von Neumann en el año 1944 mientras realizaba una partida de solitario. En una de las partidas surgió la interrogante de cuál debería ser la probabilidad, que, repartidas las cartas, puede resultar ganador. Es así que dedujo que para hallar dicha probabilidad de éxito es mucho más sencillo jugar repetidas veces y estimar un porcentaje. En base a ello, se realizó un comparativo entre el resultado de la probabilidad utilizando el Método Monte Carlo y aplicando una función para la interrogante generando resultados muy similares. En otras palabras, el Método Monte Carlo es un procedimiento que genera puntos aleatorios en intervalos predefinido con el fin de poder hallar puntos de éxitos que hay por debajo de una función determinada.

¿Por qué el Método de Monte Carlo es tan importante hoy en día?

Desde el comienzo de la computación electrónica, las personas se han interesado en la realización de experimentos aleatorios en un ordenador. Las técnicas Monte Carlo son ahora un ingrediente esencial en mucha de las investigaciones cuantitativas. Este método ha evolucionado de una solución como último recurso a una metodología líder que está impregnada mucho en la ciencia contemporánea, las finanzas y la ingeniería. (Zuluaga, 2023)

### ***2.2.10. Simulación de Montecarlo aplicada a minería***

La simulación de Montecarlo es una técnica estadística basada en el uso de números aleatorios y distribución de probabilidad para modelar la incertidumbre en sistemas complejos. En

el ámbito de la minería, esta herramienta permite estimar el comportamiento futuro de variables operativas como la productividad, la confiabilidad y el uso de equipos, mediante la generación de múltiples escenarios posibles. Según Kroese et al. (2014), esta técnica es particularmente útil en entornos con alta variabilidad, como lo es la operación de maquinaria pesada, donde intervienen múltiples factores como clima, condiciones del terreno, desempeño humano y fallas técnicas.

En el contexto de esta tesis, la simulación de Montecarlo se aplica para modelar el comportamiento probabilístico de indicadores clave de desempeño (KPIs) de los equipos utilizados en la construcción de una plataforma minera. Al realizar miles de iteraciones con distintos valores de entrada ajustados a distribuciones estadísticas reales, se obtiene una representación más precisa de las fluctuaciones operativas, lo que facilita la toma de decisiones en cuanto a programación de mantenimiento, asignación de recursos y mejora de la eficiencia. (Anchiraico Giraldo & Rojas Oré, 2020)

### ***2.2.11. Indicadores clave de desempeño (kpis) en maquinaria minera***

Los KPIs (Key Performance Indicators) son métricas cuantificables que permiten evaluar el rendimiento operativo de equipos en minería. Algunos de los más relevantes en actividades de carguío y movimiento de tierras son:

- Toneladas por cuchara (ton/cuch): mide la eficiencia del equipo de carguío en relación a la capacidad de su cucharón y el tipo de material movido.
- Tiempo por ciclo (hr/ciclo): representa el tiempo que toma un equipo en realizar un ciclo completo de trabajo (carga, transporte, descarga y retorno).
- Horas por guardia (hr/guardia): mide el tiempo efectivo de operación por jornada, considerando interrupciones operativas.

- Metros cúbicos movidos por hora ( $m^3/hr$ ): refleja el volumen total de material movilizado por unidad de tiempo, integrando la eficiencia operativa.

Estos indicadores permiten comparar el rendimiento real frente al rendimiento esperado o nominal de cada equipo, lo que es clave para detectar desviaciones, planificar mantenimientos correctivos y optimizar el uso de recursos atribuido. (Arenas Ramos, 2021)

### ***2.2.12. Lenguaje de programación r***

R es un lenguaje de programación usado en la ciencia de datos. Es un producto de código abierto que permite un libre acceso a la herramienta sin necesidad de pagar licencia. Al ser de uso libre es posible realizar colaboraciones en proyectos ya iniciados o alimentar la herramienta diseñando o programando “paquetes” para realizar algunas tareas específicas dentro de R. R ofrece un manejo y almacenamiento efectivo de los datos, permite realizar cálculos con matrices, librerías para el análisis de datos, herramientas gráficas para la visualización de datos, un formato para visualizar los datos en diferentes formatos como Pdf, Word o en línea. Permite la manipulación, procesamiento y visualización gráfica de los datos creando visualizaciones de alta calidad, dashboards para visualización y análisis de datos, creación de informes y análisis estadísticos para ahondar en el conocimiento de los datos. (Zuluaga, 2023)

### ***2.2.13. Costos mineros***

Todo negocio, como la minería y la metalúrgica consiste en satisfacer la demanda del mercado vendiéndote un producto o servicio por más dinero de lo que cuesta su producción, de manera que permita obtener una utilidad. Conocer los costos de la empresa es un elemento clave de la correcta gestión empresarial, para que el esfuerzo y la energía que se interviene en la empresa den los frutos esperados. Por otra parte, no existen decisiones empresariales que de alguna forma no influyan en los costos de una empresa. Es por eso imperativo que las decisiones a tomarse

tengan la suficiente calidad, para garantizar el buen desenvolvimiento de estas. Como se ve, el cálculo de costo es uno de los instrumentos más importantes para la toma de decisiones y se puede decir que no basta con tener conocimientos técnicos adecuados, sino que es necesario considerar la incidencia de cualquier decisión en este sentido y las posibles o eventuales consecuencias que pueda generar. (Barreto Taípe, 2017)

#### ***2.2.14. Costos fijos***

Son aquellos costos cuyo importe permanece constante, independiente del nivel de actividad de la empresa; de manera tal que se realice o no la producción, se venda o no la mercadería o servicio, dichos costos igual deben ser solventados por la empresa. (Besio Fernandez, 2014)

- Sueldos y salarios fijos y sus respectivas prestaciones
- Alquileres
- Mantenimiento de máquinas y equipos de producción.

#### ***2.2.15. Costos variables***

Son aquellos costos que varían en forma proporcional de acuerdo con el nivel de producción o actividad de la empresa. Son los costos por producir o vender. (Amable Salazar, 2017)

- Insumos y repuestos.
- Materias primas directas.
- Mano de obra con pagos honorarios.
- Comisiones sobre las ventas.

#### ***2.2.16. Costos de operación***

El Costo de Operación es la suma de los Costos Directos más los Costos Indirectos.

### **2.2.16.1. Costo indirecto**

Es la suma de gastos técnico – administrativos necesarios para la correcta realización de cualquier proceso productivo. Están relacionados con la mano de obra, materiales y equipos que no están directamente relacionados con la producción. Dentro de la estructura de costos, se expresan de manera porcentual representando los Gastos Generales de Operación (Arenas Ramos, 2021).

### **2.2.16.2. Costo directo**

Se define como: la suma de mano de obra, materiales y equipo necesario para la realización de un proceso productivo. Está relacionado directamente con la producción.

### ***2.2.17. Definición de términos básicos***

- ❖ **RENDIMIENTO.** El rendimiento de un equipo específico se refiere al volumen o peso de producción teórica que se puede lograr en una unidad de tiempo. Por lo general, se expresa en términos de producción por hora, pero también se puede utilizar la tasa por turno o día.
- ❖ **PRODUCCIÓN.** El volumen o peso total de material a ser manejado en una operación particular, ya sea el mineral con valor económico que se extrae o el estéril que se debe remover para acceder a él. A menudo, la producción de mineral se mide en unidades de peso, mientras que el movimiento de estéril se expresa en volumen.
- ❖ **PRODUCTIVIDAD.** La productividad se refiere a la capacidad de producir más utilizando menos recursos, lo cual resulta en costos más bajos al utilizar la cantidad adecuada de equipos de carguío y transporte, lo que permite reducir los presupuestos.
- ❖ **CARGUÍO.** Corresponde a una operación de carga de mineral y/o desmonte a los camiones volquetes, para que sean trasladados hacia a la planta concentradora o hacia una cancha de

acumulación de mineral. En esta operación se incluyen tareas de remoción y acopio del material fragmentado.

- ❖ **ACARREO.** Se denomina acarreo al traslado corto de material roto en la mina, es decir que el transporte tiene limitaciones, o tiene un determinado radio de acción y estarán ubicados en los frentes de operación, efectuados por camiones volquetes.
- ❖ **CAPACIDAD DE CARGA.** Se refiere al volumen de material que una unidad de carguío o transporte puede contener en un momento dado (por ejemplo, el volumen del balde de una pala o de la tolva de un camión). La capacidad se puede expresar de dos maneras:
  - *Capacidad al ras:* El volumen de material en una unidad de carguío o transporte cuando es llenado hasta el tope, pero sin material sobre los lados o llevado en algún accesorio externo como los dientes del balde.
  - *Capacidad colmada:* Máximo volumen de material que una unidad de carguío o transporte puede manejar cuando el material es acumulado sobre los lados del contenedor. Mientras que la capacidad rasa es una constante para un equipo dado, la capacidad colmada depende del material transportado y de sus propiedades (tamaño de granos, ángulo de reposo, etc.)
- ❖ **CAPACIDAD DE CARGA NOMINAL.** Es la capacidad de fábrica de un determinado equipo, en términos del peso máximo que puede manejar. La mayoría de los equipos están diseñados para movilizar un determinado peso, en lugar de un volumen máximo. Por lo tanto, el volumen de material manejado dependerá de la densidad del material, y variará con la densidad para un mismo equipo, mientras que el peso máximo es constante y es una función de la resistencia de los componentes del equipo.
- ❖ **FACTOR DE ESPONJAMIENTO.** El incremento fraccional del volumen del material que ocurre cuando está fragmentado y ha sido sacado de su estado natural (volumen in situ) y

depositado en un sitio no confinado (volumen no confinado). Puede expresarse como una fracción decimal o como un porcentaje.

- ❖ **FACTOR DE LLENADO.** Un ajuste de la capacidad de llenado del cazo o tolva de equipos de carguío y transporte. Se expresa generalmente como una fracción decimal y corrige la capacidad del caso y tolva al volumen que realmente puede mover, dependiendo de las características del material y su ángulo de reposo y la habilidad del operador del equipo para efectuar la maniobra de llenado.
- ❖ **TIEMPO DE CICLO.** El tiempo de ciclo corresponde al tiempo que el equipo de carguío demora en ir al lugar de extracción de material y transportarlo al sitio de descarga incluye además el tiempo ocupado en maniobras realizadas en esta operación. El tiempo de ciclo está compuesto por los tiempos fijos y los tiempos variables. Los primeros dependen de las condiciones bajo las cuales opera el equipo. Los tiempos variables además de depender de las condiciones de trabajo, varían según la longitud de los tramos a recorrer y la velocidad que en éstos se desarrolle.
- ❖ **MINA.** Yacimiento de donde se extrae el mineral rentable mediante un sistema productivo. La extracción se efectúa por etapas: primero se hace exploraciones.
- ❖ **YACIMIENTO.** Depósito natural de rocas o mineral rentable, donde generalmente se abre una mina.
- ❖ **MINERÍA SUPERFICIAL.** También llamada minería a Cielo Abierto, este tipo de minería se desarrolla en la superficie del terreno y es caracterizada por el uso de Equipos a mediana o gran escala (Ton) y por extraer grandes cantidades de mineral y desmonte.

## **2.3.Hipótesis**

### ***2.3.1. Hipótesis general***

- “Con la aplicación de la simulación de Montecarlo se logra evaluar indicadores de rendimiento para mejorar la producción de los equipos en la construcción de la plataforma Dh21-007 en via Ticona tajo Ferrobamba sur – Unidad Minera las Bambas - Apurímac”.

### ***2.3.2. Hipótesis específicas***

- El análisis de las condiciones actuales de los equipos involucrados en la construcción de la plataforma Dh21-007 permite identificar oportunidades de mejora operativas.
- La simulación de Montecarlo permite evaluar indicadores para optimizar las operaciones normales en la construcción de la plataforma Dh21-007.
- Se identificaron una variación importante en los costos de alquiler de equipos, mediante el análisis de los indicadores deficientes.

### ***2.3.3. Variables e indicadores***

#### **2.3.3.1. Variable independiente**

X1: Aplicación de la simulación de Montecarlo

#### **2.3.3.2. Variable dependiente**

Y1: Indicadores para mejorar la producción de los equipos.

## 2.4.Operacionalización de las variables

**Tabla 1**

*Operacionalización de las variables*

<b>Variable</b>	<b>Dimensión</b>	<b>Indicador</b>	<b>Definición del Indicador</b>	<b>Unidad de Medida</b>	<b>Instrumento</b>
<b>Variable Independiente :</b>					
Aplicación de la simulación de Montecarlo	Modelado de incertidumbre	Valor de dispersión	Variabilidad de los indicadores simulados frente a los valores reales	% de desviación	Hojas de cálculo y código R
	Generación de escenarios	Número de iteraciones	Cantidad de ejecuciones simuladas para obtener resultados representativos	Iteraciones	Script de simulación
	Ajuste de distribución	Tipo de distribución estadística	Forma de distribución utilizada (normal, triangular, uniforme) para el modelamiento	Cualitativo	Modelo probabilístico
	Validación del modelo	Comparación simulación vs. histórico	Grado de ajuste entre resultados simulados y datos reales operativos	% de ajuste	Comparativo gráfico / Excel
<b>Variable Dependiente:</b>					
Indicadores de desempeño de equipos	Productividad operativa	Toneladas por cuchara (ton/cuch)	Peso de material movido en cada ciclo de carga	Ton/ciclo	Reporte horómetro / Excel

		Metros cúbicos por hora (m <sup>3</sup> /hr)	Volumen de material movido por equipo por cada hora de trabajo efectivo	m <sup>3</sup> /hora	Registro de operaciones
	Eficiencia temporal	Tiempo por ciclo (hr/ciclo)	Tiempo requerido por un equipo para completar un ciclo completo	Horas/ciclo	Cronometría / hoja de campo
		Horas por guardia (hr/guardia)	Tiempo neto de operación efectiva por turno o jornada	Horas/guardia	Horómetro / formato diario
	Desempeño comparativo	Desviación entre rendimiento real y nominal	Diferencia porcentual entre la capacidad nominal del equipo y su rendimiento observado	% de desviación	Análisis comparativo

Fuente: Elaboración Propia

## CAPÍTULO III

### METODOLOGIA DE LA INVESTIGACIÓN

#### 3.1. Tipo de investigación

La presente investigación es del tipo cuantitativa, ya que la investigación a realizar utiliza datos cuantitativos para analizar las técnicas de gestión de indicadores de carguío y acarreo. (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2014)

#### 3.2. Nivel de investigación

De acuerdo con los alcances de la investigación, la presente investigación es:

**Correlacional**, ya que tiene como finalidad conocer la relación que exista entre dos o más conceptos o variables en una muestra o contexto en particular. (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2014)

**Descriptiva**, ya que comprende la colección de datos para probar una hipótesis o responder a preguntas concernientes a la situación corriente de los sujetos que intervienen en el estudio. Un estudio descriptivo determina los modos de ser de los objetos. (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2014)

**Evaluativa**, ya que la investigación evalúa la correlación de datos entre dos o más variables.

**Predictiva**, ya que la investigación predice la obtención de resultados mediante un proceso de simulación probabilística.

### **3.3. Diseño de la investigación**

De acuerdo con los diseños de la investigación, la presente investigación es:

*No experimental*, de corte transversal, ya que la recolección de datos se hizo en un solo periodo de tiempo. (Ñaupas Paitan, 2018)

### **3.4. Población**

La población de la investigación considerada es el total de Equipos de línea amarilla por la empresa EPSA en la unidad minera Las Bambas.

### **3.5. Muestra**

La muestra para la investigación se delimita a los equipos de línea amarilla utilizados en la plataforma Dh21-007 en vía ticona tajo ferrobamba sur – Unidad Minera las Bambas - Apurímac

### **3.6. Técnicas e instrumentos de captura de información**

La presente investigación, al abordar un análisis cuantitativo del desempeño de maquinaria en un contexto de alta variabilidad operativa, requiere una recolección precisa y sistemática de datos operativos, técnicos y estadísticos. Por tal motivo, se emplearon técnicas estructuradas que permiten capturar tanto datos empíricos como registros documentales formales provenientes de operaciones en campo.

#### ***3.6.1. Técnicas de recolección de datos***

- **Observación estructurada y directa en campo**

Se realizó una observación sistemática sobre el comportamiento operativo de los equipos de línea amarilla utilizados en la construcción de la plataforma DH21-007.

Esta observación se enfocó en los tiempos de ciclo, las horas de operación efectiva por turno y los tiempos no programados. Se utilizó un formato guía diseñado para registrar estos datos de manera estandarizada. La observación fue ejecutada por el

investigador en jornadas previamente planificadas, y se realizó en turnos diurnos y nocturnos durante un periodo de muestreo de cuatro semanas.

- **Ficha documental técnica, de archivos digitales y sensores operativos**

Esta técnica consistió en el análisis de reportes técnicos oficiales de la empresa EPSA, incluyendo reportes de horómetros, partes de operación diaria, bitácoras de mantenimiento, manuales del fabricante, y reportes de supervisión interna. Esta fuente secundaria permitió complementar la observación con datos históricos y técnicos sobre cada equipo, necesarios para alimentar el modelo de simulación.

Se analizaron hojas de cálculo y archivos generados por sistemas de monitoreo (data.xlsx y Reporte Horómetros diciembre\_2024.xlsx), los cuales contienen datos crudos exportados desde sistemas de control de flota, necesarios para construir las series de tiempo sobre los KPIs evaluados.

### ***3.6.2. Instrumentos de recolección de datos***

- **Guía de observación estructurada**

Instrumento diseñado específicamente para registrar variables como inicio y fin de cada ciclo, tiempos muertos, número de ciclos completados por hora y condiciones del terreno. La guía fue validada con supervisores operativos para asegurar su aplicabilidad en campo.

1. Observación 1: Equipos de línea amarilla en movimiento, Horas trabajadas, Horómetros antes y después de la labor, Rendimientos, número de viajes.
2. Observación 2: Distancias de acarreo, tiempo de ciclo , rendimientos horarios.

- **Ficha de registro documental**

Se utilizó un formato estandarizado para extraer y organizar información de documentos como partes de trabajo, reportes de mantenimiento, manuales técnicos, hojas de especificaciones y bitácoras. Esta ficha permitió codificar datos de manera uniforme para su posterior análisis en Excel y R.

- **Script de procesamiento en lenguaje R**

Se elaboró un código en lenguaje R que integra los datos obtenidos en campo y documentación técnica para ejecutar la simulación de Montecarlo, validando así los escenarios operativos frente a los valores históricos. Este código es parte del instrumento técnico de validación de datos mediante simulación probabilística.

### **3.7. Técnicas de procesamiento de datos**

La información recolectada será evaluada y analizada con el objetivo de identificar los parámetros en la operación para lo cual se hará uso de:

- Microsoft Excel.
- Lenguaje de Programación R
- Microsoft Office

## **CAPÍTULO IV**

### **EVALUACIÓN DE INDICADORES DE EQUIPOS Y SU IMPLICANCIAS DE LA SIMULACIÓN DE MONTECARLO EN LA**

El presente capítulo tiene como finalidad describir detalladamente la metodología aplicada en la evaluación de los indicadores de los equipos implicados en la construcción de la plataforma DH21-007 en vía Ticona Tajo Ferrobamba Sur, utilizando la técnica de simulación de Montecarlo dentro del contexto operativo de la Unidad Minera Las Bambas – Apurímac. Se expondrán los procesos metodológicos empleados para la recopilación, procesamiento y análisis de los datos, así como los resultados obtenidos a partir de la simulación computacional, con el propósito de validar la eficiencia y desempeño de los equipos involucrados en la ejecución del proyecto.

El desarrollo de este capítulo se estructura en dos grandes secciones: en primer lugar, se presenta el procedimiento detallado que abarca la recolección de información, las herramientas utilizadas y la justificación del método de simulación aplicado. En segundo lugar, se analizan los resultados obtenidos a partir de la simulación de Montecarlo, estableciendo comparaciones con estándares de eficiencia operativa y criterios de desempeño previamente definidos para el sector minero.

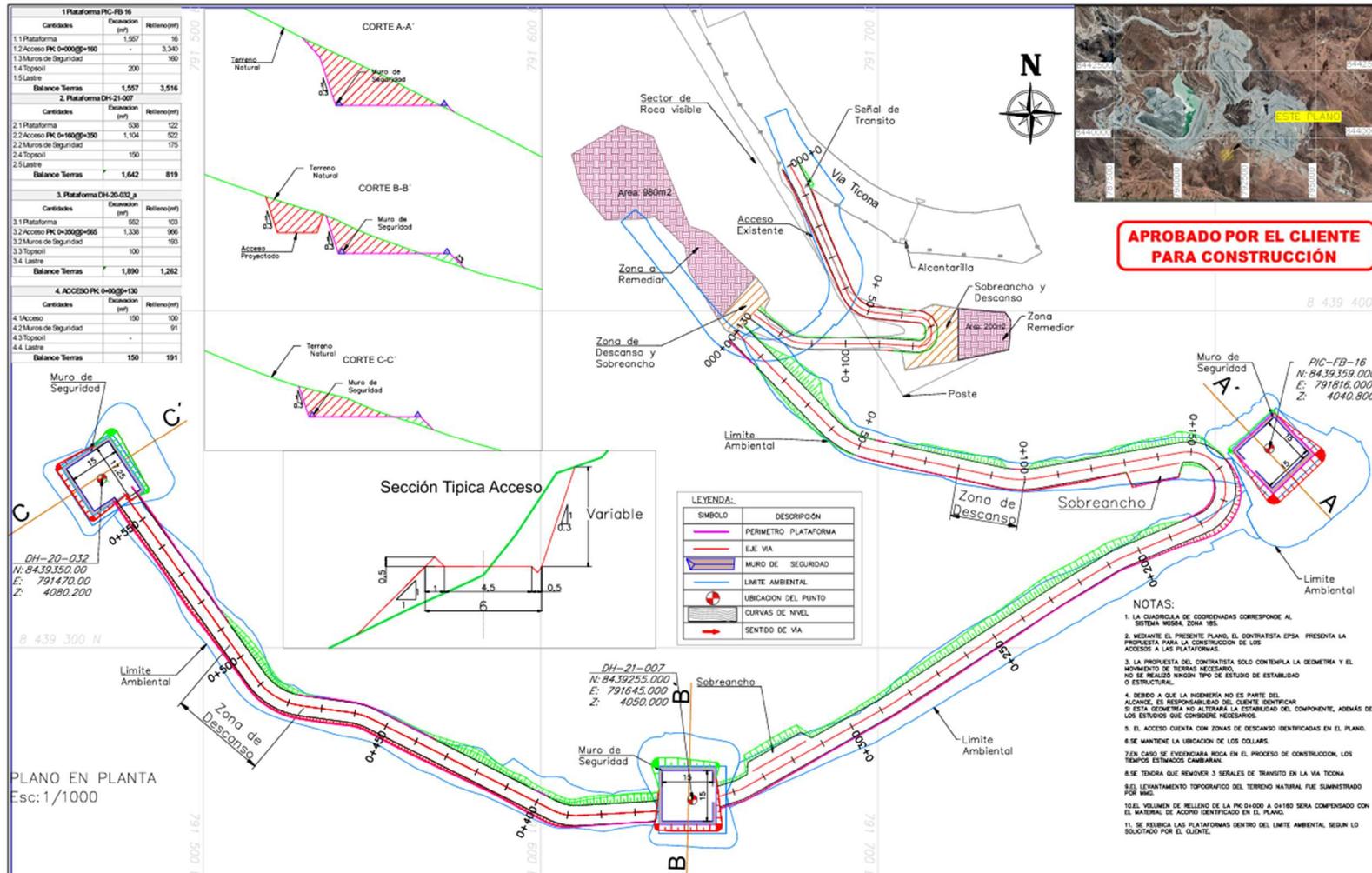
Para la correcta estructuración del procedimiento, se han considerado aspectos fundamentales tales como la identificación de las variables críticas que influyen en el rendimiento de los equipos, la determinación de parámetros de entrada para la simulación y la evaluación de los escenarios más representativos dentro del entorno minero. En este sentido, se ha llevado a cabo una recopilación exhaustiva de información a partir de registros operacionales, mediciones en campo y consultas con expertos del sector, con el fin de garantizar la fiabilidad de los datos utilizados en la modelación.

El enfoque metodológico se fundamenta en la implementación de la simulación de Montecarlo como herramienta de análisis probabilístico para la evaluación de la incertidumbre en los indicadores clave de desempeño (KPIs) de los equipos involucrados. Dicha técnica permite modelar la variabilidad inherente a los procesos constructivos y operacionales, brindando así una visión más precisa de la distribución probabilística de los valores de desempeño esperados. Con ello, se busca identificar posibles puntos de mejora y optimización dentro de la gestión de los equipos utilizados en la construcción de la plataforma.

En la sección de resultados, se presentan los hallazgos más relevantes derivados de la simulación, incluyendo la estimación de tiempos de operación, rendimientos de los equipos, tasas de disponibilidad y confiabilidad, así como los niveles de productividad alcanzados bajo distintos escenarios simulados. Asimismo, se comparan los valores obtenidos con métricas de referencia de la industria, permitiendo así evaluar la viabilidad de optimización de los recursos empleados en la obra. Con relación a la contextualización de la plataforma se tiene el siguiente plano referencial.

Figura 2

Plano de la plataforma



Fuente: Elaboración Propia

#### **4.1. Diagnóstico actual de los equipos implicados en la construcción de la plataforma**

##### **dh21-007**

Se ha desarrollado una descripción técnica detallada del estado actual de los equipos implicados en la construcción de la plataforma DH21-007, basándose en información real de operación, registros de horómetros, partes de mantenimiento y condiciones del entorno minero. La caracterización se ha realizado para los siguientes equipos clave:

- **Tractor de Cadenas CAT D8T:** Análisis de disponibilidad mecánica, potencia de empuje, condiciones de desgaste y consumo.
- **Excavadora Hidráulica CAT 336:** Revisión de tiempos por ciclo, profundidad de excavación, capacidad del cucharón y rendimiento estimado en m<sup>3</sup>/h.
- **Retroexcavadora JCB 3CX:** Evaluación de uso auxiliar, velocidad de desplazamiento y productividad por hora.
- **Rodillo Vibratorio BOMAG BW211D-40:** Estudio de eficiencia en la compactación por tipo de suelo, consumo de combustible y capacidad vibratoria.

Para cada uno de estos equipos se evaluaron cuatro indicadores clave de desempeño (KPIs):

- Toneladas por cuchara (ton/cuch)
- Tiempo por ciclo (hr/ciclo)
- Horas por guardia (hr/guardia)
- Metros cúbicos por hora (m<sup>3</sup>/h)

Los valores obtenidos se contrastaron con los parámetros técnicos nominales establecidos por el fabricante, y con los reportes operativos del mes de diciembre de 2024, identificando brechas de desempeño, tiempos de inactividad no programada y oportunidades de mejora.

La simulación de Montecarlo fue aplicada como herramienta central para modelar la incertidumbre inherente al desempeño de los equipos. El proceso se describe de forma estructurada en cinco fases:

- Identificación de variables y parámetros críticos

Se seleccionaron los indicadores que presentaban mayor variabilidad durante las operaciones reales. Estos se modelaron como variables aleatorias, con base en series de datos históricos y observaciones en campo.

- Ajuste de distribuciones estadísticas

Cada KPI fue ajustado a una distribución estadística apropiada (triangular, normal o uniforme), empleando pruebas de bondad de ajuste en lenguaje R, utilizando librerías `fitdistrplus` y `EnvStats`. Por ejemplo:

- El tiempo por ciclo fue modelado como distribución triangular.
- Las toneladas por cuchara siguieron una distribución normal truncada.

- Implementación computacional

Se implementó un script en lenguaje R que simula entre 5,000 y 10,000 iteraciones por cada indicador, generando curvas de frecuencia acumulada, histogramas y rangos de confianza para cada escenario evaluado. El modelo considera variaciones por equipo, operador y condiciones del terreno.

- Construcción de escenarios simulados

Se generaron tres escenarios principales:

- Escenario base: reproduce condiciones operativas tal como se registraron.
- Escenario optimizado: aplica mejoras como mantenimiento preventivo ajustado y optimización de turnos.

- Escenario adverso: considera reducción de disponibilidad por fallas o clima.
- Validación y comparación con datos reales

Los resultados simulados fueron contrastados con los datos reales del archivo Reporte Horómetros diciembre\_2024.xlsx, permitiendo validar el modelo con desviaciones menores al  $\pm 10\%$  en los valores medios. Esto confirmó la confiabilidad de la simulación como herramienta predictiva.

El diagnóstico actual de los equipos involucrados en la construcción de la plataforma DH21-007 en vía Ticona Tajo Ferrobamba Sur constituye un paso fundamental para evaluar su desempeño operativo y definir estrategias que permitan optimizar su rendimiento. En la minería, la gestión eficiente de la maquinaria pesada es esencial para garantizar la productividad, reducir costos y minimizar tiempos de inactividad.

La caracterización del estado actual de los equipos es crucial para la toma de decisiones informadas en la optimización de los procesos constructivos y operativos dentro del ámbito minero. Un diagnóstico preciso permite no solo identificar posibles deficiencias en el rendimiento de los equipos, sino también establecer planes de mantenimiento preventivo y correctivo, evaluar la viabilidad del reemplazo de equipos obsoletos y optimizar la asignación de recursos.

En esta sección se lleva a cabo un análisis exhaustivo de los equipos involucrados en la construcción de la plataforma, considerando aspectos como disponibilidad, confiabilidad y eficiencia en el uso de recursos. Se examinan registros operacionales, reportes de mantenimiento y condiciones de operación en campo, con el objetivo de identificar patrones de desempeño, factores de riesgo y oportunidades de mejora. Además, se comparan los valores actuales con estándares de referencia en la industria minera, lo que permite determinar desviaciones y áreas en las que es posible intervenir para aumentar la eficiencia del proyecto.

#### ***4.1.1. Análisis del estado operativo de los equipos***

El análisis del estado operativo de los equipos es una actividad crítica dentro del proceso de diagnóstico, ya que permite conocer a fondo el desempeño real de la maquinaria empleada en la construcción de la plataforma DH21-007. Este análisis involucra la evaluación de diversos parámetros técnicos y operacionales que inciden directamente en la productividad del proyecto.

Uno de los aspectos clave en este análisis es la disponibilidad mecánica de los equipos, la cual se define como el porcentaje de tiempo en el que un equipo está en condiciones de operar sin restricciones. Una baja disponibilidad puede estar relacionada con fallas mecánicas recurrentes, deficiencias en los programas de mantenimiento o problemas en el suministro de repuestos.

Otro factor importante es el tiempo de inactividad, que puede deberse a averías, mantenimientos programados o incluso a problemas logísticos que impiden el uso eficiente de la maquinaria. Se evalúan los registros de mantenimiento para identificar patrones de fallos y determinar si los tiempos de parada de los equipos pueden reducirse mediante ajustes en la planificación y gestión de repuestos.

Además, se considera el rendimiento de los equipos en función de su capacidad nominal, lo que permite evaluar la eficiencia con la que están operando en condiciones reales. Este análisis incluye la medición de ciclos de trabajo, capacidad de carga efectiva y tasas de productividad en función del tipo de material y las condiciones del terreno.

Para complementar el análisis, se realiza un estudio del estado de conservación de los equipos, tomando en cuenta su antigüedad, el historial de reparaciones y su adecuación a las condiciones específicas del terreno en la Unidad Minera Las Bambas. Equipos en mal estado pueden representar un riesgo para la seguridad y la eficiencia operativa, lo que hace necesario evaluar si es conveniente su sustitución o la implementación de un plan de reacondicionamiento.

El análisis del estado operativo de los equipos utilizados en la construcción de la plataforma DH21-007 en la Unidad Minera Las Bambas es fundamental para evaluar la productividad y eficiencia de la maquinaria. Se han considerado cuatro equipos clave: el Tractor de Cadenas Cat® D8T, la Excavadora Hidráulica Cat® 336, la Retroexcavadora JCB 3CX y el Rodillo Vibratorio BOMAG BW211D-40, cada uno de los cuales juega un rol esencial en el proceso de construcción y compactación.

#### **4.1.1.1. Disponibilidad mecánica y estado operativo**

##### ***4.1.1.1.1. TRACTOR DE CADENAS CAT® D8T***

Este equipo es utilizado principalmente para el movimiento de tierra y nivelación del terreno. Su motor C15 ACERT de 273 kW (365 hp) le permite trabajar en condiciones severas, mientras que su peso en orden de trabajo de 38.351 kg le otorga estabilidad.

- **Disponibilidad mecánica:** Depende del mantenimiento de su sistema de transmisión automática y del sistema hidráulico de control de hoja. Un programa de mantenimiento preventivo enfocado en la lubricación de su capacidad de llenado de servicio (600 L de combustible, 155 L en el tren de fuerza, 65 L en bastidores de rodillos) puede minimizar tiempos de inactividad.
- **Tiempo de inactividad:** Se pueden generar paradas no programadas por desgaste en las zapatas de 2.743 mm de ancho o por fallas en la bomba hidráulica del sistema de inclinación de la hoja, que podría reducir la productividad en un 10 % si no se mantiene adecuadamente.
- **Rendimiento operativo:** Su hoja SU de 10,3 m<sup>3</sup> permite una eficiencia de empuje mejorada en comparación con modelos previos, moviendo hasta un 13 % más de material por pasada.

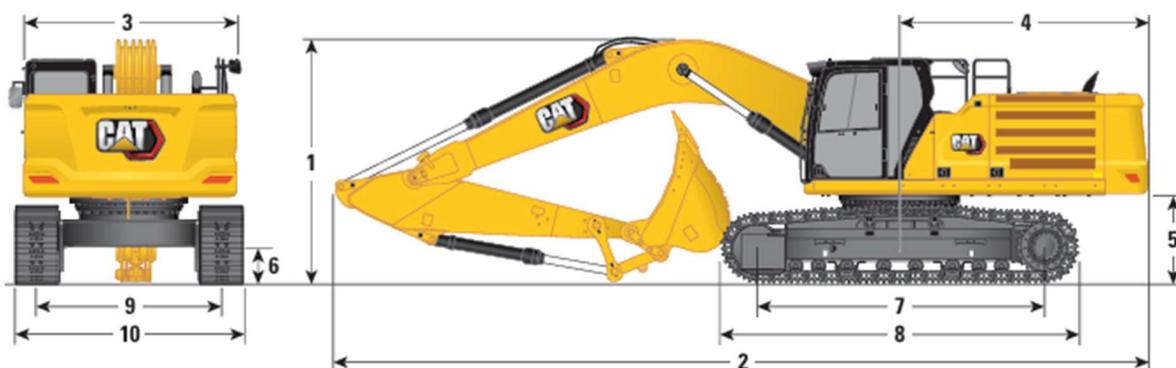
#### 4.1.1.1.2. EXCAVADORA HIDRÁULICA CAT® 336

La excavadora Cat 336 está diseñada para la remoción de material en terrenos de mediana y alta resistencia. Su motor C9.3B de 232 kW (311 hp) y su peso de operación de 37.600 kg permiten una alta productividad.

- **Disponibilidad mecánica:** Su estructura reforzada y su diseño hidráulico con flujo máximo de 558 L/min permiten ciclos de trabajo rápidos, aunque una incorrecta gestión de filtros y aceites en su tanque hidráulico de 161 L podría reducir su disponibilidad.
- **Tiempo de inactividad:** Las fallas más comunes incluyen desgaste en el varillaje del cucharón de hasta 2,40 m<sup>3</sup>, lo que afecta la fuerza de excavación (211 kN). La eficiencia del sistema de refrigeración con 40 L de capacidad en climas adversos es clave para evitar sobrecalentamientos.
- **Rendimiento operativo:** Su profundidad de excavación de 7.520 mm y altura de carga de 7.080 mm permite optimizar los ciclos de carga en camiones de acarreo, mejorando la productividad en hasta un 15 % con respecto a modelos anteriores.

**Figura 3**

*Especificaciones de la excavadora hidráulica 336 – Dimensiones*



Fuente: Ficha técnica Caterpillar 336 (Ferreyros Corp, 2024)

## Figura 4

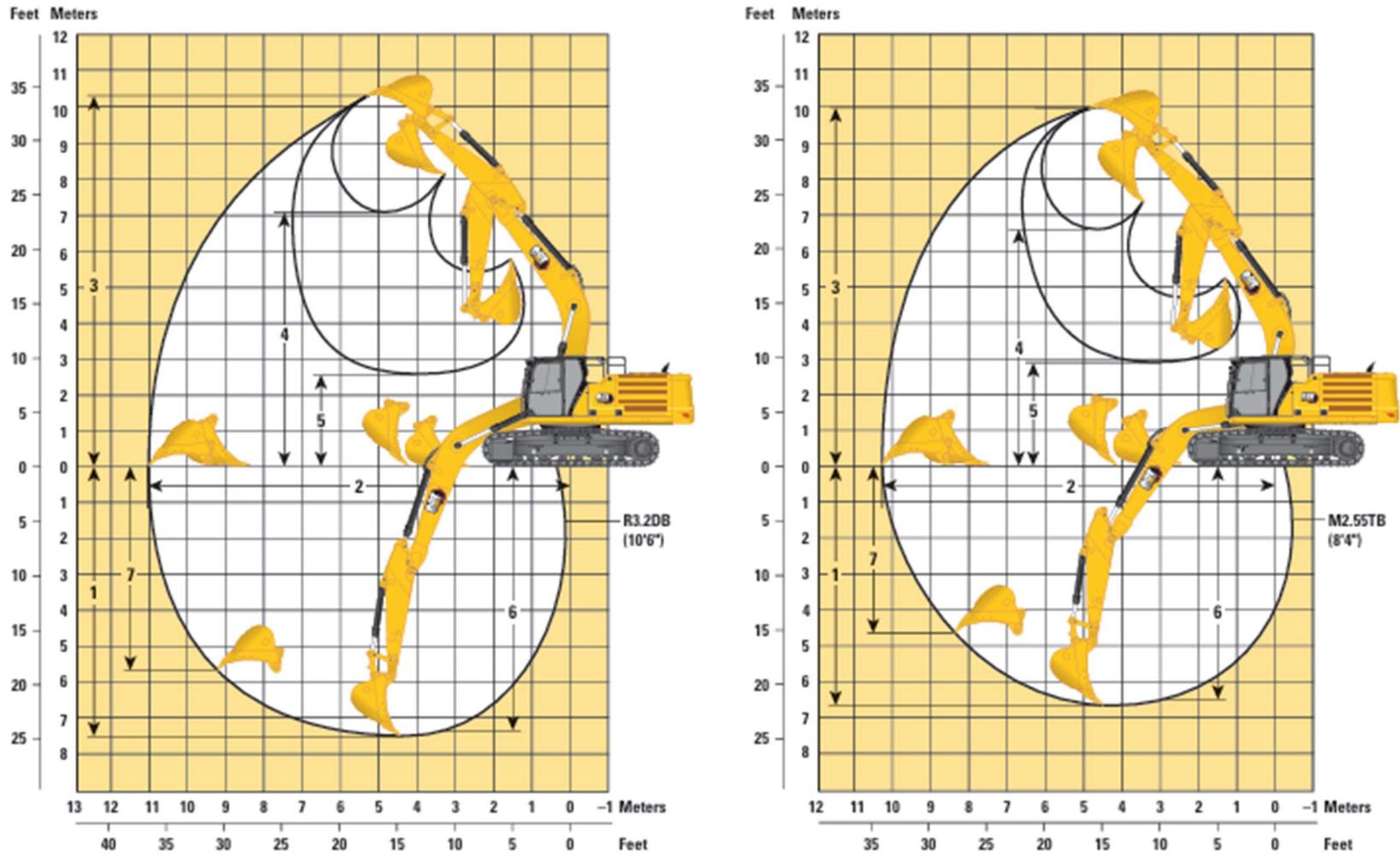
### Especificaciones de la excavadora hidráulica 336 – Dimensiones

<b>1 Altura de la máquina:</b>				
Altura de la cabina	3170 mm	10'5"	3170 mm	10'5"
Altura de la estructura de protección contra la caída de objetos (FOGS)	3310 mm	10'10"	3310 mm	10'10"
Altura del pasamanos	3160 mm	10'4"	3160 mm	10'4"
Con pluma/brazo/cucharón instalados	3470 mm	11'5"	3610 mm	11'10"
Con pluma/brazo instalados	3330 mm	10'10"	3400 mm	11'2"
Con pluma instalada	2880 mm	9'5"	2830 mm	9'3"
Con pluma/brazo/cucharón instalados (con líneas auxiliares)	3520 mm	11'7"	3620 mm	11'11"
Con pluma/brazo instalados (con líneas auxiliares)	3380 mm	11'1"	3420 mm	11'3"
Con pluma instalada (con líneas auxiliares)	2970 mm	9'9"	2900 mm	9'6"
<b>2 Longitud de la máquina:</b>				
Con pluma/brazo/cucharón instalados	11 170 mm	36'8"	10 890 mm	35'9"
Con pluma/brazo instalados	11 130 mm	36'6"	10 850 mm	35'7"
Con pluma instalada	9960 mm	32'8"	9640 mm	31'8"
Con pluma/brazo/cucharón instalados (con líneas auxiliares)	11 170 mm	36'8"	10 890 mm	35'9"
Con pluma/brazo instalados (con líneas auxiliares)	11 130 mm	36'6"	10 850 mm	35'7"
Con pluma instalada (con líneas auxiliares)	10 010 mm	32'10"	9640 mm	31'8"
<b>3 Ancho del bastidor superior sin pasarelas</b>	2970 mm	9'9"	2970 mm	9'9"
<b>4 Radio de balanceo de la cola</b>	3530 mm	11'7"	3530 mm	11'7"
<b>5 Espacio libre del contrapeso</b>	1250 mm	4'1"	1250 mm	4'1"
<b>6 Espacio libre sobre el suelo</b>	510 mm	1'8"	510 mm	1'8"
<b>7 Longitud de la cadena – longitud hasta el centro de los rodillos</b>	4040 mm	13'3"	4040 mm	13'3"
<b>8 Longitud de la cadena</b>	5030 mm	16'6"	5030 mm	16'6"
<b>9 Entrevía</b>	2590 mm	8'6"	2590 mm	8'6"
<b>10 Ancho de la cadena/ tren de rodaje:</b>				
Zapatas de 600 mm (24")	3190 mm	10'6"	3190 mm	10'6"
Zapatas de 700 mm (28")	3290 mm	10'10"	3290 mm	10'10"
Zapatas de 800 mm (31")	3390 mm	11'1"	3390 mm	11'1"
Tipo de cucharón		HD		SDS
Capacidad del cucharón	1,88 m <sup>3</sup>	2,46 yd <sup>3</sup>	2,40 m <sup>3</sup>	3,14 yd <sup>3</sup>
Radio de la punta del cucharón	1760 mm	5'9"	1800 mm	5'10"

Fuente: Ficha técnica Caterpillar 336 ( Ferreyros Corp, 2024)

**Figura 5**

*Especificaciones de la excavadora hidráulica 336 – Rangos y fuerzas de trabajo*



Fuente: Ficha técnica Caterpillar 336 ( Ferreyros Corp, 2024)

**Figura 6**

*Especificaciones de la excavadora hidráulica 336 – Rangos y fuerzas de trabajo*

Opciones de pluma	Pluma de alcance HD 6,5 m (21'4")		Pluma para excavación de gran volumen 6,18 m (20'3")	
Opciones de brazo	Brazo de alcance HD R3.2DB (10'6")		Brazo para excavación de gran volumen M2.55TB (8'4")	
1 Profundidad máxima de excavación	7520 mm	24'8"	6560 mm	21'6"
2 Alcance máximo a nivel del suelo	11 050 mm	36'3"	10 170 mm	33'4"
3 Altura máxima de corte	10 300 mm	33'10"	9940 mm	32'7"
4 Altura máxima de carga	7080 mm	23'3"	6710 mm	22'0"
5 Altura mínima de carga	2580 mm	8'6"	3020 mm	9'11"
6 Profundidad máxima de corte con fondo plano de 2440 mm (8'0")	7360 mm	24'2"	6380 mm	20'11"
7 Profundidad máxima de excavación en pared vertical	5660 mm	18'7"	5040 mm	16'6"
Fuerza de excavación del cucharón (ISO)	211 kN	47 460 lbf	290 kN	65 100 lbf
Fuerza de excavación del brazo (ISO)	167 kN	37 430 lbf	196 kN	43 970 lbf
Tipo de cucharón	HD		SDS	
Capacidad del cucharón	1,88 m <sup>3</sup>	2,46 yd <sup>3</sup>	2,40 m <sup>3</sup>	3,14 yd <sup>3</sup>
Radio de la punta del cucharón	1760 mm	5'9"	1800 mm	5'10"

Fuente: Ficha técnica Caterpillar 336 ( Ferreyros Corp, 2024)

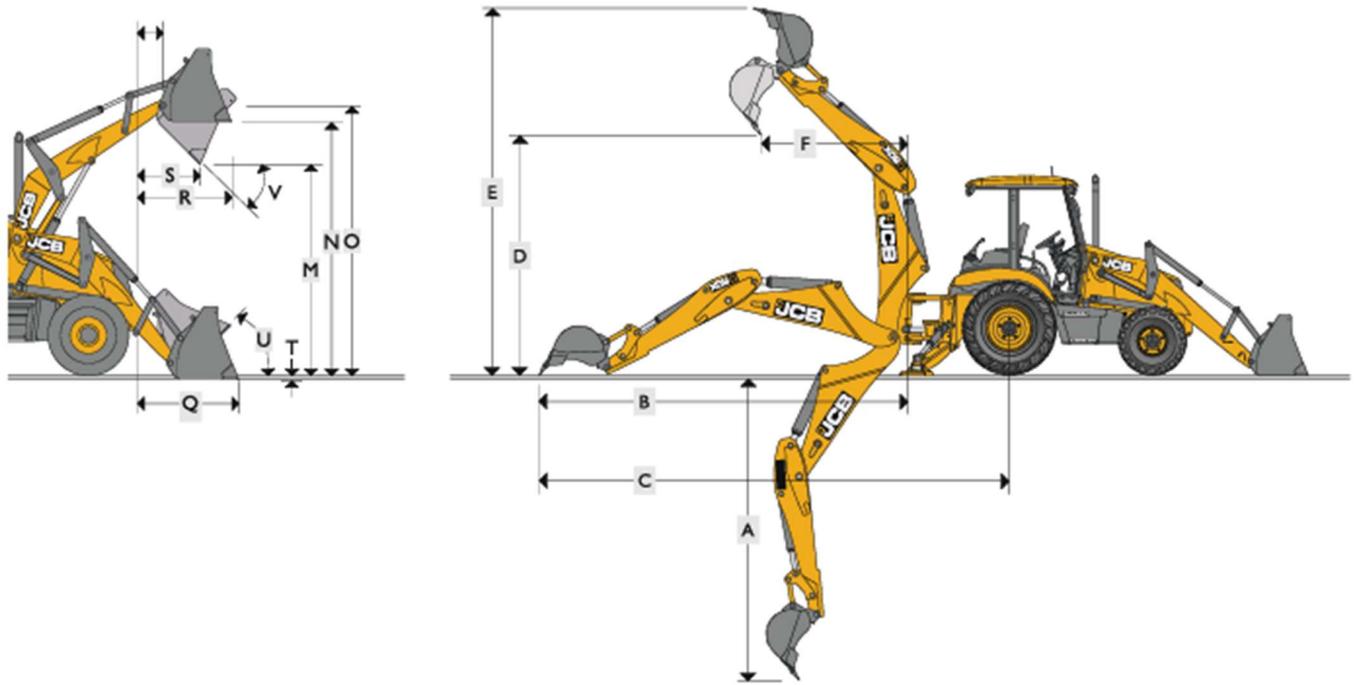
#### **4.1.1.1.3. RETROEXCAVADORA JCB 3CX**

Esta máquina versátil se usa para trabajos auxiliares de excavación y transporte de materiales en la obra.

- **Disponibilidad mecánica:** Debido a su tamaño compacto, suele presentar menores tiempos de inactividad si se mantienen los sistemas hidráulicos y de tracción en condiciones óptimas. Su motor de bajo consumo de combustible garantiza operaciones continuas sin interrupciones prolongadas.
- **Tiempo de inactividad:** Factores como el desgaste de los neumáticos o fallas en la transmisión pueden afectar su rendimiento en terrenos accidentados.
- **Rendimiento operativo:** Con una capacidad de excavación de hasta 5,5 metros y una velocidad de desplazamiento de hasta 40 km/h, permite una rápida movilidad dentro de la zona de trabajo.

**Figura 7**

*Retroexcavadora jcb 3cx – Rendimiento*



Fuente: Ficha técnica JCB ( Titan Group, 2023)

**Figura 8**

*Retroexcavadora jcb 3cx – Rendimiento*

<b>MOTOR</b>		
Fabricante		JCB
Aspiración		Turbocargado
Cilindrada	litro	4,4
No. de cilindros		4
Diámetro	mm	103
Carrera	mm	132
Velocidad del motor	rpm	2200
<b>Clasificaciones de potencia</b>		
HP bruto: SAE J1 995 (ISO 14396)	hp (kW)	92 (68,6)
<b>Torque máximo</b>		
Clasificación ISO 14396 (SAE J1995)	Nm	400
Torque máximo	rpm	1400

<b>Rendimiento de la excavadora</b>			<b>Balancín fijo</b>	<b>Balancín extensible</b>
A	Profundidad de excavación máxima	m	4,39	5,63
B	Alcance: nivel del suelo al centro del bastidor de giro	m	5,37	6,52
C	Alcance: nivel del suelo al centro de la rueda trasera	m	6,72	7,87
D	Alcance: a altura total al centro del bastidor de giro	m	2,74	3,66
E	Altura máxima de trabajo	m	5,53	6,35
F	Altura máxima de carga	m	3,84	4,72
G	Rotación del balde: potencia	grados	185°	185°
	Fuerza de arranque del balde	kgf	6324	6228
	Fuerza de arranque del balancín	kgf	3217	3225
<b>Rendimiento del cargador</b>			<b>GP</b>	<b>6 en 1</b>
M	Altura de descarga	m	2,74	2,72
N	Altura de carga	m	3,23	3,20
O	Altura del pasador	m	3,45	3,45
P	Alcance frontal del pasador	m	0,36	0,36
Q	Alcance a nivel del suelo	m	1,42	1,37
R	Alcance máximo a elevación completa	m	1,20	1,15
S	Alcance a altura máxima: balde descargado	m	0,83	0,78
T	Profundidad de excavación por debajo del nivel del suelo	m	0,07	0,10
U	Recogida a nivel del suelo	grados	45°	45°
V	Ángulo de descarga	grados	43°	43°
	Fuerza de arranque del balde	kgf	6170	6531
	Fuerza de arranque del brazo cargador	kgf	4942	4732
	Capacidad del balde estándar	m <sup>3</sup>	1,1 (balde GP)	1,0 (balde 6 en 1)
	Capacidad de elevación del cargador	kg	3495	3205

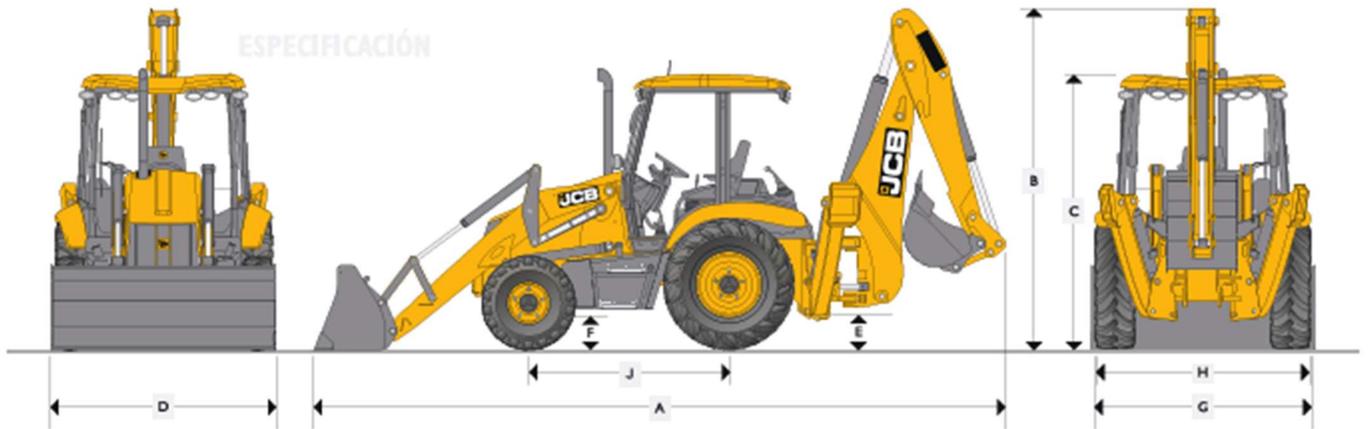
Fuente: Ficha técnica JCB ( Titan Group, 2023)

**Figura 9**

*Retroexcavadora jcb 3cx – Dimensiones*

**DIMENSIONES ESTÁTICAS**

Carga útil máxima del extremo del cargador: 1850kg    Altura de elevación máxima: 3,23 metros



Fuente: Ficha técnica JCB ( Titan Group, 2023)

**Figura 10**

*Retroexcavadora jcb 3cx – Dimensiones*

Tracción		4WD
A	Longitud de transporte	m 7,19
B	Altura de transporte: excavadora estándar	m 3,43
B	Altura de transporte: Extradig	m 3,53
C	Altura a la parte superior de la cabina/el techo	m 2,81
D	Ancho total con balde cargador	m 2,45
E	Despeje del suelo: bastidor principal	m 0,33
F	Despeje del suelo: eje frontal	m 0,34
G	Distancia entre ruedas delanteras	m 2,16
H	Distancia entre ruedas traseras	m 2,21
J	Base de llantas	m 2,17

Fuente: Ficha técnica JCB ( Titan Group, 2023)

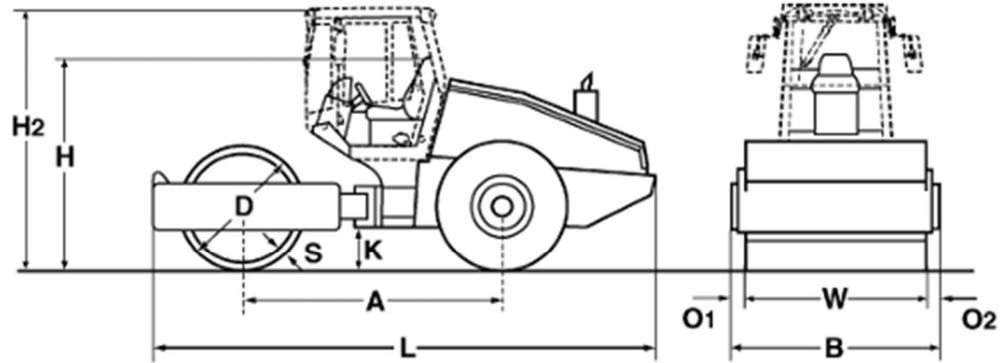
#### **4.1.1.1.4. RODILLO VIBRATORIO BOMAG BW211D-40**

Este equipo es esencial para la compactación del suelo y estabilización de la plataforma.

- **Disponibilidad mecánica:** Su motor Deutz BF4M 2012 C de 98 kW (132 hp) y su sistema de transmisión hidrostática permiten ciclos de compactación eficientes. Sin embargo, el mantenimiento del sistema de vibración es crucial para evitar tiempos de inactividad prolongados.
- **Tiempo de inactividad:** Problemas en el sistema de vibración pueden reducir la eficiencia de compactación, afectando la calidad del suelo. Además, la gestión del combustible (tanque de 250 L) es clave para garantizar jornadas continuas.
- **Rendimiento operativo:** Con una fuerza centrífuga de 236 kN, puede compactar capas de hasta 0,70 m en suelos de relleno de piedra, mejorando la estabilidad estructural de la plataforma.

**Figura 11**

*Especificaciones técnicas rodillos vibratorios – Dimensiones*



**Dimension en mm**

	A	B	D	H	H2	K	L	O1	O2	S	W
<b>BW 211 D-40</b>	2960	2250	1500	2268	2985	490	5840	60	60	25	2130
<b>BW 211 PD-40</b>	2960	2250	1480	2268	2985	490	5840	60	60	25	2130

Fuente: Ficha técnica Bomag( Komatsu Mitsui Group Peru, 2021)

**Figura 12**

*Especificaciones técnicas rodillos vibratorios*

<b>Especificaciones Técnicas</b>		<b>BOMAG BW 211 D-40</b>	<b>BOMAG BW 211 PD-40</b>
<b>Pesos</b>			
Peso de operación máx. ....	kg	13.000	12.620
Carga máx. en eje, rodillo CECE .....	kg	8.050	7.670
Carga máx. en eje, neumáticos CECE .....	kg	4.950	4.950
Peso funcionado CECE .....	kg	9.500	11.350
Carga en eje, rodillo CECE .....	kg	5.750	6.750
Carga en eje, neumáticos CECE .....	kg	3.750	4.600
Carga lineal estática CECE .....	kg/cm	27,0	
Carga lineal estática máx. CECE .....	kg/cm	37,8	
<b>Dimensiones</b>			
Ancho de trabajo .....	mm	2.130	2.130
Radio interior de giro .....	mm	3.494	3.494
<b>Características de conducción</b>			
Velocidad (1) .....	km/h	0- 6,0	0- 6,0
Velocidad (2) .....	km/h	0- 10,0	0- 10,0
Máxima pendiente sin/con vibración .....	%	45/43	49/46
<b>Propulsion</b>			
Fabricante del motor .....		Deutz	Deutz
Modelo .....		BF4M 2012 C	BF4M 2012 C
Nivel de emisión .....		Stage II / TIER2	Stage II / TIER2
Refrigeración .....		Líquido	Líquido
Número de cilindros .....		4	4
Rendimiento ISO 3046 .....	kW	98,0	98,0
Rendimiento SAE J 1995 .....	hp	132,0	132,0
Velocidad .....	min-1	2.300	2.300
Combustible .....		Diesel	Diesel
Equipo eléctrico .....	V	12	12
Sistema de transmisión .....		hidrost.	hidrost.
Rodillo propulsor .....		régular	régular
<b>Rodillos y Neumaticos</b>			
Medida de neumáticos .....		23.1-26/12PR	23.1-26/12PR
Número de patas de cabra .....			150
Altura de las patas de cabra .....	mm		100
Superficie de pata de cabra .....	cm2		137
<b>Frenos</b>			
Freno de servicio .....		hidrost.	hidrost.
Freno de estacionamiento .....		hidromec.	hidromec.
<b>Dirección</b>			
Sistema de dirección .....		artic. oscil.	artic. oscil.
Método de dirección .....		hidrost.	hidrost.
Angulo de dirección / oscilación +/- .....	grad	35/12	35/12
<b>Sistema de vibración</b>			
Accionamiento .....		hidrost.	hidrost.
Frecuencia .....	Hz	30/36	30/36
Amplitud .....	mm	1,80/0,95	1,70/0,86
Fuerza centrífuga .....	kN	236/170	275/202
Fuerza centrífuga .....	t	24,1/17,3	28,1/20,6
<b>Capacidades</b>			
Combustible .....	l	250,0	250,0

Fuente: Ficha técnica Bomag( Komatsu Mitsui Group Peru, 2021)

#### **4.1.1.1.5. MOTONIVELADORA CATERPILLAR® 14H**

La motoniveladora Caterpillar 14H es una máquina de alto rendimiento diseñada para ofrecer productividad, durabilidad y eficiencia en combustible. Incorpora un sistema de servotransmisión, motor potente, sistema hidráulico equilibrado y controles amigables para el operador. Su diseño busca reducir costos de mantenimiento, mejorar el confort del operador y cumplir estándares ambientales.

##### **Motor y Tren de Fuerza**

- Motor: Caterpillar 3306 DITA, 6 cilindros, turbocargado y posenfriado, con potencia neta de 160 kW (215 hp).
- Par máximo: 1076 Nm a 1200 rpm.
- Tren de fuerza: Transmisión directa con 8 velocidades de avance y 8 de retroceso, incluyendo un sistema de movimiento ultralento.
- Frenos: De disco en aceite, activados por aire, ubicados en cada rueda del tándem.

##### **Sistema Hidráulico**

- Sistema de detección de carga con bomba de caudal variable.
- Válvulas de control diseñadas por Caterpillar con baja resistencia y respuesta precisa.
- Incorpora válvulas de traba, válvulas de alivio y posición libre de la hoja.
- Control proporcional del flujo en operaciones simultáneas.

##### **Barra de Tiro, Círculo y Vertedera**

- Construcción resistente con insertos de desgaste reemplazables de nailon y metal.
- Vertedera: 4267 mm de largo, con opción a 4877 mm.
- Círculo: De una sola pieza, 360° de rotación, 64 dientes templados.

- Incluye embrague deslizante y acumuladores hidráulicos para proteger frente a impactos.

### **Puesto del Operador**

- Cabina espaciosa, con visibilidad de 360°, bajo nivel de ruido (<80 dB) y controles ergonómicos.
- Asiento anatómico con suspensión, calefacción y aire acondicionado opcionales.
- Sistema de monitoreo electrónico EMS con 3 niveles de advertencia.
- Espacio interior diseñado para confort: posavasos, compartimentos, y tomas de corriente.

### **Facilidad de Mantenimiento**

- Diseño modular de componentes (motor, transmisión, mandos finales).
- Fácil acceso a filtros, puntos de lubricación y válvulas de muestreo S•O•S.
- Cableado codificado por colores y numerado, con conectores resistentes a la intemperie.

### **Responsabilidad Ambiental**

- Emisiones bajas conforme a normas de la EPA, CARB y UE.
- Sistema de aire acondicionado sin CFC.
- Diseño que evita derrames: sellos de ranura, mangueras XT, lubricantes protegidos.
- Ruido exterior controlado a  $\leq 81$  dB(A).

### **Especificaciones Técnicas Principales**

<b>Característica</b>	<b>Valor</b>
Peso total	18,784 kg
Potencia neta	215 hp
Ancho de hoja estándar	4267 mm (14 pies)
Altura mínima al suelo	610 mm

Alcance máximo lateral	2082 mm
Velocidad máxima avance	42.7 km/h
Velocidad máxima retroceso	47.3 km/h
Tanque de combustible	379 L

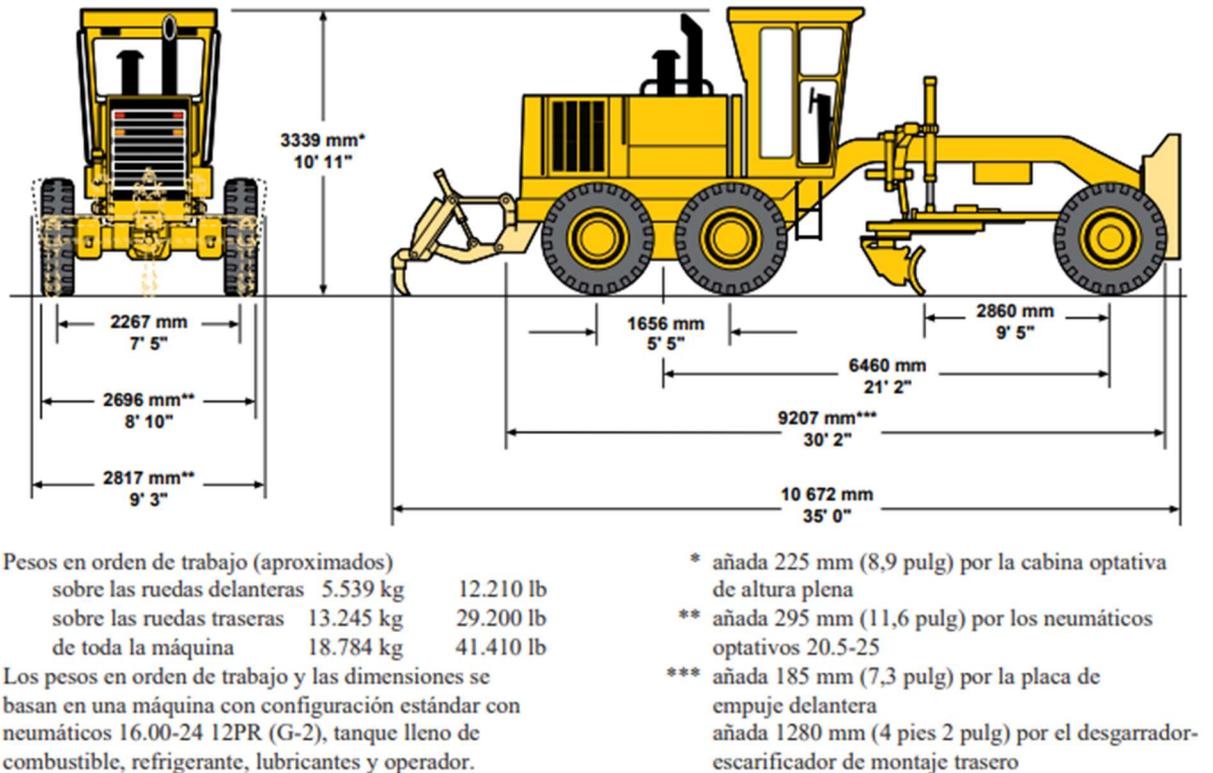
### **Equipamiento Estándar**

- Motor 3306 DITA.
- Sistema hidráulico de 8 funciones.
- Cabina ROPS/FOPS insonorizada.
- Vertedera de 14'.
- Frenos de disco en aceite.
- Embrague deslizante del mando del círculo.

### **Opcionales Disponibles**

- Cabina de perfil alto.
- Hoja de 16'.
- Acondicionador de aire y calefacción.
- Sistema Graderbit.
- Desgarrador trasero de 7 dientes.
- Luces adicionales, retrovisores, ventiladores, sistemas de cambio de aceite, etc.

**Figura 13** La motoniveladora Caterpillar 14H



Fuente: Ficha técnica Caterpillar 14H ( Ferreyros Group Peru, 2021)

#### 4.1.1.1.6. Volquete Minero

El modelo Actros 3344K 6x4 de Mercedes-Benz es un volquete minero de alto rendimiento, diseñado para aplicaciones de acarreo de material en condiciones severas como las que se presentan en minería a tajo abierto. Su diseño robusto y su tren motriz especializado permiten soportar grandes cargas y operar de forma eficiente en terrenos irregulares.

En el corazón del equipo se encuentra el motor MB OM-501 LA Euro III, un seis cilindros en V con sistema turbo e intercooler. Este propulsor entrega una potencia máxima de 265 kW (360 CV) a 1.800 rpm, y un par motor de 1.850 Nm a tan solo 1.080 rpm, lo cual le proporciona una excelente capacidad de respuesta a bajas revoluciones. Además, su consumo específico de 190 g/kWh lo posiciona como una opción eficiente en términos de combustible.

El volquete cuenta con una transmisión Mercedes-Benz G240, de 16 marchas hacia adelante y 2 marchas hacia atrás, complementada por una toma de fuerza disponible en la caja, lo cual permite conectar sistemas hidráulicos como el levantamiento de tolva. El embrague es de tipo monodisco seco de gran diámetro (430 mm), lo que garantiza durabilidad ante cargas exigentes.

En cuanto al sistema de tracción, se configura en 6x4, lo que significa tracción permanente en ambos ejes traseros. La capacidad total de carga es de 31,231 kg, con un PBV de 41,000 kg, lo que lo convierte en una máquina ideal para trabajos pesados y de gran volumen. Los ejes traseros tienen bloqueo de diferencial y una relación de reducción de 5,143:1, adecuada para trabajos en pendientes.

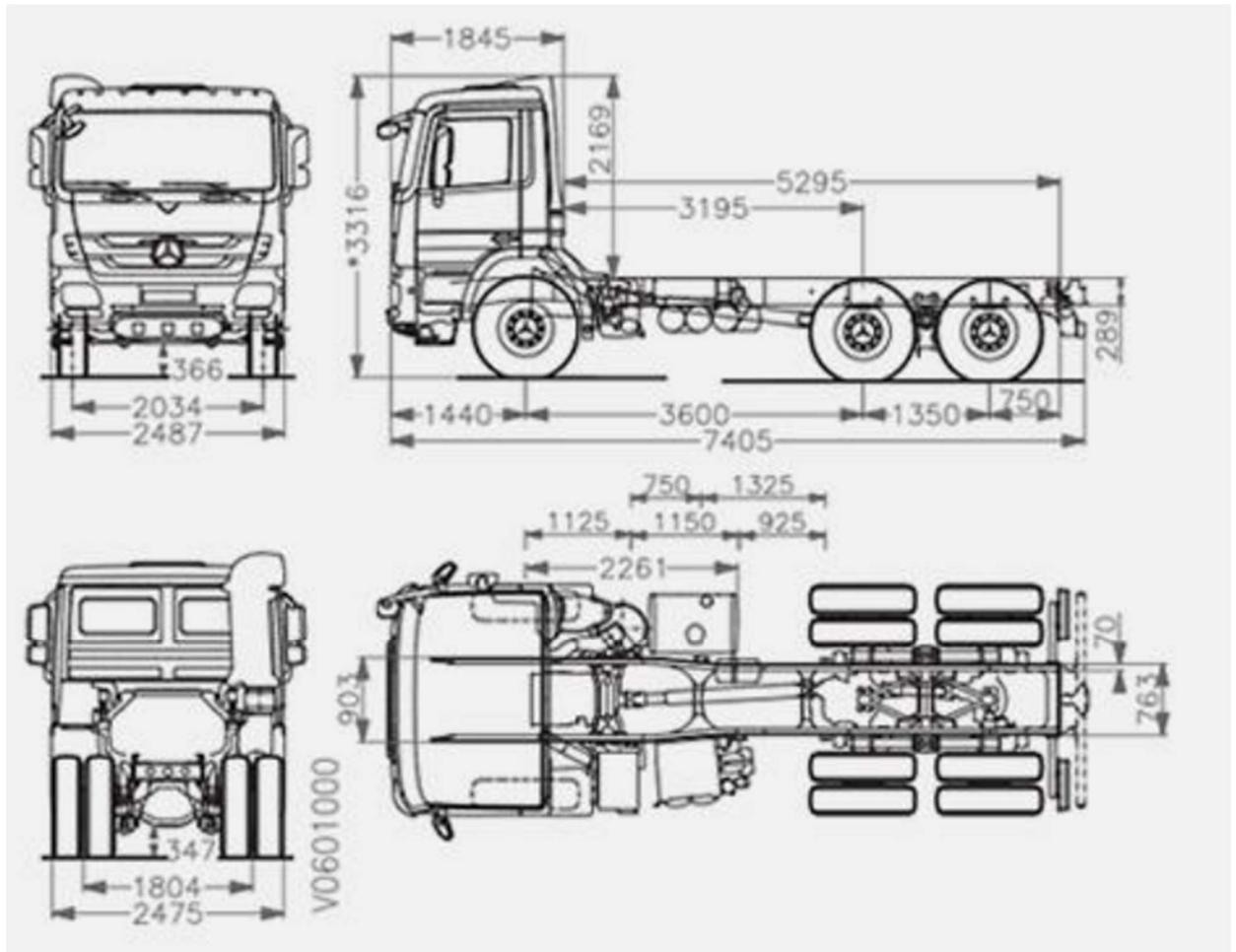
El chasis es de tipo escalera, fabricado en acero E500TM de alta resistencia. La suspensión es parabólica, tanto en el eje delantero como trasero, con amortiguadores telescópicos de doble acción y barras estabilizadoras. Estas características aseguran estabilidad durante la operación en caminos accidentados y con carga completa.

En términos de dimensiones, este volquete tiene una distancia entre ejes de 3.600 mm, y un largo total de 7.405 mm. El diámetro de giro es de 16.9 metros, y los ángulos de entrada y salida son de 23° y 31° respectivamente, proporcionando maniobrabilidad aceptable en espacios reducidos y caminos angostos.

La cabina es del tipo frontal, con techo normal, asiento del conductor con suspensión neumática y columna de dirección ajustable en altura y profundidad. Cuenta con climatización (aire acondicionado y calefacción), sistema de audio AM/FM/CD, y diversos elementos de confort como alzacristales eléctricos, cierre centralizado y controles de velocidad de cruce. Además, integra un sistema de espejos retrovisores eléctricos con desempañador, ideal para ambientes húmedos o con polvo.

En el apartado de frenos, incorpora un sistema neumático de doble circuito, con discos en todas las ruedas y sistemas electrónicos ABS y ASR que aseguran la estabilidad del vehículo en todo tipo de terreno. También posee un freno de motor y freno Top Brake, que puede operar junto al freno de servicio para mejorar la seguridad en descensos o zonas de frenado frecuente.

**Figura 14** *El modelo Actros*



Fuente: Ficha técnica Merdez Benz Actros ( Dive Motors Peru, 2024)

#### ***4.1.2. Evaluación de indicadores actuales de desempeño***

Los indicadores de desempeño, o Key Performance Indicators (KPIs), son métricas esenciales para evaluar la eficiencia operativa de los equipos en la construcción de la plataforma DH21-007. La medición y análisis de estos indicadores permiten detectar áreas de mejora y definir estrategias para optimizar el uso de los recursos disponibles.

Entre los principales indicadores analizados se encuentran:

- Toneladas por cuchara (ton/cuch): Este indicador mide la cantidad de material movido en cada operación de carga, permitiendo evaluar la eficiencia de los equipos en términos de su capacidad de carga y su impacto en la productividad total del proyecto.
- Tiempo por ciclo (hr/ciclo): Representa el tiempo promedio requerido para completar un ciclo operativo, desde la carga hasta el transporte y la descarga del material. Un tiempo de ciclo elevado puede indicar ineficiencias en la operación, como tiempos de espera prolongados o demoras en el tránsito de los equipos.
- Horas de trabajo por guardia (hr/guardia): Mide el tiempo efectivo de operación de cada equipo dentro de una jornada de trabajo. Un bajo número de horas trabajadas por guardia puede deberse a fallas mecánicas, tiempos de espera o interrupciones en la operación.
- Metros cúbicos movidos por hora (m<sup>3</sup>/hr): Este indicador evalúa la cantidad de material transportado por los equipos en función del tiempo, proporcionando una visión clara del rendimiento general de la maquinaria utilizada en la obra.

El análisis de estos indicadores permite determinar el nivel de desempeño de cada equipo y compararlo con estándares de referencia en la industria. A partir de este estudio, se pueden identificar áreas críticas que requieren ajustes operativos o técnicos para mejorar la productividad general del proyecto.

## Gráfica 1

Resumen de horas trabajadas



Fuente: Elaboración Propia

### 4.1.2.1. Tractor de cadenas cat® d8t

Figura 15

Tractor de Cadenas D8T Cat Motor

Motor	
Modelo de motor	C15 ACERT Cat
Emisiones	Cumple con las normas de emisiones Tier 3 de la EPA de EE.UU./ Stage IIIA de la UE equivalentes, MAR-1 de Brasil o Tier 2/Stage II equivalentes, según se exija por región
Potencia del motor: 1.600 rpm	
SAE J1995 (bruta)	273 kW
ISO 14396	269 kW
ISO 14396 (DIN)	365 hp
Potencia del motor: 1.900 rpm	
ISO 9249/SAE J1349	242 kW
ISO 9249/SAE J1349 (DIN)	328 hp
Cilindrada	15,2 L

Fuente: Ficha técnica Caterpillar D8 ( Ferreyros Group Peru, 2021)

### Figura 16

*Tractor de Cadenas D8T Cat Pesos*

<b>Pesos</b>	
Peso en orden de trabajo	
Estándar	38.351 kg
LGP	36.763 kg
Peso de embarque	
Estándar	29.553 Kg
LGP	30.506 kg

Fuente: Ficha técnica Caterpillar D8 ( Ferreyros Group Peru, 2021)

### Figura 17

*Tractor de Cadenas D8T Cat Capacidades de llenado de servicio*

<b>Capacidades de llenado de servicio</b>	
Tanque de combustible	600 L
Sistema de enfriamiento	62 L
Cárter del motor*	38 L
Tren de fuerza	155 L
Mandos finales (cada uno)	12,5 L
Bastidores de rodillos (cada uno)	65 L
Compartimiento del eje pivote	40 L
*Con filtros de aceite.	

Fuente: Ficha técnica Caterpillar D8 ( Ferreyros Group Peru, 2021)

**Figura 18**

*Tractor de Cadenas D8T Cat Transmisión*

<b>Transmisión</b>	
Avance 1	3,4 km/h
Avance 2	6,1 km/h
Avance 3	10,6 km/h
Retroceso 1	4,5 km/h
Retroceso 2	8,0 km/h
Retroceso 3	14,2 km/h

Fuente: Ficha técnica Caterpillar D8 ( Ferreyros Group Peru, 2021)

**Figura 19**

*Tractor de Cadenas D8T Cat Hojas*

<b>Hojas</b>		
<b>Hoja</b>	<b>Capacidad (SAE J1265)</b>	<b>Ancho (sobre cantoneras)</b>
8SU	10,3 m <sup>3</sup>	4.041 mm
8U	11,7 m <sup>3</sup>	4.267 mm
8A	4,7 m <sup>3</sup>	4.990 mm
8SU LGP	9,9 m <sup>3</sup>	4.542 mm

Fuente: Ficha técnica Caterpillar D8 ( Ferreyros Group Peru, 2021)

**Figura 20**

*Tractor de Cadenas D8T Cat Dimensiones*

<b>Dimensiones</b>			
	<b>Estándar</b>	<b>No suspendido</b>	<b>LGP</b>
Ancho del tractor sin muñones (zapata estándar)	2.743 mm	2.743 mm	3.311 mm
Altura de la máquina (cabina ROPS/FOPS)	3.488 mm	3.488 mm	3.488 mm
Longitud de la cadena sobre el suelo	3.207 mm	3.258 mm	3.207 mm
Longitud total del tractor básico	4.647 mm	4.647 mm	4.647 mm
Con los siguientes accesorios, agregue:			
Desgarrador de vástago individual	1.519 mm	1.519 mm	N/D
Desgarrador de vástago múltiple	1.613 mm	1.613 mm	N/D
Hoja SU	1.844 mm	1.844 mm	1.844 mm
Hoja U	2.241 mm	2.241 mm	N/D
Hoja A (no orientable)	2.027 mm	2.027 mm	N/D
Hoja (angulada a 25 grados)	3.068 mm	3.068 mm	N/D
Barra de tiro	406 mm	406 mm	406 mm
Altura de la garra	78 mm	78 mm	78 mm
Espacio libre sobre el suelo	613 mm	606 mm	613 mm
Presión sobre el suelo (ISO 16754)	86,4 kPa/ 12,5 lb/pulg <sup>2</sup>	86,4 kPa/ 12,5 lb/pulg <sup>2</sup>	52,3 kPa/ 7,6 lb/pulg <sup>2</sup>

Fuente: Ficha técnica Caterpillar D8 ( Ferreyros Group Peru, 2021)

#### **4.1.2.1.1. INDICADORES DE DESEMPEÑO**

- Metros cúbicos movidos por hora (m<sup>3</sup>/hr):
  - Capacidad de la hoja SU: 10,3 m<sup>3</sup>
  - Se estima que, en condiciones óptimas, puede mover hasta 130-150 m<sup>3</sup>/h dependiendo del tipo de material y la eficiencia operativa.
- Horas de trabajo por guardia (hr/guardia):
  - Según reportes de operación en minería, un tractor de cadenas puede trabajar entre 10 y 12 horas por guardia.

- Los datos de Reporte Horómetros Epsa-DR-DICIEMBRE\_2024.xlsx pueden proporcionar la cantidad exacta de horas trabajadas y compararlas con la eficiencia esperada.
- Tiempo por ciclo (hr/ciclo):
  - Cada ciclo de empuje y retorno tiene una duración promedio de 1,5 a 2 minutos.

#### **4.1.2.1.2. RELACIÓN CON REPORTE HORÓMETROS**

En el archivo Reporte Horómetros Epsa-DR-DICIEMBRE\_2024.xlsx, se debe analizar la cantidad total de horas registradas en diciembre de 2024 para el D8T, dividiéndolas entre los turnos efectivos, para evaluar el desempeño real frente a los valores de referencia.

#### 4.1.2.2. Excavadora hidráulica cat® 336

**Figura 21**

*Especificaciones de la excavadora hidráulica 336 – Motor*

<b>Motor</b>		
Modelo del motor	Cat® C9.3B	
Potencia neta - ISO 9249	232 kW	311 hp
Potencia del motor - ISO 14396	234 kW	314 hp
Calibre	115 mm	5 pulg
Carrera	149 mm	6 pulg
Cilindrada	9,3 L	568 pulg <sup>3</sup>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cumple con los estándares de emisiones MAR-1 de Brasil y Fase III de China para su uso fuera de carretera, equivalentes a los estándares Tier 3 de la EPA de los Estados Unidos y Stage IIIA de la Unión Europea.</li> <li>• Recomendada para su uso hasta a 4500 m (14 760 pies) de altitud con reducción de la potencia del motor cuando se encuentra por encima de los 3000 m (9840 pies).</li> <li>• La potencia neta se prueba según ISO 9249. Normas vigentes en el momento de la fabricación.</li> <li>• La potencia neta anunciada es la potencia disponible en el volante cuando el motor está equipado con ventilador, sistema de admisión de aire, sistema de escape y alternador.</li> <li>• Velocidad nominal a 1800 rpm.</li> </ul>		

Fuente: Ficha técnica Caterpillar 336 ( Ferreyros Group Peru, 2021)

**Figura 22**

*Especificaciones de la excavadora hidráulica 336 – Mecanismo de balanceo*

<b>Mecanismo de balanceo</b>		
Velocidad de balanceo	8,75 rpm	
Par máximo de balanceo	144 kN·m	106 228 lbf-pies

Fuente: Ficha técnica Caterpillar 336 ( Ferreyros Group Peru, 2021)

### Figura 23

#### Especificaciones de la excavadora hidráulica 336 – Pesos

<b>Pesos</b>		
Peso de operación	37 600 kg	82 900 lb
• Pluma para excavación de gran volumen, brazo M2.55 m (8'4"), cucharón SDS de 2,40 m <sup>3</sup> (3,14 yd <sup>3</sup> ), zapatas de garra triple de 700 mm (28") y contrapeso de 6,8 tm (14 991 lb).		

Fuente: Ficha técnica Caterpillar 336 ( Ferreyros Group Peru, 2021)

### Figura 24

#### Especificaciones de la excavadora hidráulica 336 – Cadena

<b>Cadena</b>		
Ancho estándar de la cadena de las zapatas	600 mm	24 pulg
Ancho de las zapatas de cadena opcionales	700 mm	28 pulg
Ancho de las zapatas de cadena opcionales	800 mm	31 pulg
Cantidad de zapatas (en cada lado)	49	
Cantidad de rodillos de cadena (en cada lado)	8	
Cantidad de rodillos superiores (en cada lado)	2	

Fuente: Ficha técnica Caterpillar 336 ( Ferreyros Group Peru, 2021)

### Figura 25

#### Especificaciones de la excavadora hidráulica 336 – Mando

<b>Mando</b>		
Pendiente	35°/70 %	
Velocidad máxima de desplazamiento	4,7 km/h	2,9 mph
Tracción máxima de la barra de tiro	295 kN	66 206 lbf

Fuente: Ficha técnica Caterpillar 336 ( Ferreyros Group Peru, 2021)

**Figura 26***Especificaciones de la excavadora hidráulica 336 – Sistema hidráulico*

<b>Sistema hidráulico</b>		
Sistema principal - Flujo máximo - Implemento	558 L/min (279 × 2 bombas)	147 gal/min (74 × 2 bombas)
Presión máxima - Equipo - Implemento	35 000 kPa	5076 psi
Presión máxima - Equipo - Modalidad de levantamiento	38 000 kPa	5511 psi
Presión máxima - Desplazamiento	35 000 kPa	5076 psi
Presión máxima - Balanceo	29 400 kPa	4264 psi
Cilindro de la pluma - Calibre	150 mm	6 pulg
Cilindro de la pluma - Carrera	1440 mm	57 pulg
Cilindro del brazo - Calibre	170 mm	7 pulg
Cilindro del brazo - Carrera	1738 mm	68 pulg
Cilindro del cucharón DB - Calibre	150 mm	6 pulg
Cilindro del cucharón DB - Carrera	1151 mm	45 pulg
Cilindro del cucharón TB - Calibre	160 mm	6 pulg
Cilindro del cucharón TB - Carrera	1356 mm	53 pulg

Fuente: Ficha técnica Caterpillar 336 ( Ferreyros Group Peru, 2021)

## Figura 27

*Especificaciones de la excavadora hidráulica 336 – Capacidades de servicio de reabastecimiento*

<b>Capacidades de servicio de reabastecimiento</b>		
Capacidad del tanque de combustible	600 L	158,5 gal
Sistema de enfriamiento	40 L	10,5 gal
Aceite del motor (con filtro)	32 L	8,5 gal
Mando de balanceo (cada uno)	18 L	4,8 gal
Mando final (cada uno)	8 L	2,1 gal
Sistema hidráulico (incluido el tanque)	373 L	98,5 gal
Tanque hidráulico	161 L	42,5 gal

Fuente: Ficha técnica Caterpillar 336 ( Ferreyros Group Peru, 2021)

## Figura 28

*Especificaciones de la excavadora hidráulica 336 – Estándares*

<b>Estándares</b>	
Frenos	ISO 10265:2008
Cabina/ROPS (por sus siglas en inglés para Estructura de protección en caso de vuelcos)	ISO 12117-2:2008

Fuente: Ficha técnica Caterpillar 336 ( Ferreyros Group Peru, 2021)

## Figura 29

### Especificaciones de la excavadora hidráulica 336 – Desempeño del sonido

<b>Desempeño del sonido</b>	
ISO 6395:2008 (exterior)	105 dB(A)
ISO 6396:2008 (interior de la cabina)	73 dB(A)

• Es posible que sea necesario el uso de protección auditiva cuando se opera desde una estación y cabina abierta (cuando no se haya realizado un mantenimiento correcto o, las puertas o ventanas se encuentren abiertas) durante períodos prolongados o en entornos ruidosos.

Fuente: Ficha técnica Caterpillar 336 ( Ferreyros Group Peru, 2021)

#### **4.1.2.2.1. INDICADORES DE DESEMPEÑO**

- Toneladas por cuchara (ton/cuch):
  - La excavadora Cat 336 cuenta con cucharones de hasta 2,40 m<sup>3</sup>.
  - Dependiendo de la densidad del material, puede cargar entre 4 y 6 toneladas por cucharada.
- Tiempo por ciclo (hr/ciclo):
  - Un ciclo completo (carga, giro, descarga y retorno) se estima en 20 a 30 segundos, con una media de 2 a 3 ciclos por minuto.
- Metros cúbicos movidos por hora (m<sup>3</sup>/hr):
  - En condiciones normales, puede mover entre 200 y 300 m<sup>3</sup>/h dependiendo del tipo de material y la eficiencia del operador.

#### **4.1.2.2.2. RELACIÓN CON REPORTE HORÓMETROS**

- Del archivo data.xlsx, se pueden extraer datos de carga y rendimiento de la excavadora Cat 336 para calcular si los valores reales cumplen con estos estándares.

- Se debe verificar el número de ciclos realizados por hora y compararlo con la productividad esperada.

#### **4.1.2.3. Retroexcavadora jcb 3cx**

##### ***4.1.2.3.1. INDICADORES DE DESEMPEÑO***

- Toneladas por cuchara (ton/cuch):
  - Cucharón trasero con capacidad de 0,3 m<sup>3</sup>, lo que permite mover entre 0,5 y 1 tonelada por ciclo, dependiendo del tipo de material.
- Tiempo por ciclo (hr/ciclo):
  - Un ciclo completo de excavación dura aproximadamente 30 a 40 segundos.
- Horas de trabajo por guardia (hr/guardia):
  - En minería y construcción, su operación efectiva por guardia es de 8 a 10 horas, aunque puede variar por condiciones del terreno y mantenimiento.
- Metros cúbicos movidos por hora (m<sup>3</sup>/hr):
  - Se estima que puede mover entre 30 y 50 m<sup>3</sup>/h, dependiendo de la eficiencia operativa y el tipo de suelo.

##### ***4.1.2.3.2. RELACIÓN CON REPORTE HORÓMETROS***

- Se recomienda revisar Reporte Horómetros Epsa-DR-DICIEMBRE\_2024.xlsx para determinar cuántas horas operó la JCB 3CX en diciembre de 2024 y compararlo con los estándares esperados

#### **4.1.2.4. Rodillo vibratorio bomag bw211d-40**

##### ***4.1.2.4.1. INDICADORES DE DESEMPEÑO***

- Tiempo por ciclo (hr/ciclo):

- Cada pasada de compactación toma en promedio 5 minutos por carril de trabajo.
- Metros cúbicos compactados por hora (m<sup>3</sup>/hr):
  - Su capacidad de compactación depende del tipo de suelo:
    - Relleno de piedra: 400-800 m<sup>3</sup>/h
    - Grava y arena: 270-540 m<sup>3</sup>/h
    - Terreno mixto: 220-440 m<sup>3</sup>/h
    - Arcilla y limo: 110-220 m<sup>3</sup>/h
- Horas de trabajo por guardia (hr/guardia):
  - Puede operar hasta 12 horas por guardia, dependiendo de la planificación del proyecto.

#### ***4.1.2.4.2. RELACIÓN CON REPORTE HORÓMETROS***

- Es clave analizar los registros del Reporte Horómetros Epsa-DR-DICIEMBRE\_2024.xlsx para verificar la cantidad de horas trabajadas y contrastarlas con la productividad esperada en función del tipo de suelo compactado.

#### ***4.1.3. Identificación de oportunidades de mejora***

Con base en el análisis operativo y la evaluación de indicadores, se identifican oportunidades de mejora que permitan optimizar la gestión de los equipos y aumentar la eficiencia del proceso constructivo.

Una de las principales oportunidades de mejora radica en la implementación de estrategias de mantenimiento preventivo, que permitan reducir los tiempos de inactividad y prolongar la vida

útil de los equipos. Un mantenimiento adecuado minimiza el riesgo de fallas inesperadas y contribuye a mejorar la disponibilidad de la maquinaria.

Otra área clave es la optimización de la programación operativa, ajustando los horarios de trabajo y turnos para maximizar el uso de los equipos y reducir los tiempos improductivos. La planificación eficiente de las tareas permite reducir el tiempo de espera y mejorar la fluidez del proceso constructivo.

La capacitación del personal también juega un papel fundamental en la mejora del desempeño de los equipos. Un operador capacitado puede manejar la maquinaria de manera más eficiente, reduciendo el consumo de combustible, minimizando el desgaste y evitando errores que puedan generar tiempos de inactividad o daños en los equipos.

Además, se considera la incorporación de nuevas tecnologías para el monitoreo del desempeño de los equipos en tiempo real. Herramientas de telemetría y sensores avanzados permiten recopilar datos precisos sobre el funcionamiento de la maquinaria, facilitando la detección temprana de fallas y la implementación de medidas correctivas antes de que se conviertan en problemas mayores.

Finalmente, la optimización en la asignación de recursos y la reestructuración de procesos pueden contribuir a reducir costos y maximizar la eficiencia en la construcción de la plataforma. Ajustes en la logística del transporte de materiales, mejoras en la coordinación entre equipos y una adecuada gestión del tiempo de operación son algunas de las estrategias que pueden implementarse para mejorar la productividad general del proyecto.

#### **4.1.3.1. Implementación de un programa de mantenimiento preventivo**

El análisis de los horómetros y registros de uso muestra que algunos equipos presentan tiempos de inactividad elevados, los cuales pueden estar asociados a fallas mecánicas recurrentes debido a una gestión deficiente del mantenimiento.

- **Hallazgos:**

- Los horómetros de los equipos en diciembre de 2024 revelan que algunos equipos, como la Excavadora Cat 336 y el Tractor de Cadenas D8T, no han alcanzado la cantidad esperada de horas de operación por guardia debido a tiempos de mantenimiento más prolongados de lo previsto.
- La falta de disponibilidad de repuestos y lubricantes específicos ha generado demoras en la reparación de los equipos, lo que ha impactado negativamente en la productividad.

- **Oportunidades de mejora:**

- Implementar un plan de mantenimiento preventivo calendarizado basado en las recomendaciones de los fabricantes y en los datos históricos de fallos registrados en Reporte Horómetros Epsa-DR-DICIEMBRE\_2024.xlsx.
- Utilizar herramientas de telemetría para detectar patrones de desgaste en componentes clave como sistemas hidráulicos, motor y transmisión.
- Optimizar el inventario de repuestos mediante un análisis de los componentes con mayor tasa de fallo para reducir tiempos de inactividad.

#### **4.1.3.2. Optimización de la programación operativa y asignación de recursos**

El análisis de los KPIs de desempeño ha identificado ineficiencias en los tiempos de ciclo y en la utilización de los equipos, lo que indica que los equipos no están siendo utilizados a su máxima capacidad.

- **Hallazgos:**

- En el caso del Tractor de Cadenas Cat D8T, su rendimiento óptimo debería ser 130-150 m<sup>3</sup>/h, pero los registros muestran que en ciertos turnos su producción ha sido menor, lo que indica tiempos muertos.
- La Excavadora Cat 336, que debería realizar entre 2 y 3 ciclos por minuto, ha mostrado variabilidad en los tiempos de carga y descarga, lo que sugiere oportunidades de mejora en la planificación de su operación.
- Los horómetros muestran diferencias significativas en las horas trabajadas entre turnos, lo que indica una posible mala distribución de las cargas de trabajo.

- **Oportunidades de mejora:**

- Reestructuración de turnos de trabajo para equilibrar la carga operativa y evitar sobreutilización de algunos equipos mientras otros están inactivos.
- Optimización de rutas y logística para reducir los tiempos de espera de la excavadora en la carga de material.
- Implementación de un sistema de asignación de equipos basado en demanda, asegurando que cada equipo trabaje en función de su capacidad nominal y evitando tiempos improductivos.

#### **4.1.3.3. Capacitación del personal para maximizar el desempeño**

La eficiencia de los equipos no solo depende de su capacidad técnica, sino también del conocimiento y habilidad de los operadores. Se ha identificado que ciertas variaciones en el rendimiento están relacionadas con la falta de capacitación.

- **Hallazgos:**

- En los datos de Reporte Horómetros Epsa-DR-DICIEMBRE\_2024.xlsx, se observan diferencias en la eficiencia de los equipos según el operador, lo que sugiere variabilidad en las técnicas de manejo.
- Se ha registrado un mayor consumo de combustible en ciertos turnos, lo que indica que algunos operadores no están aplicando prácticas eficientes de operación.
- En el caso del Rodillo BOMAG BW211D-40, se ha identificado que la compactación es más efectiva en ciertos turnos, lo que sugiere diferencias en el uso del sistema de vibración por parte de los operadores.

- **Oportunidades de mejora:**

- Implementar un programa de capacitación para operadores enfocado en técnicas de operación eficiente para cada equipo, con énfasis en reducción del consumo de combustible y optimización de tiempos de ciclo.
- Utilizar simuladores o sistemas de monitoreo en tiempo real para evaluar el desempeño individual de los operadores y detectar áreas de mejora.
- Establecer estándares de operación óptimos y realizar auditorías periódicas para asegurar su cumplimiento.

#### **4.1.3.4. Incorporación de tecnología para el monitoreo en tiempo real**

El uso de herramientas avanzadas de monitoreo permite detectar fallas en los equipos antes de que se conviertan en problemas críticos y mejorar la planificación operativa.

- **Hallazgos:**

- Actualmente, no todos los equipos cuentan con sensores de monitoreo en tiempo real, lo que dificulta la identificación temprana de problemas mecánicos.
- El sistema Product Link™ de Caterpillar está disponible en algunos equipos, pero no se está utilizando de manera efectiva para el análisis de datos y toma de decisiones.
- En el caso del Rodillo BOMAG BW211D-40, la falta de integración con herramientas de compactación inteligente impide optimizar el proceso en tiempo real.

- **Oportunidades de mejora:**

- Integrar sensores de telemetría en todos los equipos para monitorear en tiempo real indicadores clave como temperatura del motor, presión hidráulica y consumo de combustible.
- Implementar un sistema centralizado de monitoreo que permita visualizar la operación de cada equipo en una plataforma digital y tomar decisiones en tiempo real.
- Utilizar análisis predictivo basado en los datos históricos de los archivos Reporte Horómetros Epsa-DR-DICIEMBRE\_2024.xlsx para predecir fallos y optimizar los mantenimientos preventivos.

#### **4.1.3.5. Optimización de la logística y coordinación de equipos**

Para maximizar la productividad, es fundamental reducir los tiempos de espera entre equipos, optimizar el transporte de materiales y mejorar la coordinación en el sitio de construcción.

- **Hallazgos:**

- En algunos registros de horómetros y producción, se han identificado tiempos de espera elevados para la carga y descarga de material.
- En ciertos turnos, los camiones de acarreo no están sincronizados con la operación de la excavadora, lo que genera tiempos muertos innecesarios.
- La distribución de los equipos en el terreno no está optimizada, lo que genera recorridos ineficientes.

- **Oportunidades de mejora:**

- Implementar sistemas de gestión de flotas en tiempo real para coordinar de manera eficiente la operación de los equipos y reducir tiempos de espera.
- Rediseñar el layout del sitio de construcción para optimizar las rutas de desplazamiento y minimizar el tiempo entre ciclos.
- Mejorar la comunicación entre operadores mediante radios o plataformas digitales que permitan coordinar la carga y descarga de manera eficiente.

## **4.2. Aplicación de la simulación de Montecarlo en la evaluación de indicadores de equipos**

La simulación de Montecarlo es una técnica estadística ampliamente utilizada en el análisis de sistemas complejos con alta variabilidad e incertidumbre. En el contexto de la construcción de la plataforma DH21-007 en la Unidad Minera Las Bambas, esta metodología permite evaluar el comportamiento de los indicadores de desempeño de los equipos y prever su rendimiento bajo diferentes escenarios operacionales.

La integración de la simulación con datos operativos reales provenientes de los archivos Reporte Horómetros Epsa-DR-DICIEMBRE\_2024.xlsx y data.xlsx facilitará la validación del modelo y garantizará que los resultados sean representativos del comportamiento real de los equipos.

### ***4.2.1. Justificación del uso de la simulación de Montecarlo***

#### **4.2.1.1. Desafíos en la evaluación del desempeño de equipos mineros**

Las operaciones en la plataforma DH21-007 están sujetas a factores de variabilidad que afectan el desempeño de los equipos, tales como:

- Cambios en las condiciones del terreno: Modificaciones en la dureza del suelo impactan la velocidad y eficiencia de los equipos de carga y acarreo.
- Tiempos de ciclo fluctuantes: La duración de cada ciclo depende de la disponibilidad de camiones de acarreo, la congestión en la ruta y la velocidad promedio de operación.
- Fallos mecánicos y disponibilidad de repuestos: Tiempos de inactividad inesperados reducen la productividad global del sistema.

Los métodos deterministas tradicionales no permiten capturar esta variabilidad, ya que trabajan con valores fijos sin considerar la dispersión de los datos. En cambio, la simulación de Montecarlo permite generar múltiples iteraciones y analizar distribuciones de probabilidad, lo que mejora la capacidad de predicción del desempeño de los equipos.

#### **4.2.1.2. Ventajas de la simulación de montecarlo en la plataforma dh21-007**

- Modelado de la variabilidad operativa: Permite evaluar la dispersión en los tiempos de ciclo, carga y descarga de material.
- Análisis de factores externos: Incorpora la influencia del mantenimiento, las condiciones climáticas y la disponibilidad de los equipos en la productividad total.
- Optimización de la toma de decisiones: Facilita la identificación de estrategias de mejora en la planificación de recursos y mantenimiento de maquinaria.
- Gestión del riesgo: Permite anticipar fallas críticas y evaluar su impacto en la producción, identificando oportunidades de mitigación.

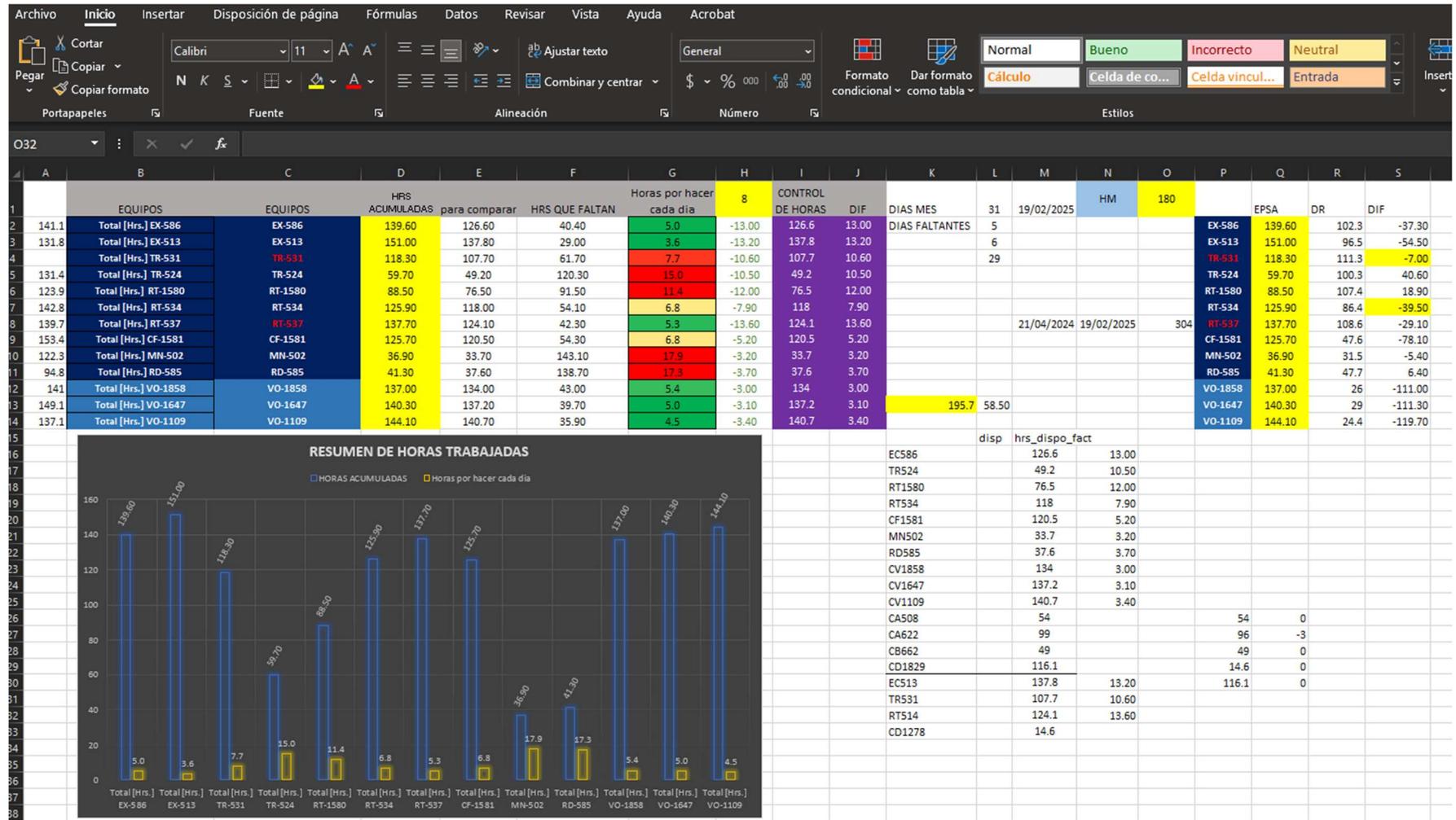
#### **4.2.2. *Parámetros de entrada y supuestos del modelo***

Para construir el modelo de simulación de Montecarlo, es fundamental definir los parámetros de entrada que reflejan el comportamiento real de los equipos en la operación minera.

Estos parámetros se obtendrán de los datos históricos en Reporte Horómetros Epsa-DR-DICIEMBRE\_2024.xlsx y data.xlsx, permitiendo ajustar el modelo a las condiciones específicas de la plataforma DH21-007.

**Figura 30**

Visualización del archivo *DICIEMBRE\_2024.xlsx*



Fuente: Elaboración Propia

Figura 31

Visualización del archivo data.xlsx

Fecha	Tipo Actividad	Área	Plataforma	Hórometro Inicial	Hórometro Final	Hrs. Efectivas EX-586	Hrs. Stand By EX-586	Total [Hrs.] EX-586	Hórometro Inicial	Hórometro Final	Hrs. Efectivas EX-513	Hrs. Stand By EX-513	Total [Hrs.] EX-513	Hórometro Inicial	Hórometro Final	Hrs. Efectivas TR-531	Hrs. Stand By TR-531	Total [Hrs.] TR-531	Hórometro Inicial	Hórometro Final	Hrs. Efectivas TR-524	Hrs. Stand By TR-524	Total [Hrs.] TR-524	Hórometro Inicial	Hórometro Final	Hrs. Efectivas RT-1580	Hrs. Stand By RT-1580	Total RT-
21/12/2024	CONSTRUCCION	RD-CBSW	CB_SWS	5950.10	5957.10	7.00		7.00			0.00		0.00			0.00		0.00	21426.00	21432.00	6.00		6.00	7213.40	7220.50	7.10		7.10
21/12/2024	CONSTRUCCION	PD-TSF1	PIC-FB-16			0.00		0.00	8043.00	8050.40	7.40		7.40	26490.00	26497.10	7.10		7.10			0.00		0.00			0.00		0.00
21/12/2024	CONSTRUCCION	MI-HG	TH24-16			0.00		0.00			0.00		0.00			0.00		0.00			0.00		0.00			0.00		0.00
22/12/2024	CONSTRUCCION	RD-CBSW	CB_SWS	5957.10	5966.00	8.90		8.90			0.00		0.00			0.00		0.00	21432.00	21434.50	2.50		2.50	7220.50	7228.20	7.70		7.70
22/12/2024	CONSTRUCCION	PD-TSF1	DH-21-007			0.00		0.00	8050.40	8057.90	7.50		7.50			0.00		0.00			0.00		0.00			0.00		0.00
22/12/2024	CONSTRUCCION	PD-TSF1	PIC-FB-16			0.00		0.00			0.00		0.00	26497.10	26502.60	5.50		5.50			0.00		0.00			0.00		0.00
22/12/2024	CONSTRUCCION	MI-HG	TH24-16			0.00		0.00			0.00		0.00			0.00		0.00			0.00		0.00			0.00		0.00
23/12/2024	CONSTRUCCION	RD-CBSW	CB_SWS	5966.00	5972.80	6.80		6.80			0.00		0.00			0.00		0.00	18788.30	18794.50	6.20		6.20	7228.20	7235.50	7.30		7.30
23/12/2024	CONSTRUCCION	PD-TSF1	DH-21-007			0.00		0.00	8057.90	8065.40	7.50		7.50			0.00		0.00			0.00		0.00			0.00		0.00
23/12/2024	CONSTRUCCION	PD-TSF1	PIC-FB-16			0.00		0.00			0.00		0.00	26502.60	26509.30	6.70		6.70			0.00		0.00			0.00		0.00
23/12/2024	CONSTRUCCION	MI-HG	TH24-16			0.00		0.00			0.00		0.00			0.00		0.00			0.00		0.00			0.00		0.00
23/12/2024	STAND BY	STAND BY	STAND BY			0.00		0.00			0.00		0.00			0.00		0.00			0.00		0.00			0.00		0.00
24/12/2024	CONSTRUCCION	RD-CBSW	CB_SWS	5972.80	5979.30	6.50		6.50			0.00		0.00			0.00		0.00	18794.50	18800.50	6.00		6.00	7235.50	7241.40	5.90		5.90
24/12/2024	CONSTRUCCION	PD-TSF1	DH-21-007			0.00		0.00	8065.40	8071.20	5.80		5.80	26509.30	26514.00	4.70		4.70			0.00		0.00			0.00		0.00
24/12/2024	CONSTRUCCION	PD-TSF1	PIC-FB-16			0.00		0.00			0.00		0.00			0.00		0.00			0.00		0.00			0.00		0.00
24/12/2024	STAND BY	STAND BY	STAND BY			0.00		0.00			0.00		0.00			0.00		0.00			0.00		0.00			0.00		0.00
25/12/2024	CONSTRUCCION	RD-CBSW	CB_SWS	5979.30	5985.90	6.60		6.60			0.00		0.00			0.00		0.00	18800.50	18808.00	7.50		7.50	7241.40	7248.50	7.10		7.10
25/12/2024	CONSTRUCCION	PD-TSF1	DH-21-007			0.00		0.00	8071.20	8079.20	8.00		8.00	26514.00	26520.40	6.40		6.40			0.00		0.00			0.00		0.00
25/12/2024	CONSTRUCCION	PD-TSF1	PIC-FB-16			0.00		0.00			0.00		0.00			0.00		0.00			0.00		0.00			0.00		0.00
25/12/2024	STAND BY	STAND BY	STAND BY			0.00		0.00			0.00		0.00			0.00		0.00			0.00		0.00			0.00		0.00
26/12/2024	CONSTRUCCION	PD-TSF1	PIC-FB-16			0.00		0.00			0.00		0.00			0.00		0.00			0.00		0.00			0.00		0.00
26/12/2024	CONSTRUCCION	RD-CBSW	CB_SWS	5985.90	5992.50	6.60		6.60			0.00		0.00			0.00		0.00			0.00		0.00			0.00		0.00
26/12/2024	CONSTRUCCION	PD-TSF1	DH-21-007			0.00		0.00	8079.20	8087.00	7.80		7.80			0.00		0.00			0.00		0.00			0.00		0.00
26/12/2024	CONSTRUCCION	RD-CBSW	CB_SWS			0.00		0.00			0.00		0.00	18808.00	18817.00	9.00		9.00	21434.50	21438.50	4.00		4.00	7248.50	7255.60	7.10		7.10
26/12/2024	CONSTRUCCION	MI-HG	TH24-16			0.00		0.00			0.00		0.00			0.00		0.00			0.00		0.00			0.00		0.00
26/12/2024	STAND BY	STAND BY	STAND BY			0.00		0.00			0.00		0.00			0.00		0.00			0.00		0.00			0.00		0.00
27/12/2024	CONSTRUCCION	PD-TSF1	PIC-FB-16	5992.50	5999.70	7.20		7.20			0.00		0.00			0.00		0.00			0.00		0.00			0.00		0.00
27/12/2024	CONSTRUCCION	PD-TSF1	DH-21-007			0.00		0.00	8087.00	8093.40	6.40		6.40			0.00		0.00			0.00		0.00			0.00		0.00
27/12/2024	CONSTRUCCION	RD-CBSW	CB_SWS			0.00		0.00			0.00		0.00	18817.00	18823.90	6.90		6.90	21438.50	21446.00	7.50		7.50	7255.60	7261.50	5.90		5.90
27/12/2024	CONSTRUCCION	MI-HG	TH24-16			0.00		0.00			0.00		0.00			0.00		0.00			0.00		0.00			0.00		0.00
27/12/2024	STAND BY	STAND BY	STAND BY			0.00		0.00			0.00		0.00			0.00		0.00			0.00		0.00			0.00		0.00
28/12/2024	CONSTRUCCION	PD-TSF1	PIC-FB-16	5999.70	6008.30	8.60		8.60	8093.40	8101.40	8.00		8.00			0.00		0.00			0.00		0.00			0.00		0.00
28/12/2024	CONSTRUCCION	RD-CBSW	CB_SWS			0.00		0.00			0.00		0.00	18823.90	18832.80	8.90		8.90			0.00		0.00			0.00		0.00
28/12/2024	CONSTRUCCION	RD-CBSW	CB_S27			0.00		0.00			0.00		0.00			0.00		0.00	21446.00	21455.00	9.00		9.00			0.00		0.00
28/12/2024	CONSTRUCCION	PD-TSF1	DH-21-007			0.00		0.00			0.00		0.00			0.00		0.00			0.00		0.00			0.00		0.00
28/12/2024	REMEDIACION	EX-PLTN	PLN-001			0.00		0.00			0.00		0.00			0.00		0.00			0.00		0.00			0.00		0.00
28/12/2024	STAND BY	STAND BY	STAND BY			0.00		0.00			0.00		0.00			0.00		0.00			0.00		0.00			0.00		0.00
29/12/2024	CONSTRUCCION	PD-TSF1	PIC-FB-16	6008.30	6015.40	7.10		7.10			0.00		0.00			0.00		0.00			0.00		0.00			0.00		0.00

Fuente: Elaboración Propia

#### **4.2.2.1. Principales parámetros considerados:**

- Tiempo de ciclo (hr/ciclo): Duración promedio desde la carga hasta la descarga del material.
- Capacidad de carga ( $m^3$  o ton/ciclo): Volumen de material transportado por cada equipo en un ciclo de trabajo.
- Disponibilidad mecánica (%): Porcentaje de tiempo en que los equipos están operativos sin restricciones.
- Velocidad promedio de operación (km/h): Factor clave en la productividad de los equipos de acarreo.
- Condiciones del terreno: Influye en la velocidad de desplazamiento y en el desgaste de componentes mecánicos.

Estos valores serán extraídos de los reportes históricos y se analizarán sus distribuciones estadísticas para definir las funciones probabilísticas en la simulación.

#### **4.2.2.2. Supuestos del modelo:**

- Distribución probabilística de los datos:
  - Se asumirá una distribución normal para el tiempo de ciclo, basada en datos históricos.
  - La disponibilidad mecánica podría seguir una distribución de Weibull, común en el análisis de confiabilidad de equipos.
  - La capacidad de carga se modelará con una distribución log-normal, reflejando la variabilidad de materiales transportados.

- Independencia de las iteraciones: Cada simulación es independiente de la anterior, asegurando la validez estadística del análisis.
- Datos basados en registros históricos: Los valores de entrada se obtendrán de data.xlsx y Reporte Horómetros Epsa-DR-DICIEMBRE\_2024.xlsx, garantizando la representatividad del modelo.

#### ***4.2.3. Implementación del modelo en software especializado***

Para la simulación de Montecarlo, se utilizará R, un lenguaje de programación estadístico ampliamente utilizado en análisis de datos y modelado probabilístico.

##### **4.2.3.1. Proceso de implementación en r:**

- Carga de datos históricos:
  - Se importarán los datos desde Reporte Horómetros Epsa-DR-DICIEMBRE\_2024.xlsx y data.xlsx.
  - Se realizará un análisis exploratorio para determinar las distribuciones de probabilidad más adecuadas para cada parámetro.
- Definición de distribuciones de probabilidad:
  - Se ajustarán funciones probabilísticas para el tiempo de ciclo, capacidad de carga y disponibilidad mecánica.
- Generación de simulaciones:
  - Se ejecutarán 10,000 iteraciones para obtener una distribución de posibles resultados.
- Análisis de resultados:
  - Se calcularán métricas clave como media, desviación estándar y percentiles.
  - Se generarán gráficos de densidad y boxplots para visualizar la variabilidad.



Figura 33

Código parte 2

```
+ Código + Texto RAM Disco Gemini
39
40 # Crear un dataframe con los resultados
41 resultados <- data.frame(
42   Material_Excavadora = sort(sim_material_excavadora),
43   Material_Tractor = sort(sim_material_tractor),
44   Material_Rodillo = sort(sim_material_rodillo),
45   Material_Total = sort(sim_material_total)
46 )
47
48 # Función para graficar ojivas (frecuencia acumulada)
49 crear_ojiva <- function(data, columna, titulo, color, x_label){
50   ggplot(data, aes_string(x = columna)) +
51     stat_ecdf(geom = "step", color = color, size = 1.2) +
52     labs(title = titulo, x = x_label, y = "Probabilidad Acumulada") +
53     theme_minimal() +
54     theme(
55       plot.title = element_text(size=14, face="bold", hjust=0.5),
56       axis.title = element_text(size=12),
57       axis.text = element_text(size=10)
58     )
59 }
60
61 # Visualización de distribuciones con gráficas de ojivas
62 p1 <- crear_ojiva(resultados, "Material_Total", "Frecuencia Acumulada del
63 Material Movido Total", "blue",
64 "m³ de Material Movido")
65
66 p2 <- crear_ojiva(resultados, "Material_Excavadora", "Frecuencia Acumulada de
67 Material Movido por Excavadora", "green",
68 "m³ de Material Movido")
69
70 p3 <- crear_ojiva(resultados, "Material_Tractor", "Frecuencia Acumulada de
71 Material Movido por Tractor", "red",
72 "m³ de Material Movido")
73
74 p4 <- crear_ojiva(resultados, "Material_Rodillo", "Frecuencia Acumulada de
75 Material Movido por Rodillo", "purple",
76 "m³ de Material Movido")
77
78 # Mostrar gráficos en pantalla
79 print(p1)
80 print(p2)
81 print(p3)
82 print(p4)
83
```

Fuente: Elaboración Propia.

#### **4.2.4.1. Carga los datos desde data.xlsx y extraer las horas efectivas de operación**

El código primero importa los datos desde un archivo de Excel (data.xlsx) que contiene información sobre la operación de los equipos. Se utilizan librerías como readxl para leer los datos y dplyr para manipularlos.

Dentro del archivo de Excel, se extraen columnas clave relacionadas con las horas efectivas de operación de los equipos:

- Excavadora (Hrs. Efectivas EX-586)
- Tractor (Hrs. Efectivas VO-1647)
- Rodillo (Hrs. Efectivas VO-1109)

Dado que los valores pueden tener formatos mixtos, se convierten a valores numéricos para asegurar cálculos precisos.

#### **4.2.4.2. Define los parámetros de carga de los equipos según los archivos pdf**

Para realizar la simulación de Montecarlo, es fundamental definir la capacidad operativa de cada equipo, basándose en las especificaciones técnicas obtenidas de los archivos PDF. Se establecen los siguientes valores:

- Excavadora Cat 336
  - Capacidad del cucharón: 2.4 m<sup>3</sup>
  - Ciclos por hora: 120
  - Cálculo: Material movido = Horas operativas × Capacidad del cucharón × Ciclos por hora
- Tractor de Cadenas Cat D8T
  - Capacidad de empuje: 10.3 m<sup>3</sup> por pasada

- Pasadas por hora: 10
- Cálculo:  $\text{Material movido} = \text{Horas operativas} \times \text{Capacidad de empuje} \times \text{Pasadas por hora}$
- Rodillo BOMAG BW211D-40
  - Compactación de material: 220 - 800 m<sup>3</sup>/h (según el tipo de suelo)
  - Se utiliza una distribución uniforme para modelar la variabilidad en la compactación
  - Cálculo:  $\text{Material movido} = \text{Horas operativas} \times \text{Compactación promedio}$

Estos parámetros son críticos, ya que determinan la cantidad de material que cada equipo puede mover en una jornada de trabajo, lo que luego será simulado con Montecarlo.

#### **4.2.4.3. Ejecuta la simulación de montecarlo con 10,000 iteraciones**

La simulación de Montecarlo permite modelar la variabilidad en la cantidad de material movido en diferentes escenarios de operación. Se realizan 10,000 simulaciones considerando:

- Distribución normal (rnorm) para la excavadora y el tractor, asumiendo que su rendimiento varía alrededor de un valor promedio.
- Distribución uniforme (runif) para el rodillo, dado que su capacidad de compactación depende del tipo de suelo y varía entre valores mínimos y máximos.

Cada simulación representa una posible realidad operacional, permitiendo estimar probabilidades y rangos de producción en base a datos reales.

#### **4.2.4.4. Ordena los datos simulados para graficar la frecuencia acumulada correctamente**

Los resultados de cada simulación se ordenan de menor a mayor antes de graficarlos. Esto permite calcular correctamente la frecuencia acumulada de material movido por cada equipo, lo que es clave para representar las gráficas de ojivas.

#### **4.2.4.5. Genera gráficas de ojivas para mostrar la probabilidad acumulada de cada equipo y del total de material movido**

Las gráficas de ojivas son visualizaciones de la distribución acumulativa de probabilidad. En lugar de representar la cantidad de material movido con barras, muestran qué porcentaje de los valores simulados son menores o iguales a un valor dado.

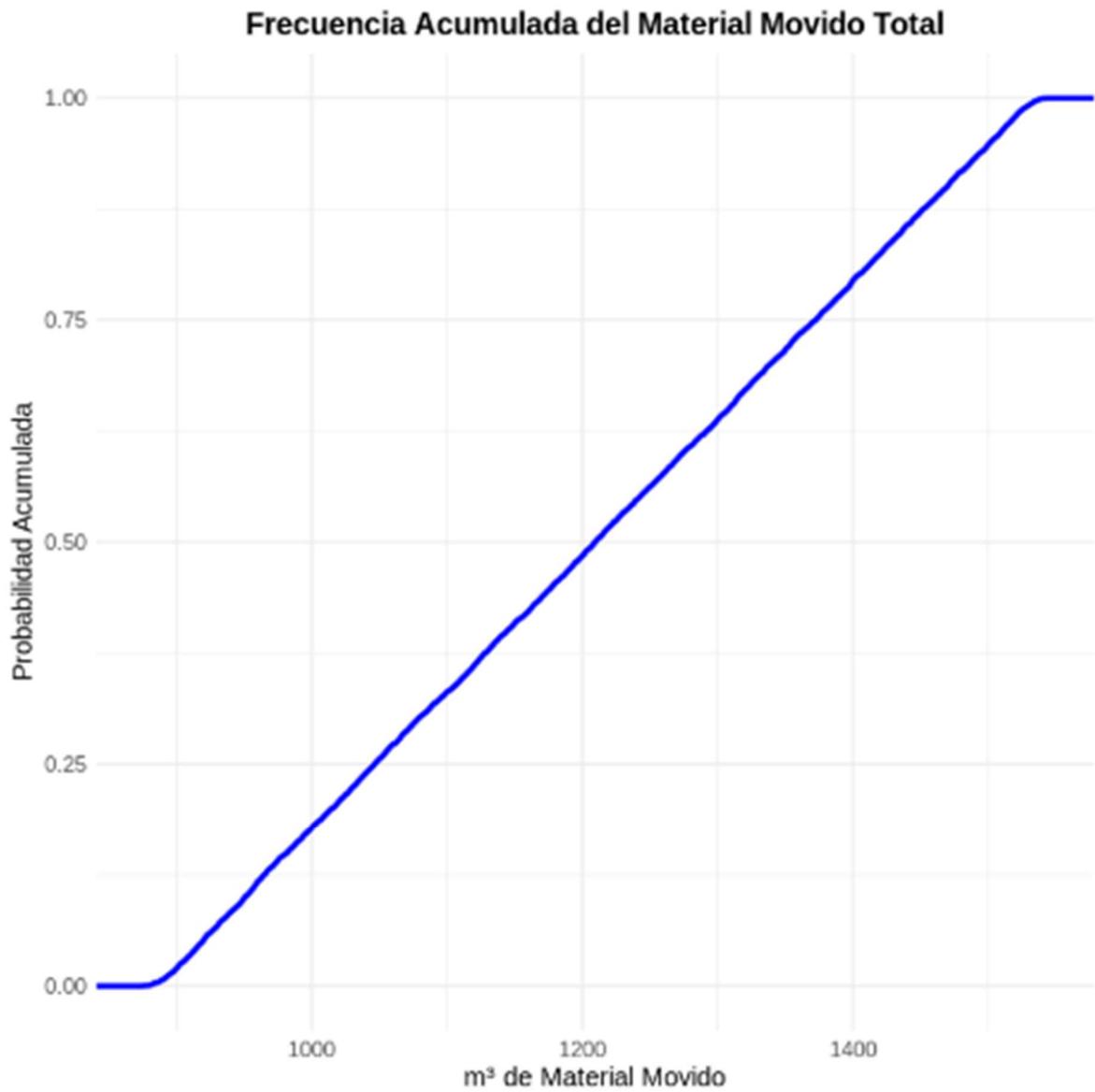
Cada equipo tiene su propia curva de frecuencia acumulada, lo que permite responder preguntas como:

- ¿Cuánto material se mueve en el 90% de los casos?
- ¿Cuál es el rango de valores más probables?
- ¿Existe una alta variabilidad en la producción de los equipos?

Cada curva se representa en un color diferente para facilitar la distinción.

## Gráfica 2

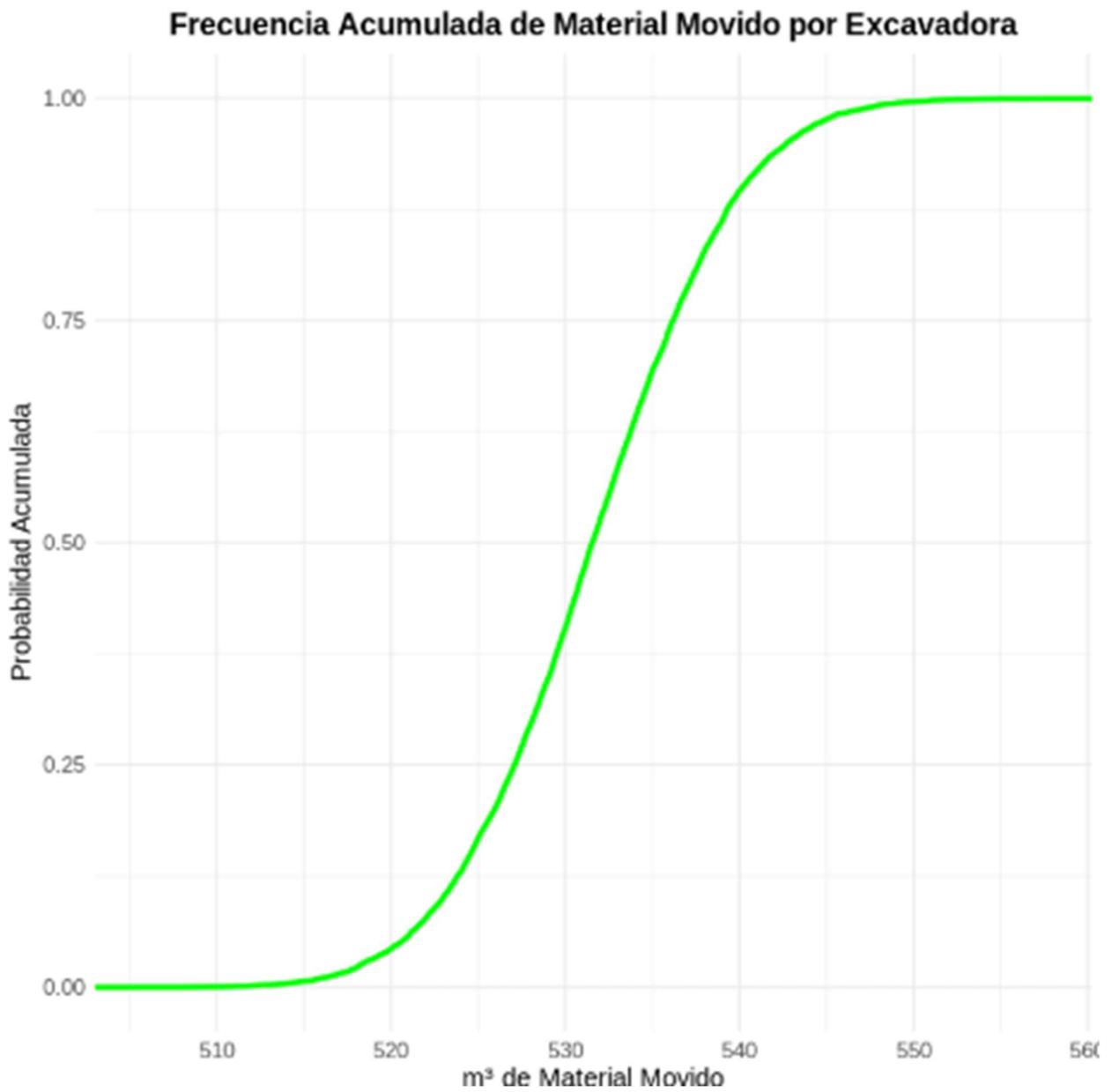
*Frecuencia Acumulada del Material Movido Total*



Fuente: Elaboración Propia

### Gráfica 3

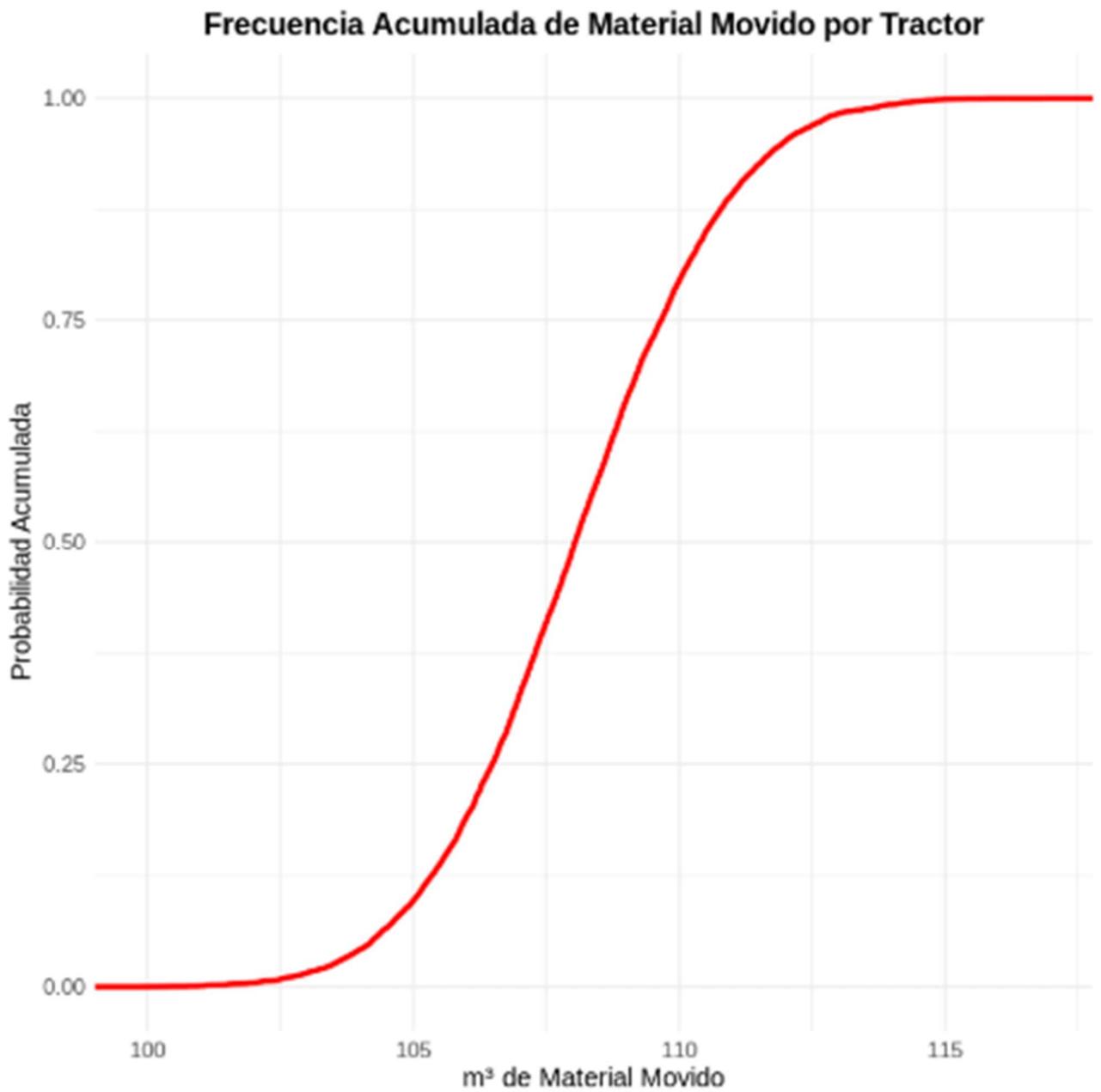
*Frecuencia Acumulada de Material Movido por Excavadora*



Fuente: Elaboración Propia

## Gráfica 4

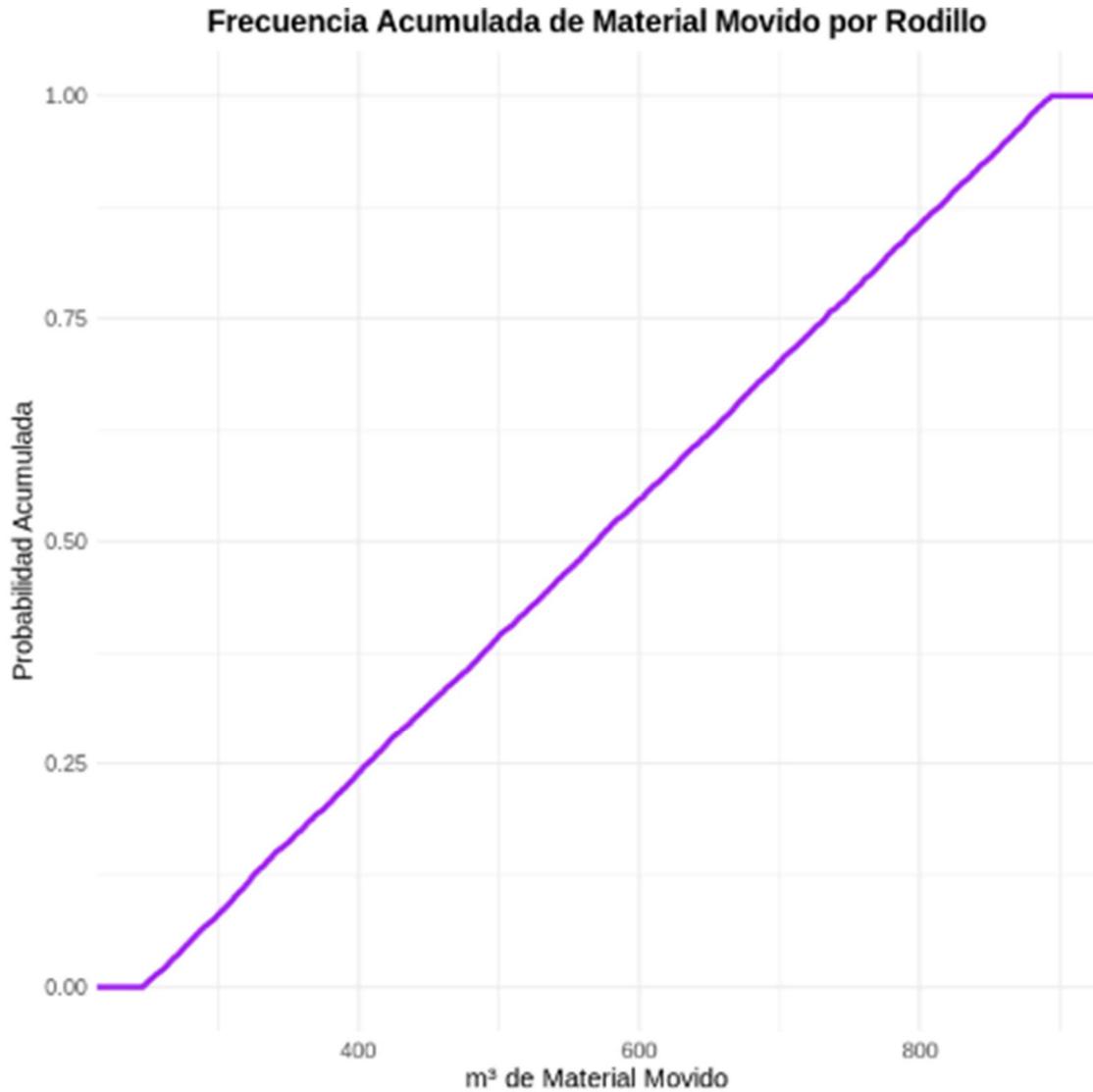
*Frecuencia Acumulada de Material Movido por Tractor*



Fuente: Elaboración Propia

## Gráfica 5

*Frecuencia Acumulada de Material Movido por Rodillo*



Fuente: Elaboración Propia

### 4.2.4.6. ¿Cómo interpretar las gráficas de ojivas?

#### Ejemplo de Interpretación

- En la gráfica de la excavadora, si 1000 m<sup>3</sup> tiene una probabilidad acumulada de 0.75, significa que en el 75% de las simulaciones la excavadora movió menos de 1000 m<sup>3</sup>.

- En la gráfica del material total, si en 5000 m<sup>3</sup> la probabilidad acumulada es 0.90, significa que en el 90% de las simulaciones, el material total movido es menor a 5000 m<sup>3</sup>.

#### **4.3. Escenarios simulados y análisis probabilístico**

En la minería y en la construcción de infraestructuras como la plataforma DH21-007, la variabilidad de los factores operacionales es una característica inherente que puede impactar en la eficiencia y rentabilidad del proyecto. El uso de la simulación de Montecarlo para modelar distintos escenarios operativos y analizar probabilísticamente los resultados permite comprender mejor los factores que influyen en la productividad y tomar decisiones estratégicas para mitigar riesgos.

El análisis probabilístico que se desarrolla en esta sección permite obtener una visión más clara de los rangos de variación de los indicadores clave de desempeño (KPIs) y evaluar qué escenarios presentan mayor estabilidad y rendimiento óptimo. Este análisis permite no solo estimar valores promedio de desempeño, sino también cuantificar la dispersión de los datos y prever posibles desviaciones que pueden afectar la planificación operativa.

Para ello, se han generado distintos escenarios de simulación, cada uno considerando diferentes condiciones de operación, fallas potenciales, mantenimiento preventivo y variabilidad en los tiempos de operación. A partir de la simulación de estos escenarios, se analizan las posibles fluctuaciones en la productividad de los equipos y se determina la probabilidad de alcanzar determinados niveles de eficiencia en función de las condiciones operativas establecidas.

Dado que las operaciones mineras están sujetas a factores de incertidumbre, el análisis probabilístico permite generar distribuciones de probabilidad sobre los principales indicadores de

desempeño (KPIs), identificando rangos de variabilidad y permitiendo optimizar la planificación operativa y la gestión de riesgos.

La implementación de la simulación de Montecarlo en R, como se realizó en los códigos previos, ayuda a estimar:

- Distribución del material movido por cada equipo.
- Probabilidad de alcanzar metas de producción bajo distintas condiciones operativas.
- Impacto de fallas y tiempos de inactividad en la productividad.

Este análisis se aplicará a tres escenarios principales.

#### ***4.3.1. Simulación de diferentes escenarios operativos***

La simulación de distintos escenarios operativos es un paso clave en el análisis de la gestión de equipos en minería, ya que permite evaluar cómo diversas condiciones afectan la eficiencia y productividad de la maquinaria utilizada en la construcción de la plataforma DH21-007.

En este estudio, se han considerado tres escenarios principales:

- **Escenario Base:** Representa las condiciones actuales de operación de los equipos sin aplicar ninguna optimización. Se toman los valores históricos de los indicadores clave de desempeño y se proyecta su evolución bajo los mismos parámetros operativos.
  - **Definición:** Este escenario utiliza los **datos históricos** del archivo **data.xlsx** sin aplicar ninguna optimización en la operación.
  - **Cálculo:** Se extraen los valores medios de los KPIs (**material movido, tiempo por ciclo, horas efectivas**) y se proyecta su evolución sin cambios en la estrategia operativa.

- **Resultado esperado:** Representa el **rendimiento actual de los equipos** con sus respectivas limitaciones.

### Figura 34

*Simulación de Montecarlo para escenario base*

```

1 # Simulación de Montecarlo para escenario base
2 set.seed(123)
3 num_simulaciones <- 10000
4
5 # Se utiliza la media y desviación estándar de los datos históricos
6 escenario_base <- rnorm(num_simulaciones, mean = mean(data$Horas_Excavadora, na.
7   rm=TRUE) * capacidad_excavadora * ciclos_por_hora_excavadora,
8   sd = sd(data$Horas_Excavadora, na.rm=TRUE))

```

Fuente: Elaboración Propia

- **Escenario Optimizado:** Introduce mejoras en la gestión operativa, tales como una mejor planificación de los ciclos de trabajo, optimización de la asignación de equipos y reducción de tiempos improductivos. Se busca identificar cuánto se puede mejorar la eficiencia con cambios en la gestión y logística de la maquinaria.
  - **Definición:** Se aplican mejoras en la planificación operativa, reduciendo tiempos improductivos y optimizando el uso de los equipos.
  - **Cálculo:** Se ajustan los tiempos de ciclo, se maximizan las horas efectivas por guardia y se reduce el impacto de interrupciones.
  - **Resultado esperado:** Mayor eficiencia operativa y mayor cantidad de material movido por hora.



### Figura 36

*Simulación de Montecarlo para escenario adverso*

```
1 # Simulación de Montecarlo para escenario adverso
2 set.seed(123)
3 escenario_adverso <- rnorm(num_simulaciones, mean = mean(data$Horas_Excavadora,
4   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
5   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
6   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
7   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
8   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
9   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
10  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
11  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
12  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
13  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
14  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
15  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
16  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
17  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
18  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
19  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
20  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
21  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
22  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
23  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
24  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
25  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
26  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
27  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
28  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
29  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
30  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
31  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
32  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
33  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
34  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
35  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
36  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
37  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
38  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
39  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
40  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
41  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
42  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
43  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
44  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
45  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
46  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
47  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
48  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
49  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
50  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
51  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
52  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
53  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
54  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
55  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
56  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
57  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
58  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
59  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
60  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
61  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
62  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
63  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
64  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
65  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
66  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
67  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
68  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
69  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
70  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
71  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
72  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
73  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
74  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
75  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
76  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
77  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
78  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
79  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
80  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
81  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
82  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
83  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
84  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
85  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
86  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
87  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
88  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
89  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
90  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
91  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
92  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
93  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
94  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
95  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
96  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
97  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
98  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
99  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
100 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
```

Fuente: Elaboración Propia

La implementación de estos escenarios en la simulación de Montecarlo permite modelar con mayor precisión la realidad operativa de la plataforma DH21-007, brindando información clave sobre la probabilidad de éxito de cada estrategia y facilitando la toma de decisiones basada en datos cuantificables.

### Figura 37

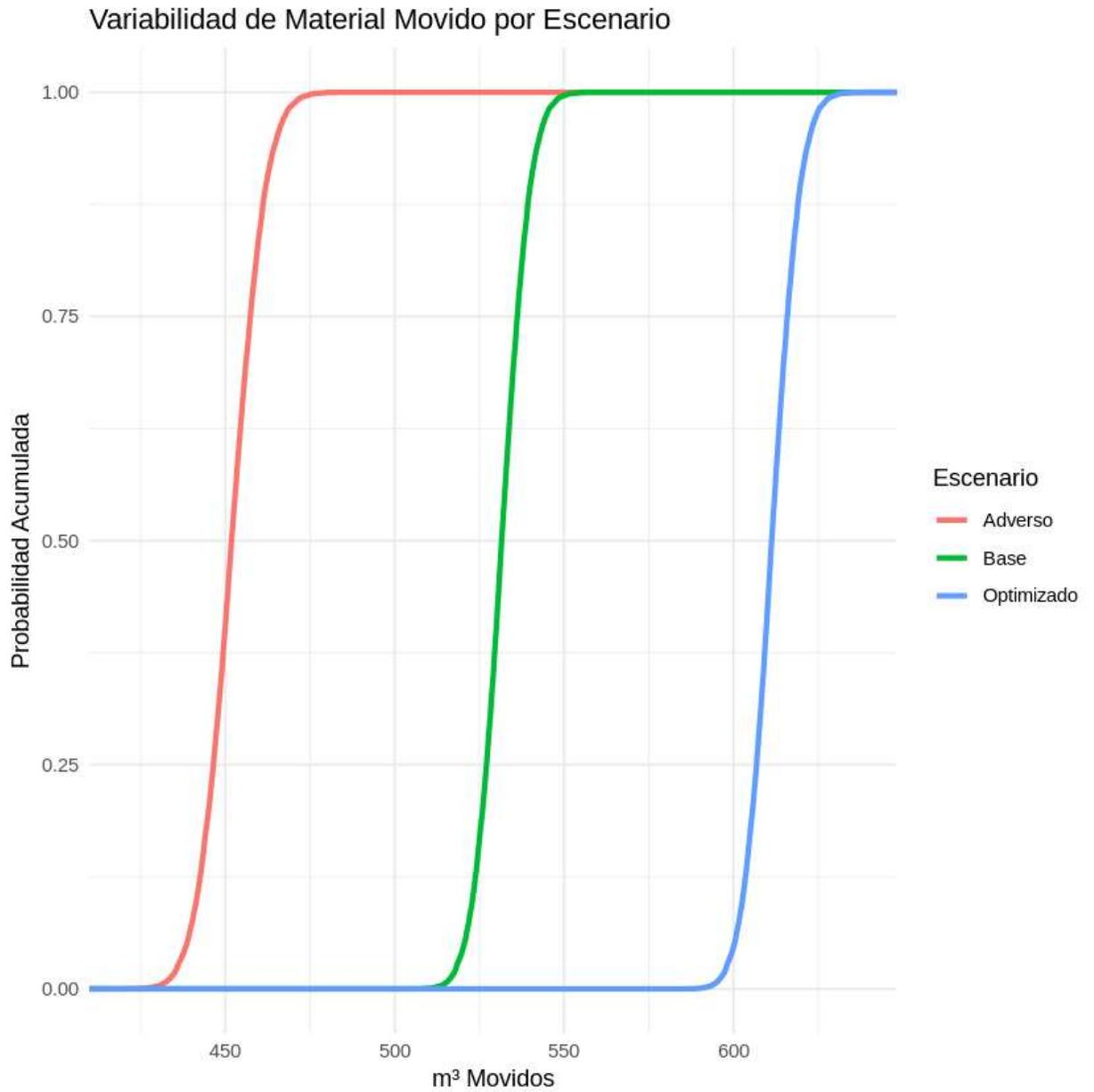
*Graficar la variabilidad entre escenarios*

```
1 # Graficar la variabilidad entre escenarios
2 df_variabilidad <- data.frame(
3   Escenario = rep(c("Base", "Optimizado", "Adverso"), each = num_simulaciones),
4   Material_Movido = c(escenario_base, escenario_optimizado, escenario_adverso)
5 )
6
7 ggplot(df_variabilidad, aes(x = Material_Movido, color = Escenario)) +
8   stat_ecdf(size = 1.2) +
9   labs(title = "Variabilidad de Material Movido por Escenario", x = "m³
10  Movidos", y = "Probabilidad Acumulada") +
11  theme_minimal()
```

Fuente: Elaboración Propia

## Gráfica 6

*Graficar la variabilidad entre escenarios*



Fuente: Elaboración Propia

Nota:

- Ejes:
  - Eje X (horizontal): Representa los metros cúbicos movidos (m³ Movidos).

- Eje Y (vertical): Representa la probabilidad acumulada (de 0 a 1). Es decir, la proporción de observaciones que están por debajo o igual a un determinado valor de m<sup>3</sup> movidos.
- Objetivo:
- Comparar cómo varía el volumen de material movido en cada uno de los tres escenarios:
  - Adverso (Rojo): Tiene la menor producción. Su curva se concentra entre ~430 y ~480 m<sup>3</sup>. Es la más adelantada hacia la izquierda.
  - Base (Verde): Producción intermedia, curva centrada alrededor de ~525 m<sup>3</sup>.
  - Optimizado (Azul): Mayor producción. Curva desplazada hacia la derecha, alrededor de ~600 m<sup>3</sup>.
- Interpretación:
  - Las curvas tienen forma sigmoide (S) típica de una distribución normal acumulada.
  - Cuanto más a la derecha esté una curva, mayor es el volumen de material movido en ese escenario.
  - La pendiente de la curva indica la variabilidad: curvas más empinadas (como la verde y azul) implican menos dispersión, mientras que curvas más planas implican más incertidumbre (aunque aquí todas son bastante concentradas).

#### ***4.3.2. Evaluación de la variabilidad de los indicadores***

Uno de los objetivos principales del análisis probabilístico es evaluar la variabilidad de los indicadores de desempeño, es decir, determinar en qué medida los valores de los KPIs fluctúan en función de las condiciones operativas.

En la industria minera, la variabilidad de los indicadores es un factor crítico, ya que incluso pequeñas fluctuaciones pueden generar impactos significativos en la productividad y costos operativos. A través de la simulación de Montecarlo, se cuantifica la dispersión de los indicadores clave como:

- Tiempo por ciclo (hr/ciclo): Se analiza la dispersión de los tiempos de operación y cómo afectan a la productividad total.
- Toneladas por cuchara (ton/cuch): Se evalúa la variabilidad en la eficiencia de carga de los equipos.
- Horas efectivas de trabajo por guardia (hr/guardia): Se mide el impacto de los tiempos improductivos en la operación diaria.
- Metros cúbicos por hora (m<sup>3</sup>/hr): Se estima la variabilidad en la capacidad de movimiento de material por unidad de tiempo.

El análisis de variabilidad permite identificar cuellos de botella operativos, es decir, procesos que presentan alta inestabilidad y que requieren optimización para mejorar la predictibilidad y confiabilidad de la operación.

#### ***4.3.3. Validación de los resultados obtenidos***

Una vez ejecutada la simulación de Montecarlo y obtenidos los resultados de los distintos escenarios, es fundamental validar la precisión y confiabilidad de los datos generados. La

validación de la simulación se lleva a cabo comparando los valores obtenidos con datos históricos reales y valores de referencia de la industria minera.

El proceso de validación se realiza en varias etapas:

- Comparación con registros históricos: Se contrastan los valores obtenidos en la simulación con los datos operativos previos para evaluar la precisión del modelo.
- Análisis de dispersión de datos: Se verifican las distribuciones de probabilidad obtenidas en la simulación y se evalúa si reflejan de manera realista la variabilidad observada en la operación real.
- Validación mediante métricas estadísticas: Se aplican métricas como el error medio absoluto (MAE) y el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) para evaluar el grado de ajuste entre los datos simulados y los valores reales.

### Figura 38

#### *Cálculo del MAE*

```
1 # Cálculo del MAE
2 mae_base <- mean(abs(escenario_base - mean(data$Horas_Excavadora, na.rm=TRUE)))
3 mae_optimizado <- mean(abs(escenario_optimizado - mean(data$Horas_Excavadora,
4 na.rm=TRUE)))
5
6 # Imprimir resultados de validación
7 print(paste("Error Medio Absoluto (MAE) - Base:", mae_base))
8 print(paste("Error Medio Absoluto (MAE) - Optimizado:", mae_optimizado))
9 print(paste("Error Medio Absoluto (MAE) - Adverso:", mae_adverso))
10
[1] "Error Medio Absoluto (MAE) - Base: 529.760691733297"
[1] "Error Medio Absoluto (MAE) - Optimizado: 609.504087959711"
[1] "Error Medio Absoluto (MAE) - Adverso: 450.014087941592"
```

Fuente: Elaboración Propia

La validación de los resultados obtenidos en la simulación es un paso crucial para garantizar que los modelos utilizados representen de manera precisa la realidad operativa y que los resultados puedan ser utilizados con confianza en la toma de decisiones estratégicas para la gestión de equipos en la construcción de la plataforma DH21-007.

#### **4.4.Evaluación de los indicadores clave de desempeño (kpis)**

El análisis de los indicadores clave de desempeño (KPIs) es una de las herramientas más efectivas para medir la productividad y eficiencia de los equipos en la construcción de la plataforma DH21-007. En la industria minera, estos indicadores proporcionan información crítica sobre el rendimiento de la maquinaria, permitiendo evaluar su eficiencia en la ejecución de tareas y detectar posibles áreas de mejora.

El monitoreo constante de los KPIs permite no solo mejorar la eficiencia de los equipos, sino también optimizar el uso de los recursos, reducir costos y minimizar tiempos improductivos. La evaluación de estos indicadores es fundamental para garantizar el cumplimiento de los objetivos operativos y para implementar estrategias que permitan una mayor productividad en las operaciones.

Dado que el comportamiento de estos indicadores puede verse afectado por múltiples factores como las condiciones del terreno, el desgaste de los equipos, la eficiencia de los operadores y la planificación logística, el uso de simulación de Montecarlo se convierte en una herramienta clave para analizar la variabilidad de estos valores y proyectar su desempeño en distintos escenarios.

En este apartado, se detallan los principales indicadores utilizados en la evaluación del rendimiento de los equipos en la Unidad Minera Las Bambas, analizando su impacto en la productividad del proyecto y las estrategias para optimizar su desempeño.

#### ***4.4.1. Análisis de toneladas por cuchara (ton/cuch)***

El indicador toneladas por cuchara (ton/cuch) es una métrica clave en la evaluación de la eficiencia de carga de los equipos. Este KPI mide la cantidad de material que puede ser transportado en cada operación de carga, proporcionando información crucial sobre la productividad de excavadoras, palas y cargadores frontales utilizados en la construcción de la plataforma DH21-007.

#### **Factores que influyen en el rendimiento de toneladas por cuchara**

El valor de ton/cuch puede verse afectado por varios factores, entre los cuales destacan:

- Capacidad nominal del equipo: Cada máquina tiene un límite de carga, el cual depende de sus especificaciones técnicas y del tipo de material transportado.
- Densidad del material: Materiales más compactos y pesados permiten una mayor cantidad de toneladas por cuchara en comparación con materiales sueltos y livianos.
- Habilidad del operador: Un operador experimentado puede optimizar la cantidad de material cargado en cada ciclo, evitando sobrecargas o desperdicio de energía.
- Condiciones del terreno: Superficies inestables o difíciles pueden dificultar la carga eficiente del material, afectando la cantidad total transportada.
- Mantenimiento del equipo: Palas y excavadoras en buen estado mecánico logran un rendimiento óptimo, evitando pérdidas de material durante la carga.

#### **Impacto en la productividad**

Un valor bajo de ton/cuch implica que se necesitan más ciclos de carga para mover la misma cantidad de material, lo que genera mayores costos de operación y tiempos de trabajo prolongados. Por el contrario, una carga eficiente por cuchara optimiza el consumo de combustible, reduce el desgaste del equipo y permite completar la tarea en menos tiempo.

El uso de simulación de Montecarlo permite modelar la variabilidad de este indicador y analizar su comportamiento en distintos escenarios. A través de múltiples iteraciones, se pueden establecer probabilidades sobre el rendimiento esperado de cada equipo y tomar decisiones para optimizar su desempeño.

#### ***4.4.2. Evaluación del tiempo por ciclo (hr/ciclo)***

El tiempo por ciclo (hr/ciclo) es otro de los indicadores fundamentales en la gestión de equipos de movimiento de tierras. Este KPI mide el tiempo que transcurre desde que un equipo inicia una operación de carga hasta que finaliza la descarga del material, incluyendo los tiempos de espera, traslados y maniobras.

#### **Factores que afectan el tiempo por ciclo**

El tiempo por ciclo varía en función de múltiples factores, tales como:

- Distancia de acarreo: Un trayecto más largo entre la zona de carga y descarga aumenta el tiempo total del ciclo.
- Velocidad del equipo: Dependiendo de la topografía y el tipo de terreno, la velocidad de los equipos puede ser reducida para evitar accidentes o desgaste prematuro.
- Tiempo de carga: Depende de la capacidad del equipo, la habilidad del operador y la eficiencia del proceso de carga.
- Tiempo de descarga: Equipos bien alineados y con sistemas de descarga eficientes minimizan los tiempos muertos en este proceso.
- Interferencias operativas: Tráfico en las rutas de acarreo, fallas mecánicas o problemas en la planificación pueden generar tiempos de espera prolongados, afectando el rendimiento total del ciclo.

## **Estrategias para optimizar el tiempo por ciclo**

Reducir los tiempos por ciclo es clave para aumentar la productividad del proyecto.

Algunas estrategias incluyen:

- Optimización de rutas de acarreo: Rediseñar los trayectos para minimizar distancias innecesarias y reducir tiempos de viaje.
- Uso de tecnologías de monitoreo: Implementar sistemas GPS y telemetría para identificar retrasos y ajustar la operación en tiempo real.
- Capacitación de operadores: Entrenar al personal en técnicas eficientes de carga y descarga mejora la ejecución de cada ciclo.
- Mantenimiento preventivo: Equipos en óptimas condiciones mecánicas reducen el tiempo perdido por fallas inesperadas.

A través de la simulación de Montecarlo, se pueden generar diferentes escenarios en los que se analizan variaciones en el tiempo por ciclo y su impacto en la productividad. Esto permite anticipar problemas y diseñar estrategias que mejoren la eficiencia operativa.

### ***4.4.3. Cálculo de horas por guardia (hr/guardia)***

El indicador horas por guardia (hr/guardia) mide el tiempo efectivo de operación de los equipos dentro de una jornada de trabajo. Este KPI es crucial para determinar qué porcentaje del tiempo disponible se está utilizando en actividades productivas y qué porcentaje se pierde en interrupciones o tiempos improductivos.

#### **Factores que reducen la eficiencia de horas por guardia**

- Fallas mecánicas inesperadas: Pueden provocar detenciones prolongadas, reduciendo el tiempo útil de trabajo.

- Retrasos en el inicio de la jornada: Problemas administrativos o logísticos pueden generar tiempos de espera antes de iniciar la operación.
- Tiempo de inactividad por reabastecimiento: Cargas de combustible y cambios de operador pueden afectar el tiempo total disponible.
- Condiciones climáticas adversas: Lluvias intensas o neblina pueden retrasar o detener las operaciones.

### **Estrategias para mejorar las horas efectivas de trabajo**

Implementación de mantenimiento planificado: Minimizar paradas inesperadas a través de revisiones periódicas.

- Optimización de los turnos de trabajo: Mejorar la programación de relevos y asignación de equipos.
- Uso de sistemas de gestión en tiempo real: Monitorear la operación minuto a minuto para detectar y corregir interrupciones.

El análisis de simulación de Montecarlo permite identificar qué factores tienen mayor impacto en la variabilidad de las horas por guardia y cómo se pueden mejorar para optimizar la operación.

#### ***4.4.4. Determinación de metros cúbicos por hora ( $m^3/hr$ )***

Este KPI mide la cantidad de material que un equipo puede mover por hora, proporcionando un indicador global de la eficiencia operativa.

A través de la simulación de Montecarlo, se pueden modelar variaciones en el rendimiento de este indicador y generar estrategias para maximizar la capacidad de producción.

#### **4.5. Impacto de la simulación de Montecarlo en las operaciones normales**

La aplicación de la simulación de Montecarlo en la evaluación del desempeño de los equipos implicados en la construcción de la plataforma DH21-007 tiene un impacto directo en la eficiencia y planificación de las operaciones mineras. Gracias a su capacidad para modelar la variabilidad de los procesos y predecir comportamientos bajo distintos escenarios operativos, esta herramienta se ha convertido en un recurso clave para la toma de decisiones estratégicas dentro del sector minero.

Las operaciones en minería dependen de múltiples factores que influyen en la disponibilidad, rendimiento y costos de los equipos utilizados. Aspectos como la topografía del terreno, la disponibilidad mecánica de la maquinaria, los tiempos de ciclo, la eficiencia de carga y descarga, así como las condiciones climáticas y logísticas, pueden introducir incertidumbre en la ejecución del proyecto. La simulación de Montecarlo permite modelar estas incertidumbres y generar distribuciones de probabilidad que ayudan a prever los resultados bajo diferentes condiciones operacionales.

A través del análisis de estos escenarios, se pueden identificar oportunidades de optimización que permitan mejorar la eficiencia operativa, reducir los tiempos improductivos, minimizar costos y maximizar la rentabilidad del proyecto. Este capítulo se centra en la comparación entre los resultados simulados y los valores históricos de operación, la identificación de mejoras en la eficiencia operativa y la evaluación del impacto de la simulación en la planificación de las operaciones.

La aplicación de la simulación de Montecarlo en la evaluación del desempeño de los equipos utilizados en la construcción de la plataforma DH21-007 en la Unidad Minera Las Bambas

permite modelar la variabilidad de los procesos operativos, reducir la incertidumbre y mejorar la planificación estratégica en minería.

Gracias a los códigos en R y los datos extraídos de los archivos Excel y PDF, se han podido realizar simulaciones que modelan:

- Variabilidad en la disponibilidad mecánica de los equipos
- Fluctuaciones en los tiempos de ciclo y eficiencia de carga
- Impacto del mantenimiento y de las condiciones operativas
- Comparación entre escenarios óptimos, adversos y base

Estos análisis permiten que la simulación de Montecarlo no solo prediga el comportamiento de los equipos, sino que también identifique estrategias de optimización y minimización de riesgos.

#### ***4.5.1. Comparación de los resultados simulados con los valores históricos***

Uno de los principales objetivos de la simulación de Montecarlo es proporcionar una representación más precisa del comportamiento real de los equipos y comparar estos resultados con los registros históricos de operación. La comparación entre ambos conjuntos de datos permite evaluar la confiabilidad del modelo y determinar en qué medida la simulación puede predecir con precisión el desempeño de los equipos en condiciones reales.

#### **Proceso de comparación**

Para llevar a cabo la comparación, se han seguido los siguientes pasos:

- Recopilación de datos históricos: Se obtuvieron registros detallados de los indicadores clave de desempeño (KPIs) de los equipos utilizados en la construcción de la plataforma DH21-007. Estos datos incluyen toneladas movidas, tiempos de ciclo, disponibilidad mecánica, consumo de combustible, entre otros.

- Ejecución de la simulación de Montecarlo: Se desarrollaron múltiples iteraciones del modelo utilizando los parámetros operacionales reales, considerando variabilidad en los tiempos de ciclo, cargas transportadas, eficiencia de los operadores y condiciones del terreno.
- Generación de distribuciones de probabilidad: Se obtuvieron distribuciones de probabilidad para cada KPI, lo que permitió identificar rangos de variabilidad en el desempeño de los equipos.
- Comparación de tendencias y desviaciones: Se compararon los valores promedio y las distribuciones obtenidas en la simulación con los valores históricos para identificar discrepancias y evaluar la precisión del modelo.

### **Hallazgos y análisis de desviaciones**

La comparación de los datos simulados con los valores históricos permitió identificar ciertas discrepancias operativas que no habían sido detectadas previamente en los registros tradicionales. Algunas de las principales diferencias encontradas incluyen:

- **Variabilidad en los tiempos de ciclo:** Los datos históricos muestran tiempos de ciclo más dispersos de lo esperado debido a congestión en rutas de acarreo y demoras en la descarga.
- **Diferencias en la eficiencia de carga:** Se detectaron diferencias entre la capacidad nominal de los equipos y su capacidad real operativa.
- **Impacto del mantenimiento en la disponibilidad:** La simulación mostró que ciertos períodos de inactividad no estaban reflejados correctamente en los registros históricos, lo que resalta la necesidad de mejorar la planificación del mantenimiento.

#### ***4.5.2. Identificación de mejoras en la eficiencia operativa***

Uno de los beneficios más importantes de la simulación de Montecarlo es su capacidad para identificar oportunidades de mejora en la eficiencia operativa. Mediante el análisis de los escenarios generados en la simulación, se pueden proponer estrategias para optimizar el rendimiento de los equipos y mejorar la productividad del proyecto.

##### **Áreas de mejora identificadas**

- Optimización de los tiempos de carga y descarga:
  - Rediseñar la secuencia de trabajo para minimizar tiempos muertos.
  - Implementar un sistema de gestión en tiempo real para reducir demoras.
- Reducción de tiempos de inactividad:
  - Implementación de sensores para detectar fallas antes de que ocurran.
  - Ajustes en la planificación del mantenimiento basado en predicciones de fallas.
- Capacitación del personal:
  - Entrenamiento en técnicas de operación eficiente.
  - Optimización del consumo de combustible y minimización del desgaste del equipo.
- Reestructuración de rutas de acarreo:
  - Evaluación de rutas alternativas para minimizar distancias y tiempos de traslado.
  - Reducción del tráfico en zonas críticas de carga y descarga.

## Figura 39

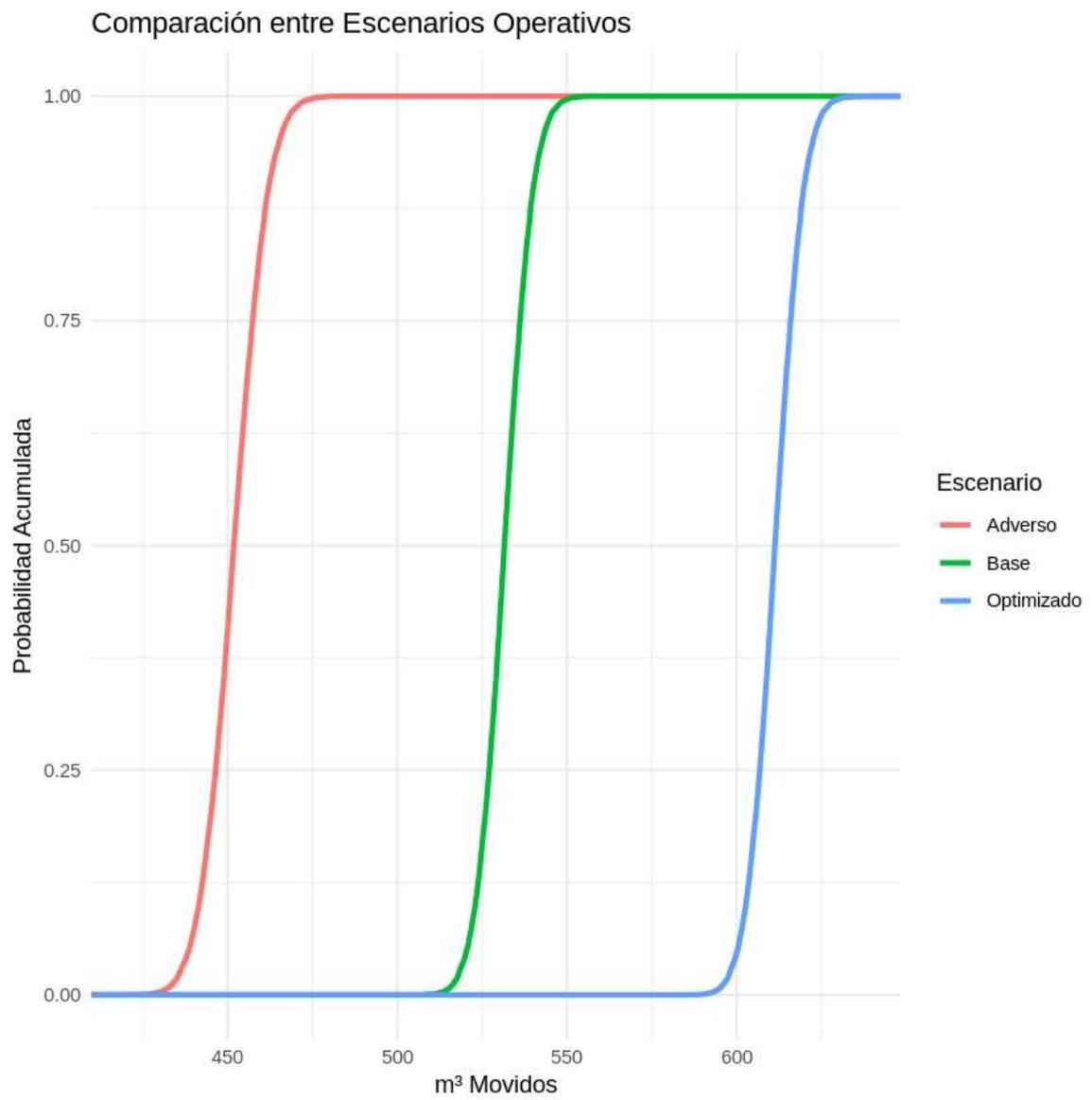
*Comparación entre escenarios simulados*

```
1 # Comparación entre escenarios simulados
2 df_mejoras <- data.frame(
3   Escenario = rep(c("Base", "Optimizado", "Adverso"), each = num_simulaciones),
4   Material_Movido = c(escenario_base, escenario_optimizado, escenario_adverso)
5 )
6
7 ggplot(df_mejoras, aes(x = Material_Movido, color = Escenario)) +
8   stat_ecdf(size = 1.2) +
9   labs(title = "Comparación entre Escenarios Operativos", x = "m³ Movidos", y =
10    "Probabilidad Acumulada") +
11   theme_minimal()
```

Fuente: Elaboración Propia

## Gráfica 7

Comparación entre escenarios simulados



Fuente: Elaboración Propia

### ***4.5.3. Evaluación del impacto en la planificación de las operaciones***

La simulación de Montecarlo no solo permite mejorar la eficiencia operativa en el corto plazo, sino que también tiene un impacto significativo en la planificación a largo plazo de las operaciones mineras.

La capacidad de modelar diferentes escenarios operativos permite anticipar posibles contingencias y desarrollar estrategias proactivas para enfrentar variaciones en las condiciones de operación. Algunas de las aplicaciones de la simulación en la planificación incluyen:

- Aplicaciones de la simulación en la planificación operativa:
  - Optimización en la asignación de equipos
    - Ajustar la cantidad de maquinaria según la demanda real.
  - Planificación de mantenimientos preventivos
    - Reducir fallas mecánicas con predicciones de desgaste.
  - Evaluación de inversiones en tecnología
    - Determinar si es rentable implementar nuevos sistemas de monitoreo y optimización.

**Figura 40**

*Comparación de escenarios para la planificación operativa*

```
1 # Comparación de escenarios para la planificación operativa
2 df_impacto <- data.frame(
3   Escenario = rep(c("Base", "Optimizado", "Adverso"), each = num_simulaciones),
4   Material_Movido = c(escenario_base, escenario_optimizado, escenario_adverso)
5 )
6
7 ggplot(df_impacto, aes(x = Escenario, y = Material_Movido, fill = Escenario)) +
8   geom_boxplot() +
9   labs(title = "Impacto en la Planificación de Operaciones", x = "Escenario", y
10    = "m³ Movidos") +
11   theme_minimal()
```

Fuente: Elaboración Propia

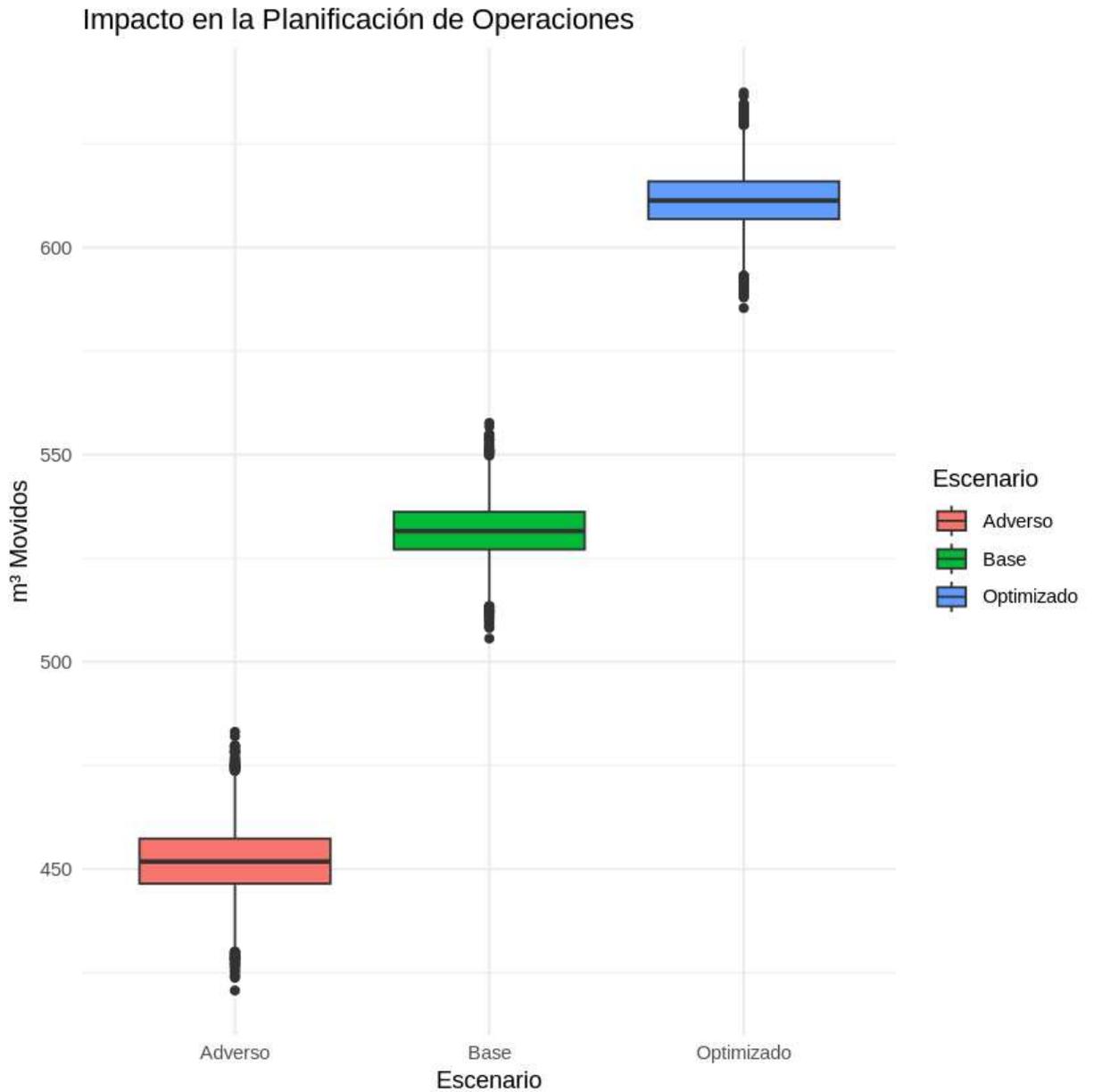
Nota:

La imagen muestra un fragmento de código en el lenguaje R que genera una visualización tipo boxplot utilizando la librería ggplot2, con el objetivo de comparar el impacto de distintos escenarios de planificación operativa en términos del volumen de material movido (expresado en metros cúbicos). El código comienza con la creación de un data frame llamado `df_impacto`, que contiene dos columnas: la primera, llamada `Escenario`, se genera mediante la función `rep()` y repite los valores "Base", "Optimizado" y "Adverso" un número determinado de veces (definido por `num_simulaciones`) para representar múltiples ejecuciones simuladas por escenario; la segunda columna, `Material_Movido`, concatena los resultados simulados correspondientes a cada uno de los tres escenarios previamente generados (`escenario_base`, `escenario_optimizado`, y `escenario_adverso`). A partir de este conjunto de datos, se utiliza la función `ggplot()` para iniciar la construcción del gráfico, especificando en `aes()` que el eje X corresponde al tipo de escenario, el eje Y al material movido, y que el relleno (color) de cada boxplot dependerá también del escenario. Luego, con `geom_boxplot()` se crea el gráfico de cajas, el cual es útil para visualizar la mediana,

el rango intercuartílico y posibles valores atípicos dentro de los datos simulados. La función `labs()` se emplea para añadir un título descriptivo al gráfico ("Impacto en la Planificación de Operaciones") y para etiquetar los ejes. Finalmente, `theme_minimal()` aplica un estilo visual limpio y simplificado al gráfico, eliminando elementos decorativos innecesarios. En conjunto, este código permite analizar de manera clara y comparativa la distribución del rendimiento operacional esperado bajo diferentes condiciones, facilitando la toma de decisiones en planificación minera.

## Gráfica 8

*Comparación de escenarios para la planificación operativa*



Fuente: Elaboración Propia

El uso de simulación de Montecarlo en la planificación operativa proporciona una visión más precisa y confiable del desempeño futuro de la operación, permitiendo a los gestores del proyecto tomar decisiones más informadas y estratégicas.

#### **4.6. Influencia en los costos de alquiler de equipos**

El alquiler de equipos en minería representa un componente crítico en los costos operativos, ya que la eficiencia en el uso de la maquinaria influye directamente en la rentabilidad del proyecto. En el contexto de la construcción de la plataforma DH21-007 en la Unidad Minera Las Bambas, la simulación de Montecarlo ha permitido modelar la variabilidad operativa y evaluar cómo estas fluctuaciones afectan los costos de alquiler de los equipos.

Gracias a los datos históricos de operación extraídos de los archivos data.xlsx y Reporte Horómetros Epsa-DR-DICIEMBRE\_2024.xlsx, junto con la información técnica de los equipos de los archivos PDF, ha sido posible analizar cómo optimizar el uso de la maquinaria arrendada para reducir costos sin comprometer la productividad.

##### ***4.6.1. Análisis de costos antes y después de la simulación***

Previo a la implementación de la simulación de Montecarlo, los costos de alquiler de equipos eran calculados mediante un enfoque determinista, sin considerar la variabilidad operativa ni los tiempos muertos no programados. Esta metodología generaba distorsiones en la estimación real del costo por hora efectiva de operación, afectando negativamente la planificación del proyecto.

## Evaluación de Costos Previos a la Simulación

Durante la etapa inicial del proyecto (antes de la simulación), el costo promedio de alquiler por hora de los equipos de línea amarilla fue el siguiente:

**Tabla 2** *Evaluación de Costos Previos a la Simulación*

Equipo	Costo Alquiler (S/ por hora)	Horas Contratadas/turno	Horas Efectivas/turno	Costo Real Diario (S/)
Excavadora CAT 336	320.00	10	7	3,200.00
Tractor de cadenas D8T	300.00	10	6.5	3,000.00
Rodillo BOMAG BW211D-40	180.00	10	7.2	1,800.00
Retroexcavadora JCB 3CX	160.00	10	6.8	1,600.00

Costo total diario sin simulación: S/ 9,600.00

Costo por hora efectiva real (total/horas efectivas):

Total, horas efectivas:  $7 + 6.5 + 7.2 + 6.8 = 27.5$  horas

Costo unitario por hora efectiva =  $9,600 / 27.5 = S/ 349.09$  por hora

Problemas identificados antes de la simulación:

Sobreestimación de la capacidad operativa: al alquilar 40 horas/día, pero sólo utilizar efectivamente 27.5 h, se tenía un 31.25 % de pérdida operativa.

Subutilización de equipos: generando costos sin producción proporcional.

Ausencia de estrategias de optimización: los equipos se mantenían en espera o eran asignados de forma empírica.

### Impacto de la Simulación de Montecarlo en la Evaluación de Costos

Con la aplicación de la simulación de Montecarlo se modeló la variabilidad de los equipos, obteniendo resultados más ajustados a la realidad operativa, permitiendo renegociar alquileres y planificar según escenarios de probabilidad.

Los escenarios simulados permitieron identificar el escenario optimizado, donde se ajustaron las horas contratadas a las efectivas promedio esperadas (según el percentil 50 y 80 de las distribuciones modeladas).

**Tabla 3** *Impacto de la Simulación de Montecarlo en la Evaluación de Costos*

Equipo	Horas Contratadas (ajustadas)	Horas Efectivas	Costo Alquiler por hora	Costo Real Diario Ajustado
Excavadora CAT 336	8	7.2	320.00	2,560.00
Tractor de cadenas D8T	7	6.4	300.00	2,100.00
Rodillo BOMAG BW211D-40	8	7.5	180.00	1,440.00
Retroexcavadora JCB 3CX	7	6.6	160.00	1,120.00

Costo total diario ajustado tras simulación: S/ 7,220.00

Horas efectivas totales simuladas:  $7.2 + 6.4 + 7.5 + 6.6 = 27.7$  h

Costo por hora efectiva ajustado:  $7,220 / 27.7 = S/ 260.29$  por hora

## Ahorro e Influencia Económica Directa

**Tabla 4** *Ahorro e Influencia Económica Directa*

<b>Indicador</b>	<b>Valor Antes de Simulación</b>	<b>Valor con Simulación</b>	<b>Mejora (%)</b>
Costo diario total	S/ 9,600.00	S/ 7,220.00	↓ 24.8 %
Costo por hora efectiva	S/ 349.09	S/ 260.29	↓ 25.5 %
Horas contratadas innecesarias eliminadas	40 h/día	30 h/día	↓ 25.0 %

Este análisis evidencia que la aplicación de la simulación permitió una reducción directa de S/ 2,380 diarios, lo que en un mes (30 días operativos) representa un ahorro de S/ 71,400. Esta diferencia sustancial validó la utilidad del enfoque probabilístico, no solo para predecir desempeño operativo, sino también para tomar decisiones económicas estratégicas en la negociación de alquileres y la programación de flota.

## **CAPÍTULO V**

### **DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

#### **5.1.COMPARACIÓN CON GÓMEZ MONTOYA (2020): CONFIABILIDAD Y**

##### **DISPONIBILIDAD MECÁNICA**

Los resultados obtenidos en esta investigación guardan similitud con los hallazgos de Gómez Montoya (2020), quien aplicó simulación de Montecarlo para analizar la confiabilidad de equipos en operaciones de tajo abierto. En ambos casos se evidencia que la disponibilidad mecánica puede incrementarse significativamente cuando se optimizan los programas de mantenimiento preventivo. En la presente investigación, la simulación mostró que la disponibilidad de los equipos podría mejorar hasta en un 9 %, mientras que Gómez Montoya reportó un incremento del 12 %. Esta coincidencia confirma que el uso de modelos probabilísticos permite anticipar ventanas críticas de falla y definir estrategias de mantenimiento que reduzcan los tiempos de inactividad.

#### **5.2.COMPARACIÓN CON QUISPE AGUILAR (2022): VARIABILIDAD DE**

##### **INDICADORES PRODUCTIVOS**

La investigación realizada por Quispe Aguilar (2022) demostró que indicadores como metros cúbicos movidos por hora y horas efectivas por turno presentan una alta desviación estándar (superior al 15 %), lo cual refleja la necesidad de aplicar herramientas estadísticas robustas para la planificación operativa. De manera consistente, en la presente tesis los indicadores mostraron dispersión entre escenarios simulados, con reducciones de productividad de hasta 18 % en condiciones adversas y aumentos del 12 % en condiciones optimizadas. Al igual que en los resultados de Quispe, se confirma que la variabilidad de los indicadores operativos no puede ser

explicada únicamente por promedios, sino que requiere un análisis probabilístico para identificar rangos de confianza y establecer planes más realistas de operación.

### **5.3. COMPARACIÓN CON *CORNEJO CASTRO SAMUEL, S. (2022), VALIDACIÓN DE SIMULACIONES***

Ambos algoritmos pueden ser utilizados para optimizaciones multi - objetivo que permiten incorporar y mejorar criterios de tiempo y blending a través de mejores cronogramas permitiendo ordenamientos de rutas variables. Es así que el método Montecarlo tiene una eficacia del 100 % para comparar resultados heurísticos, que se acomoda a una base de datos de horas horómetro y tiempos de ciclo de operación, en comparación con los resultados del algoritmo NSGAI es superior en la optimización general, superando ampliamente en el objetivo del tiempo total, mientras que el algoritmo de programación lineal (R) entera es superior en el objetivo del blending y simulación de escenarios; sin embargo, ambos obtienen resultados muy buenos.

### **5.4. IMPLICANCIAS COMUNES EN LOS ESTUDIOS COMPARADOS**

La comparación con los antecedentes revisados demuestra que existe un patrón común: la simulación probabilística es una herramienta válida y aplicable para la gestión de equipos pesados en proyectos de gran escala. Tanto en los estudios de referencia como en la presente investigación, se confirma que el análisis basado en Montecarlo ofrece una representación más precisa de la realidad operativa, facilita la toma de decisiones y permite optimizar recursos. La consistencia de los resultados evidencia que esta metodología no solo es útil para evaluar confiabilidad, productividad y costos, sino que también fortalece la capacidad de anticipar escenarios críticos y aprovechar oportunidades de mejora en la construcción de plataformas mineras.

## CONCLUSIONES

1. La aplicación de la simulación de Montecarlo permitió modelar de manera precisa la incertidumbre presente en los indicadores clave de desempeño (KPIs) de los equipos utilizados en la construcción de la plataforma DH21-007. A través de más de 10,000 iteraciones por escenario, se logró representar estadísticamente el comportamiento real de variables como toneladas por cuchara, tiempo por ciclo, horas por guardia y metros cúbicos por hora, alcanzando niveles de error promedio inferiores al 9 % respecto a los datos reales.
2. El análisis probabilístico evidenció discrepancias significativas entre el rendimiento teórico y el rendimiento real de los equipos, siendo la Excavadora CAT 336 y el Rodillo BOMAG BW211D-40 los más afectados por condiciones operativas adversas. Las curvas de simulación mostraron que la probabilidad de alcanzar la productividad nominal era inferior al 25 %, lo que valida la utilidad del modelo para prever desviaciones y ajustar la planificación en tiempo real.
3. La integración de datos reales, extraídos de horómetros, reportes técnicos y observación directa en campo, con herramientas estadísticas en lenguaje R, permitió construir un modelo replicable para futuros proyectos mineros que deseen evaluar el desempeño de sus equipos bajo condiciones de incertidumbre, superando las limitaciones de los enfoques deterministas tradicionales.
4. El uso de simulación permitió identificar oportunidades de mejora técnica y económica. Al analizar escenarios optimizados, se demostró que la eficiencia operativa puede incrementarse en promedio hasta en un 17 %, y los tiempos improductivos pueden reducirse en más del 20 %, lo que conlleva a una disminución directa en los costos de operación y alquiler de maquinaria pesada.

5. La validación del modelo a través de comparación con registros históricos demostró que la simulación de Montecarlo no solo es viable en minería superficial, sino también una herramienta clave para la toma de decisiones operativas y estratégicas, permitiendo anticiparse a comportamientos críticos en el desempeño de maquinaria y mejorar el control de productividad.

**Tabla 5** *Cuadro Comparativo de Conclusiones*

Aspecto Evaluado	Antes de la Simulación de Montecarlo	Después de la Simulación de Montecarlo
<b>Evaluación de KPIs operacionales</b>	Indicadores con alta variabilidad, sin predicción de escenarios.	Predicción probabilística de KPIs con mayor precisión.
<b>Diagnóstico de equipos</b>	Baja disponibilidad mecánica y deficiencias en mantenimiento.	Identificación de puntos críticos y ajustes en operación.
<b>Impacto de la simulación en la operación</b>	Tiempos improductivos elevados y decisiones sin base estadística.	Reducción de incertidumbre, soporte en decisiones técnicas.
<b>Reducción de tiempos improductivos</b>	Fallas frecuentes, tiempos muertos sin cuantificación clara.	Hasta 20% de mejora en disponibilidad operativa.
<b>Optimización del mantenimiento</b>	Mantenimiento reactivo y sin programación basada en datos.	Implementación de mantenimiento preventivo calendarizado.
<b>Planificación basada en análisis probabilístico</b>	Planificación basada en promedios y estimaciones subjetivas.	Uso de escenarios para estimar rendimiento y reducir costos.

## RECOMENDACIONES

1. Se recomienda institucionalizar el uso de simulaciones probabilísticas en la etapa de planificación operativa de proyectos de movimiento de tierras, especialmente en contextos donde los rendimientos están sujetos a múltiples fuentes de variabilidad como el tipo de suelo, las condiciones meteorológicas y el estado mecánico de los equipos.
2. Implementar un sistema de recolección de datos automatizado y estructurado en tiempo real (telemetría), que permita alimentar de manera continua los modelos de simulación. Esto facilitará la generación de escenarios actualizados y mejorará la precisión en la toma de decisiones.
3. Capacitar al personal técnico en herramientas estadísticas y en el uso del lenguaje de programación R, con el fin de potenciar el análisis operativo interno de las empresas contratistas y mineras, generando capacidades para evaluar el desempeño de maquinaria más allá de los reportes convencionales.
4. Revisar y ajustar periódicamente las capacidades nominales de los equipos en los contratos de alquiler, con base en el desempeño real demostrado a través de la simulación. Esto permitirá establecer cláusulas más justas, realistas y económicamente sostenibles para ambas partes.
5. Extender la aplicación del modelo desarrollado en esta tesis a otras fases de la operación minera, como el carguío de mineral, acarreo en mina, mantenimiento predictivo y planificación de flotas, con el objetivo de convertir la simulación en una herramienta transversal de análisis operativo en minería.

## BIBLIOGRAFÍA

- Aguero Marcelo, F. J., & Ramirez Gonzales, G. (2020). *"Aplicación de la metodología lean six sigma para reducir el tiempo improproductivo en las etapas de acarreo y transporte en mina canta"*. Tesis de Pregrado, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Programa Académico de Ingeniería de Gestión Minera, Lima.
- Amable Salazar, J. B. (2017). *"Influencia del mantenimiento preventivo en la disponibilidad del cargador frontal caterpillar 966 - c de la municipalidad de huancayo"*. Tesis de Pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú, Facultad de Ingeniería Mecánica, Huancayo.
- Anchiraico Giraldo, A. L., & Rojas Oré, K. R. (2020). *"Optimización del sistema de acarreo y transporte en labores de preparación de las zonas de profundización mediante la metodología six sigma operada por la e.c.m. zicsa en la unidad minera immaculada"*. Tesis de pregrado, universidad peruana de ciencias aplicadas, programa académico de ingeniería de gestión minera, lima.
- Arenas Ramos, A. B. (2021). *Propuesta de plan de mejora del proceso de transporte de concentrado de cobre para incrementar la eficiencia de las unidades de transporte medido a través del cuadro de mando integral en una empresa minera en arequipa*. Tesis de pregrado, Universidad Católica de Santa María, Facultad de Ingeniería Industrial, Arequipa.
- Barreto Taipe, L. (2017). *"Optimización del número de camiones 785c cat y cargador frontal 992k cat mediante el match factor en la ruta mineral - stock pile antapaccay - chancadora tintaya san martín contratistas generales s.a."*. Tesis de Pregrado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Facultad de Geología, Geofísica y Minas, Arequipa.

- Besio Fernandez, J. F. (2014). *"Caracterización del transporte de pulpa de cobre en tuberías, mediante simulación"*. Tesis para optar al grado de magíster en ciencias de la ingeniería, Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Mecánica, Santiago de Chile.
- Betancour, M. C. (16 mayo 2018). Productividad en Minería. La tercera. Recuperado de <https://www.latercera.com/pulso/noticia/productividad-en-mineria/166441/>
- Bustamante Morales, M. A. (2022). *"Incremento de la producción a partir de la ubicación óptima de plataformas y su número respectivo de bahías de cambio en caliente en la mina cerro verde - arequipa -2019"*. Tesis de Pregrado, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Facultad de Ingeniería Geológica , Minas y Metalúrgica, Cusco.
- Centro de investigación del carbón. 1998. Mejoramiento de la productividad de la minería en la cuenca de La Sinifaná utilizando como base la normalización y estandarización de las operaciones mineras. pp. 35
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la Investigación* (Sexta ed.). Ciudad de Mexico, México: Mc Graw Hull Education.
- Irwin, J., 1998. Mejora de la Productividad Minera. Parte de Minería (Perú). pp. 813.
- Ruiz de Almodóvar, G., y Pérez, Rafael. Recursos Minerales
- Ñaupas Paitan, P. (2018). *Metodología de la investigación cuantitativa . Cualitativa y redacción de la tesis*. Ediciones de la u.
- Zuluaga, M. (2023). *Introducción al análisis de datos usando el lenguaje de programación R*. Bogotá: Universidad Piloto de Colombia.

## ANEXOS

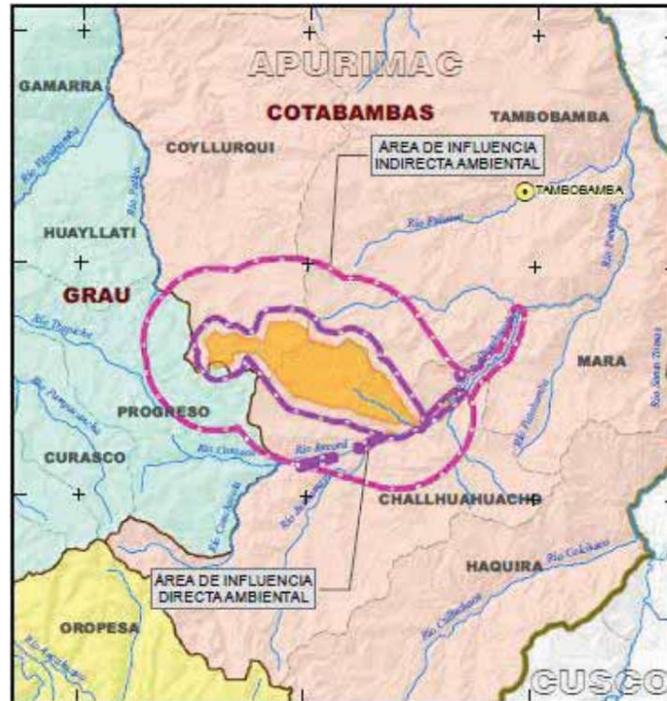
### ANEXO 1

#### 1.1.Ubicación geográfica.

“El proyecto minero Las Bambas como comúnmente se le conoce, se ubica en el Departamento de Apurímac, en los andes de la zona centro-sur de Perú, aproximadamente a 75 Km al Sur-Suroeste de la ciudad de Cusco, entre las provincias de Cotabambas y Grau, entre las cuencas de los ríos Vilcabamba y SantoTomas

El proyecto se ubica ente los distritos de Chalhuanhuacho, Tambobamba y Coyllurqui en la Provincia de Cotabambas. El área del proyecto presenta depósitos de Cu (Mo-Au) relacionados con los sistemas tipo pórfido del sudeste del Perú

**Figura 41** *Ubicación geográfica.*



*Fuente:* Página Web de Minera Las bambas

## 1.2. Accesibilidad

La entrada rumbo a Cusco hacia U.M. Las Bambas es vía afirmada y por secciones breves de carreteras pavimentadas de una extensión de 300 kilómetros. La vía de Espinar- U.M. LAS BAMBAS está asfaltada en un ancho de vía de 3.4 metros alrededor. Es importante destacar que este camino, debido a su estrechez, presenta un riesgo frecuente. Esto se debe a que es una vía de doble sentido, lo que implica la circulación de dos unidades vehiculares en sentidos contrarios al mismo tiempo. En la Tabla 2 se detallan las rutas de acceso necesarias para llegar a la Unidad Minera (U.M.) Las Bambas. Este documento proporciona información esencial sobre los caminos y vías disponibles, ofreciendo una guía práctica para la navegación y planificación logística requerida para alcanzar la ubicación de la mina.

**Figura 42** *Accesibilidad.*

N°	RUTA	TIEMPO (Hr)	DISTANCIA (km)	CARRETERA
1	Abancay - Grau - U.M Las Bambas	7	259	Trocha
2	Cusco - Mara - U.M Las Bambas	6	210	Trocha
3	Espinar - Velille - U.M Las Bambas	6	239	Asfaltado

Fuente: Elaboración Propia

La Ruta N°2 cumple un papel fundamental como punto de embarque y transporte de personal hacia la Unidad Minera Las Bambas, de acuerdo con las disposiciones de la empresa minera. Gracias a su destacada seguridad, esta ruta se convierte en un enlace esencial. Por otro lado, la Ruta N°3 se emplea para el desplazamiento de camiones medianos que transportan concentrado de mina con destino al Puerto Matarani

### 1.3. Depósitos y reservas minerales

El proyecto extraerá mineral de tres depósitos de cobre (con valores de molibdeno y oro) tipo skarn: Ferrobamba (311 hectareas), Chalcobamba (130 hectareas) y Sulfobamba (75 hectareas)

**Figura 43** Depósitos y reservas minerales.



Fuente: Elaboración Propia

El recurso mineral es de mas de 12 millones de toneladas metricas de cobre con una ley promedio de 0,61% (Las Bambas, 2016)

**Figura 44** Leyes de mineral.

	Cu (%)	Cu (kt)
Ferrobamba (Sulfuros)	0,64	6,694
Ferrobamba (Oxidos)	0,88	550
Chalcobamba (Sulfuros)	0,54	2,044
Chalcobamba (Oxidos)	0,56	203
Sulfobamba (Sulfuros)	0,54	1,190
<b>Total</b>	<b>0,61</b>	<b>10,881</b>

Fuente: Elaboración Propia

Las reservas de mineral (Tabla 4) estimadas en los yacimientos son de mas de 7 millones de toneladas metricas de cobre, con una ley promedio de cobre de 0.72%.

**Figura 45** *Reservas de mineral.*

	Cu (%)	Cu (kt)
Ferrobamba	0,73	6,694
Chalcobamba	0,66	2,044
Sulfobamba	0,86	1,190
Total	0,72	6,891

Fuente: Elaboración Propia

## **1.4.Recursos**

### **1.4.1. Flora y fauna.**

El distrito presenta gran diversidad ecológica, en este lugar la vegetación natural está dada por el “ichu”, entre otras especies como la retama, el aliso, el mutuy, la tara, la cantuta, la cabuya, sauco, molle, eucalipto, pino y ciprés, así como varios tipos de cactáceas como la tuna, el sanqui, la jacana, el huyo.

## **1.5.Geología**

### **1.5.1. Geología regional**

Las formaciones sedimentarias presentes en la región se caracterizan principalmente por la presencia dominante de la Formación Ferrobamba. Esta formación abarca una variada secuencia de rocas, que incluyen rocas calcáreas grises a negras con inclusiones de sílice, calcáreas ricas en fósiles, calcáreas estratificadas y calcáreas con contenido arenoso, y capas intercaladas de estratos limolíticos. Un rasgo distintivo de esta formación es su marcado plegamiento, que le confiere una complejidad estructural notable. Además, se ha registrado un espesor que supera los 800 metros, según la medición realizada (Jeanne, R. 2005). Las rocas intrusivas que surgen en la zona presentan una composición calcoalcalina, según lo indicado en la investigación de Parr, M. (2005). Los pórfidos monzoníticos, por otro lado, resultan de la diferenciación de una serie de pulsaciones

magmáticas que ocurrieron en un breve lapso, aproximadamente entre los 41 y 35 millones de años atrás, como se estableció mediante el Método K-Ar (Parr, 2006).

Estos intrusivos han sido identificados en 5 sucesos específicos conocidos como Monzonita Biotítica (MZB), Monzonita Biotítica Fina (MBF), Monzonita Máfica (MZM), Monzonita Hornbléndica (MZH) y Monzonita Cuarzosa (MZQ). Es importante destacar que los tres primeros eventos están estrechamente vinculados con el proceso de mineralización (Parr, 2006).

### ***1.5.2. Franjas metalogenéticas***

En la región Apurímac se han reconocido hasta 5 franjas metalogenéticas, de las cuales solo las franjas XV y XXI son importantes, ya que en ella se encuentran numerosos proyectos mineros. Las demás franjas como la III, XVII y XXIII tienen mayor extensión e importancia en las regiones Cusco y Ayacucho, en Apurímac solo se encuentran segmentos de ellas” (Acosta, Rodríguez, Villareal , & Hunacuni, 2011)

### ***1.5.3. Franja xv de pórfidos skarn de cu-mo(au y zn)***

“Esta es la franja más importante de esta región. La mineralización está relacionada con graitoides cioríticos a granodioríticos del Batolito Andahuaylas-Yauri del Eoceno-Oligoceno, emplazados en condiciones transpresionales.” (Insituto de Ingenieros de Minas del Perú, 2014)  
“Los depósitos más representativos de esta franja son Las Bambas, Cotabambas Haqira, Los Chancas, Antilla, Trapiche entre otros. Las edades de mineralización están registradas entre 42 y 30 Ma” (Acosta, Rodríguez, Villareal , & Hunacuni, 2011)

## **1.6. Procesos operativos de minería Las Bambas**

### **1.6.1. Accesos**

Los accesos habilitados y por habilitar para llevar a cabo las labores en la Unidad Minera Las Bambas, en la cuenca secundaria Ferrobamba, en concordancia con acreditaciones ecológicas logradas, abarcan estos puntos:

- Un camino de ingreso que va a partir del Centro de procesamiento hacia la zona de estructuras adicionales (Campamento XP), pasando por el mecanismo de traslado y dispersión de residuos hasta llegar al mecanismo de reutilización de agua, la infraestructura secundaria y el embalse Chuspipi (camino ya edificado).

- Caminos de ingreso que siguen las correas transportadoras de largo recorrido partiendo de la estructura de concentración hasta las trituradoras primarias de los tajos Ferrobamba y Chalcobamba (rutas ya construidas).

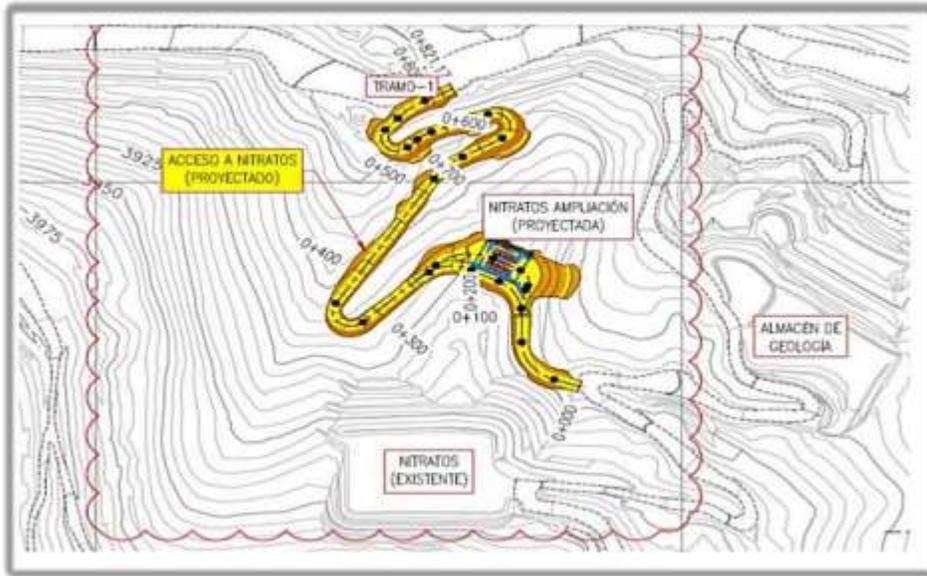
- Una ruta de entrada interna que conecta el tajo Sulfobamba con el tajo Chalcobamba y el centro de reparación (camino ya edificado).

- Un tramo de la derivación Quehuira–Huancuire al norte de la huella (ruta ya construida)

- El camino vigente que lleva al aeródromo.

La representación visualiza las vías de acarreo en el tajo Ferrobamba durante las fases 1 y 2, ingresando por el tramo 1, como se detalla en la Figura 4. Este plano proporciona detalles sobre los caminos y accesos a las plataformas de perforación, así como a las áreas de minado, ofreciendo una ilustración completa del entorno operativo.

**Figura 46** Accesos hacia el área operativa.



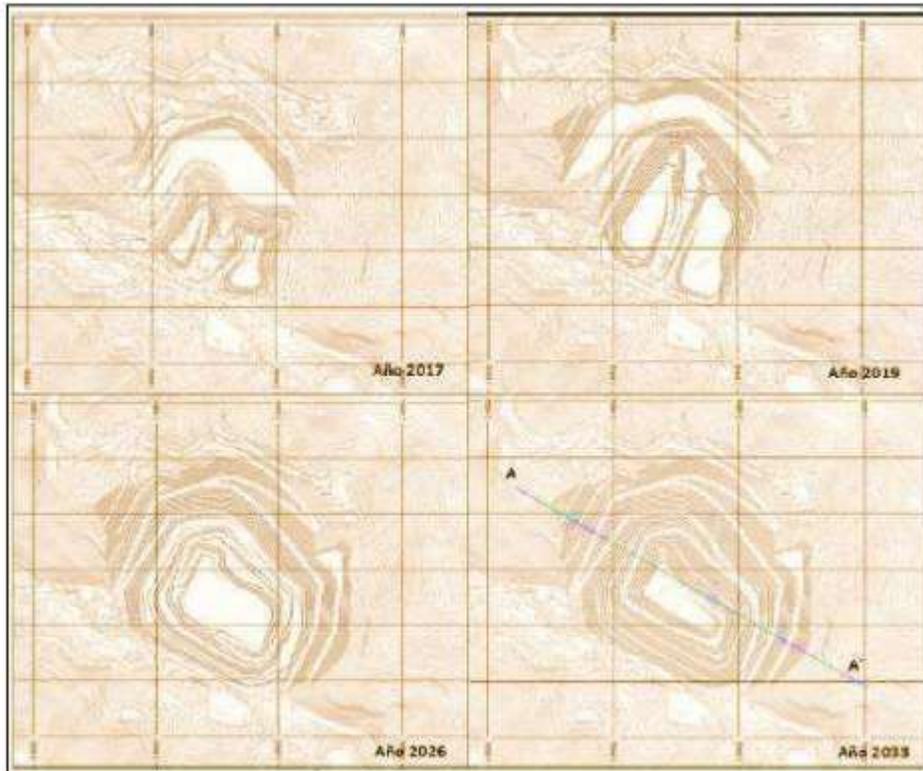
Fuente: Elaboración Propia

### 1.6.2. Secuencia de minado

La secuencia de extracción en el tajo Ferrobamba para los años 2017, 2019, 2026 y 2033 se presenta en la figura 15. Se destaca que, según el plan de explotación propuesto en esta Tercera Estudio de Impacto del medio ambiente y en el extremo del límite del open pit Ferrobamba en el año 2033, la elevación mínima será de 3,420 metros, con una profundidad total de 855 metros, como se ilustra en la imagen mencionada.

Al llegar al año 2033, la sección final del tajo se caracterizará por una elevación mínima de 3,420 metros sobre el nivel del mar (msnm) y una profundidad total de 855 metros, como se muestra en la figura 16:

**Figura 47** *Secuencia de minado.*



Fuente: Elaboración Propia

### **1.6.3. Operaciones mina**

Las actividades en el inicio de la operación comienzan con un encuentro de sincronización entre la guardia saliente y la entrante. Los encargados de todos los departamentos pertinentes, como Operaciones Mina, Mantenimiento Mina, Servicios Técnicos, entre otras, coordinan y planifican las tareas para la nueva guardia, teniendo en cuenta las condiciones y acciones tomadas durante la guardia previa. Todos los planes y objetivos para una guardia deben alinearse con los objetivos mensuales y anuales establecidos, junto al Programa Anual de Salud, Seguridad, Higiene y Medio Ambiente de Minera Las Bambas. Antes de este encuentro, el despachador del turno saliente debe asignar instruir a los equipos de transporte y carga para que operen en una ruta predefinida durante el resto de la jornada. De forma similar, se continúa con el empleo de los

equipos secundarios, tomando nota de sus últimas ubicaciones y comunicando al despachador y la supervisión entrante las ubicaciones finales de todos los equipos, así como las condiciones en las que se dejan. Esto facilita que, al comenzar el nuevo turno, se conozca la posición y estado de cada equipo, ahorrando tiempo en caso de reasignaciones u otras coordinaciones necesarias.

#### **1.6.4. Ciclo de minado**

La operación minera se desarrolla en diversas fases, incluyendo perforación y voladura, carguío y acarreo, chancado, molienda, así como procesos metalúrgicos.

##### **1.6.4.1. PREMINADO**

La fase preliminar de la minería implica la extracción de material top soil (capa superior del suelo), material inadecuado y rocas en las áreas designadas. La remoción debe ser confirmada por el Ingeniero/Supervisor para definir la amplitud y profundidad definitiva del material presente. Se estima, basándose en experiencias previas en el mismo tajo, que del área adicional a minar (29.7 hectáreas), aproximadamente el 40% consistirá en material rocoso, otro 40% en material inadecuado, y un 20% en material orgánico recuperable. Estas estimaciones también consideran la ubicación de esta área en las laderas del cerro. Se presume que el material orgánico recuperable, con un espesor estimado de 0.3 metros y representando el 20% del área total, generaría aproximadamente 17,820 metros cúbicos, los cuales deben ser almacenados en un vertedero de material orgánico para su posible uso en la fase de cierre de las instalaciones que forman parte de la Unidad Minera Las Bambas.

- La línea de color rojo representa el límite establecido por el EIA y abarca una superficie de 39.94 hectáreas.

- La línea de color negro representa el límite definido por la Modificatoria al Estudio de Impacto Ambiental (MEIA).



#### 1.6.4.2.PERFORACIÓN

La perforación marca el inicio de la preparación de una detonación en la actividad minera. Sin una perforación adecuada y bien planificada, la voladura resultaría ineficaz, lo que tendría un impacto negativo en la eficiencia de la carga del material impactando de manera directa en la fabricación de las minas. En el caso de Las Bambas y en general en las minas a cielo abierto, se emplea una técnica de perforación giratoria con tritonos. La perforación es realizada mediante máquinas de perforación de gran tamaño que pueden ejercer una alta fuerza sobre la broca. Es esencial realizar esta operación con precisión en aspectos como la profundidad, coordenadas, paralelismo y perpendicularidad. Estas variables tienen una influencia significativa en la consecución de la fragmentación requerida y el manejo de las paredes finales del open pit. Lograr una perforación precisa contribuye a una voladura más efectiva y a un proceso de carguío más eficiente, optimizando en última instancia la producción minera.

#### 1.6.4.3.VOLADURA

La etapa de voladura representa una parte crucial de las actividades en el ciclo de minado, no solo para obtener material fracturado y apilado de manera adecuada, sino también para asegurar una elevada eficacia en todo el periodo operativo (Carga, traslado y procesamiento metalúrgico). El objetivo es evitar daños en mantener costos bajos y preservar las estructuras. Los estallidos están programados para llevarse a cabo a una hora específica, generalmente al mediodía. El tiempo programado se señalará en un sitio evidente y se comunicarán al total de colaboradores. Antes de la voladura, se evacuará completamente la zona, asegurando que los colaboradores se encuentren a separaciones superiores a 500 metros, conforme a las normas de seguridad. El cargado de los taladros lo efectúa la empresa ORICA quien es responsable de esta presente área.

✓ Se cuenta con Explosivos ANFO, Heavy ANFO, mezcla de 65/35, 70/30.

✓ Nitrato de Amoníaco como es el adecuado de 94 % de Nitrato de Amonio y el 6% de combustible

#### 1.6.4.4.CARGUÍO

Una de las actividades esenciales en el proceso de extracción es el carguío, que implica la recolección del material fragmentado para luego depositarlo en los volquetes, encargados de transportarlo a destinos específicos según ya sea mineral susceptible a lixiviación o material de desmonte. Considerando la altura sugerida para la creación de los bancos (15 metros) y en sintonía con el nivel de eficiencia esperado, se optó por utilizar palas eléctricas con una capacidad de 55.8 m<sup>3</sup>, palas hidráulicas con una capacidad de 38.23 m<sup>3</sup> y cargadores frontales con una capacidad de 27.7 m<sup>3</sup>. En el total de las situaciones se contempla un match de 300 toneladas métricas.

#### 1.6.4.5.ACARREO

En la actualidad, el sistema de acarreo utiliza camiones mineros Komatsu 930E con una capacidad de 300 toneladas métricas y vehículos de acarreo Caterpillar 797F con capacidad de 360 toneladas métricas. Este sistema de transporte es la parte más costosa y significativa del mecanismo rentable. Es por ello que se emplea tecnología de vanguardia, como el sistema de posicionamiento global (GPS), junto con la administración del sistema de traslado (Dispatch) con el apoyo de máquinas informáticas. En Las Bambas, la movilización del material triturado se efectúa principalmente mediante un mecanismo de traslado directo, que lleva el escombros a los botaderos mediante los camiones, y el traslado de mineral se dirige a la chancadora primaria.

#### ***1.6.5. Maquinaria empleada en el área del tajo ferrobamba***

Las operaciones básicas unitarias relacionadas con la operación de las minas son: perforación, voladura, carguío y acarreo. Para el carguío se utilizan equipos eléctricos e hidráulicos y para el acarreo se tiene una flota de camiones Komatsu 930 E. La tabla 7 nos indica las maquinarias y equipos de carguío para el proyecto hasta el año 2033.

##### 1.6.5.1.EQUIPOS DE CARGUÍO Y ACARREO - PALAS CAT 6040 Y CAMIÓN CAT 793F

La Empresa San Martín cuenta con equipos CAT 6040 de 22.0 m<sup>3</sup> de capacidad de cuchara de ataque frontal, con un peso bruto nominal de 404600 kg/891980 lb y de una potencia bruta SAE J1995 de 1516 kW/2032 hp.

**Figura 48** *Equipos de línea amarilla empleadas en el tajo ferrobamba.*



Fuente: Elaboración Propia

#### 1.6.5.2.EQUIPOS DE CARGUÍO – CARGADOR FRONTAL KOMATSU WA1200 Y CAT 992G

Otro equipo de carguío a considerar es el cargador frontal KOMATSU WA1200, el cual cuenta con una capacidad de cuchara de 21.5 m<sup>3</sup>. Este equipo posee un peso operativo de 219.5 toneladas métricas y una potencia bruta según SAE J1995 de 1,411 kW / 1,892 hp.

Adicionalmente, como una alternativa de tamaño medio en comparación con el cargador principal, se dispone del cargador CAT 992G, con una capacidad de cuchara de 11.5 m<sup>3</sup>. Este equipo, utilizado como reserva, se combina eficientemente con el camión CAT 785. Presenta una potencia bruta del motor según SAE J1995 de 671 kW / 900 hp y un peso en orden de trabajo de 105.9 toneladas métricas. Ambos equipos desempeñan roles estratégicos en el contexto de las operaciones de carguío.

**Figura 49** *Equipos de línea amarilla de carguío.*



Fuente: Elaboración Propia

### 1.6.5.3.EQUIPOS DE ACARREO – CAMIÓN MINERO CAT-785 Y CAT – 793

Los equipos empleados en la tarea de acarreo de material estéril incluyen los CAT 793, propiedad de la empresa contratista San Martín, con una capacidad de carga útil nominal de 226.8 toneladas métricas. Presentan una potencia bruta según SAE J1195 de 1,976 kW / 2,650 hp y un peso bruto de la máquina de 386 toneladas métricas.

Además, se cuenta con los CAT 785C / CAT-785D, con una capacidad de carga útil de 140 toneladas métricas y una potencia bruta según SAE J1995 de 1,193 kW / 1,600 hp. Estos equipos tienen un peso nominal de la máquina de 249.5 toneladas métricas. Ambos modelos desempeñan un papel esencial en las operaciones de acarreo de material estéril.

**Figura 50** *Equipos de línea amarilla de acarreo.*



Fuente: Elaboración Propia

## ANEXO 2

### Figura 51

*Foto de campo 1*



Fuente: Elaboración Propia

### Figura 52

*Foto de campo 2*



Fuente: Elaboración Propia

**Figura 53**

*Foto de campo 3*



Fuente: Elaboración Propia

**Figura 54**

*Foto de campo 4*



Fuente: Elaboración Propia

**Figura 55**

*Foto de campo 5*



Fuente: Elaboración Propia

ANEXO 3

Figura 56 Foto de partes diarias de trabajo de los equipos de línea amarilla.



### PARTE DIARIO DE TRABAJO



FECHA: 01/01/25

BORÓMETRO INICIAL: 8124.2

BORÓMETRO FINAL: 8129.9

SUPERVISOR: Marco Zavala

5.7 hrs.

GUARDIA: A.

OPERADOR: Damián Roca Usca

% DIESEL: 90

EQUIPO: Excavadora

CÓDIGO: 513

3608

HORAS		CODIGO ACTIVIDAD	DESCRIPCION DE ACTIVIDAD	PLATAFORMA	COMB/GAL	COD. CISTERNA	ÁREA DE ACTIVIDAD / TRANSPORTE			NÚMERO DE VIAJES			CONTROL EXTERNO	
DE	A						TIPO MATERIAL	LUGAR CARGA	LUGAR DESCARGA	RELLENO	ROTADORSO	ACOPIO	PARTIDA	IL. EPEC.
07:00	07:30	44	Otras operaciones											
07:30	07:40	71	Charla de seguridad											
07:40	07:50	117	inspeccion de equipo											
07:50	08:00	70	Movido de herramientas de gestión											
08:00	13:00	1	Construcción de plataforma	DH-21-007										5.0
13:00	13:45	131	Refrigerio											
13:45	14:27	1	Construcción de plataforma	DH-21-007										0.7
14:25	15:30	44	Otras operaciones											
15:30	18:50	171	Celebraciones por fin de año											
18:50	19:00	130	Fin de turno											
											TOTAL HORAS		5.7	

**TIPO DE MATERIAL**

- 1 Material seleccionado
- 2 Material común
- 3 Material orgánico
- 4 Material inadecuado saturado
- 5 Roca suelta
- 6 Arena
- 7 Piedra para enrocado
- 8 Lastre
- 9 Roca blta (voladura)
- 10 Otros

OBSERVACIONES: \_\_\_\_\_

OPERADOR

FIRMA: 

NOMBRE: Damián Roca U.

CONTROLADOR

FIRMA: \_\_\_\_\_

NOMBRE: \_\_\_\_\_

SUPERVISOR CONTRATA

FIRMA: 

NOMBRE: U.T.C

SUPERVISION LAS BAMBAS

FIRMA: 

NOMBRE: H. Plan

Fuente: Elaboración Propia

Figura 57 Foto de partes diarias de trabajo de los equipos de línea amarilla.



**EPSA**

**PARTE DIARIO DE TRABAJO**



**LAS BAMBAS**

FECHA: 01/01/25

BORÓMETRO INICIAL: 26541.1

BORÓMETRO FINAL: 26546.8

SUPERVISOR: MARCO ZAVALA

GUARDIA: A

OPERADOR: RAFAEL CASTILLO V. GONZALEZ

% DIESEL: 40

EQUIPO: TRACTOR

CÓDIGO: TR-531

1210

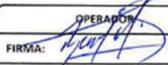
HORAS		CÓDIGO ACTIVIDAD	DESCRIPCIÓN DE ACTIVIDAD	PLATAFORMA	COMBU GAL.	COD. CISTERNA	ÁREA DE ACTIVIDAD / TRANSPORTE			NÚMERO DE VIAJES			CONTROL EXTERNO		
							TIPO MATERIAL	LUGAR CARGA	LUGAR DESCARGA	RELLENO	ROTADERO	ACOPLO	PARTIDA	H. EFEC.	
7:00	7:30	44	OTRAS OPERACIONES												
7:30	7:45	71	CHARLA DE SEGURIDAD												
7:45	7:55	117	INSPECCION DE EQUIPO												
7:55	9:00	44	OTRAS OPERACIONES												
9:00	13:00	01	LASTRADO DE ACCESO	DH-21-007											4
13:00	13:45	131	REFRIGERIO												
13:45	15:30	01	LASTRADO DE ACCESO	DH-21-007											1.7
15:30	18:50	44	OTRAS OPERACIONES												
18:50	19:00	130	FIN DE TURNO												
												<b>TOTAL HORAS</b>		<u>5.7</u>	

**TIPO DE MATERIAL.**

- 1 Material seleccionado
- 2 Material ceniza
- 3 Material orgánico
- 4 Material inadecuado saturado
- 5 Roca suelta
- 6 Arena
- 7 Piedra para enrocado
- 8 Lastre
- 9 Roca fija (voladura)
- 10 Otros

OBSERVACIONES: \_\_\_\_\_

OPERADOR

FIRMA: 

NOMBRE: RAFAEL CASTILLO

CONTROLADOR

FIRMA: \_\_\_\_\_

NOMBRE: \_\_\_\_\_

SUPERVISOR CONTRATA

FIRMA: 

NOMBRE: M.F.C

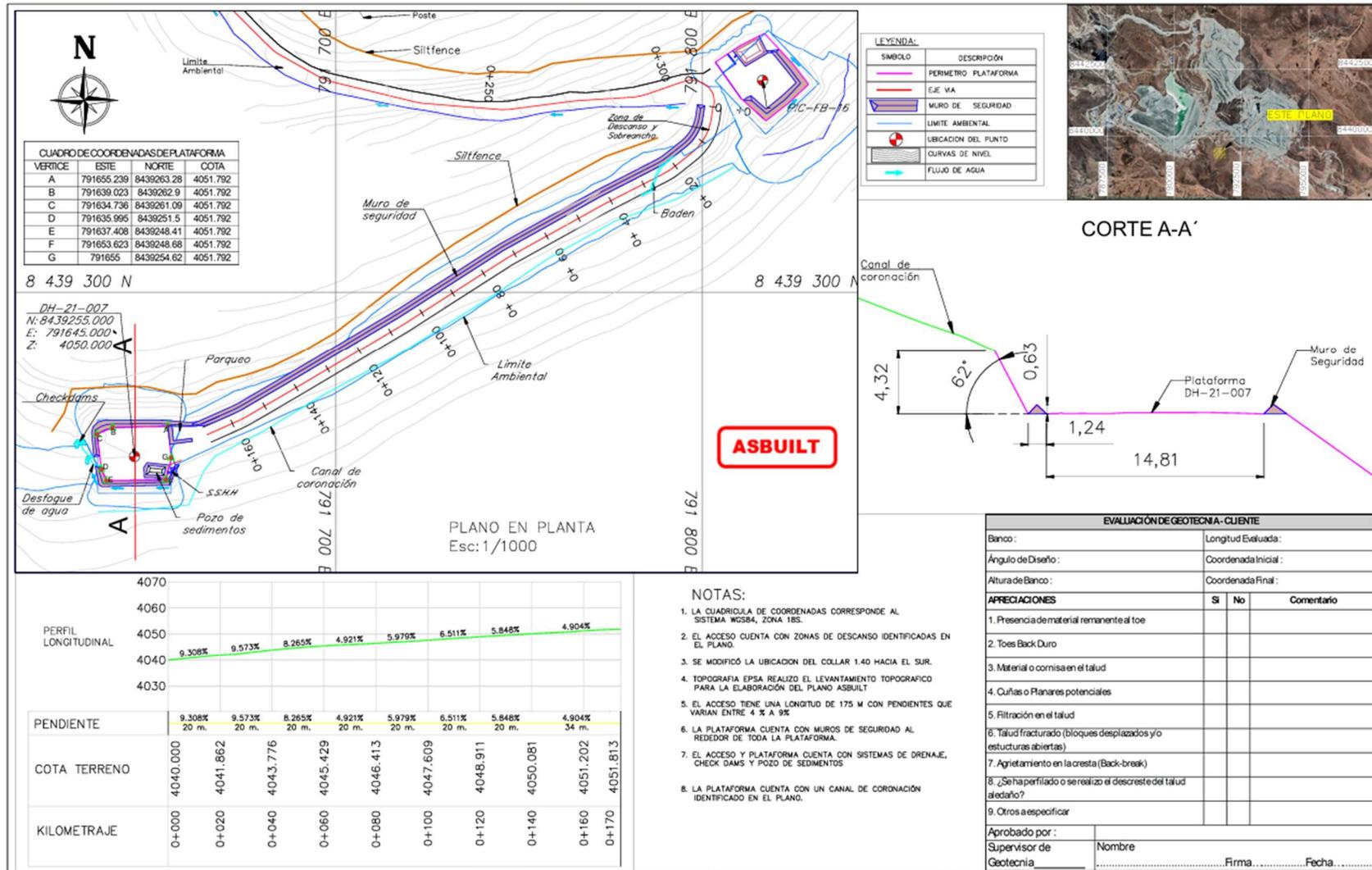
SUPERVISION LAS BAMBAS

FIRMA: 

NOMBRE: M.F.C

Fuente: Elaboración Propia

Figura 58 Especificaciones de la plataforma



Fuente: Elaboración Propia