

# Universidad Católica Redemptoris Mater

Facultad de Ingeniería y Arquitectura



Tesis monográfica para optar al título de  
ingeniería industrial

Plan de mejora de productividad en procesos productivos y/o servicios

*Propuesta de optimización para la reducción de los tiempos de espera de la flota de camiones de acarreo de mineral en el parqueo de la mina El Limón mediante simulación computacional, durante el primer trimestre del 2024*

## **AUTOR(ES)**

Blandón Cáceres, Maryann de los Ángeles

Espinoza Hernández, Cesia Jemima

Kauffman Jirón, Frederick Sebastian

## **TUTOR CIENTÍFICO Y METODOLÓGICO**

Mendoza Casanova, José Jesús

Máster en Docencia Universitaria, UAB, España

Doctor en Matemáticas Aplicadas, UNAN, Managua

ORCID: 0009-0006-9968-1986

**Managua, Nicaragua**

**27 de julio del 2024**

## **CARTA AVAL TUTOR CIENTÍFICO Y METODOLÓGICO**

Por medio de la presente, y en mi calidad de tutor científico y metodológico, certifico que el trabajo de investigación titulado: “Propuesta de optimización para la reducción de los tiempos de espera de la flota de camiones de acarreo de mineral en el parqueo de la Mina El Limón mediante simulación computacional, durante el primer trimestre del 2024”, realizado por Maryann de los Ángeles Blandón Cáceres, Cesia Jemima Espinoza Hernández y Frederick Sebastian Kauffman Jirón, cumple con las disposiciones institucionales, metodológicas y técnicas, que regulan esta actividad académica, y constituye su tesis monográfica para optar al título de Ingeniero Industrial.

Y para que así conste, en cumplimiento con la normativa vigente, autorizo a las y los egresados, reproducir el documento definitivo para su entrega oficial a la facultad correspondiente, para que pueda ser tramitada su lectura y defensa pública.

Managua, Nicaragua, 27 de julio de 2024.

Atentamente,

José Jesús Mendoza Casanova

Máster en Docencia Universitaria, UAB, España

Doctor en Matemáticas Aplicadas, UNAN, Managua

[jmendoza8@unica.edu.ni](mailto:jmendoza8@unica.edu.ni)

## **Dedicatoria**

*A mis padres, por su amor incondicional, su apoyo constante y sus innumerables sacrificios. Gracias por enseñarme el valor del esfuerzo y la perseverancia.*

*A mis profesores y mentores, por su guía y sus conocimientos, que han sido fundamentales en mi desarrollo académico y personal.*

*A mis amigos y compañeros, por su compañía, su aliento y los momentos compartidos durante este camino.*

***Maryann de los Ángeles Blandón Cáceres***

*A mis amados padres, Marlon Espinoza y Carmen Hernández, con profunda gratitud, dedico este logro a ustedes, quienes han sido pilares inquebrantables en mi camino hacia la superación personal y profesional. Su amor incondicional, apoyo constante y sabios consejos han sido la brújula que me ha guiado en cada paso.*

*A mis hermanos, Karla y Germán Arauz, en ustedes he encontrado no solo hermanos, sino también segundos padres. Su presencia en mi vida ha sido un regalo invaluable. Gracias por su infinita paciencia, comprensión y apoyo incondicional, especialmente en los momentos más difíciles y estresantes.*

*Finalmente, a mis queridos amigos, especialmente a Frederick y Maryann, que a lo largo de estos años de carrera, han sido ustedes mi refugio y apoyo en los momentos de tristeza, alegría y estrés. A todos ustedes, con inmensa emoción y cariño, dedico este logro.*

***Cesia Jemima Espinoza Hernández***

*A mis padres, por su amor incondicional y apoyo constante en cada paso de este camino. Su esfuerzo y sacrificio han sido la base sobre la cual he construido mis sueños y metas.*

*A mis amigos, quienes han estado presentes en los momentos de alegría y dificultad, brindándome su compañía, consejos y aliento.*

*A mis profesores, por compartir su conocimiento y experiencia, guiándome y motivándome a alcanzar la excelencia académica y personal.*

***Frederick Sebastian Kauffman Jirón***

## **Agradecimiento**

*Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas que hicieron posible la realización de esta tesis.*

*En primer lugar, agradezco a mis directores de tesis, Dr. Jesús Mendoza , por su invaluable orientación, paciencia y apoyo a lo largo de todo el proceso de investigación. Sus consejos y sugerencias fueron esenciales para la culminación de este trabajo.*

*A mi familia, por su amor incondicional, comprensión y apoyo constante. Gracias por estar siempre a mi lado y por ser mi fuente de motivación y fortaleza.*

*A mis amigos y compañeros de estudios, por los buenos momentos, por compartir conocimientos y por su apoyo moral en los momentos más difíciles.*

*Finalmente, a todas las personas y entidades que, de una manera u otra, contribuyeron al desarrollo de este trabajo. A todos ustedes, mi más sincero agradecimiento.*

***Maryann de los Ángeles Blandón Cáceres***

*En primer lugar, elevo mi más sincero agradecimiento a Dios, por la guía, el ánimo y la sabiduría que me brindó para culminar con éxito esta importante etapa de mi vida.*

*De manera muy especial quiero agradecer al Ing. Evert López jefe y amigo, por su invaluable apoyo y generosidad al compartir información y recursos fundamentales para el desarrollo exitoso de este proyecto. Agradezco profundamente su paciencia y disposición para responder a mis preguntas y aclarar mis dudas, sin importar la hora o el día. Su colaboración fue un pilar elemental en mi camino hacia esta meta.*

*Así mismo, extendiendo mi más sincero agradecimiento a mis compañeros de área quienes con su paciencia y amabilidad también fueron parte de este proceso al siempre estar dispuestos a explicarme conceptos complejos, resolver mis dudas y compartir sus conocimientos. Su colaboración y apoyo crearon un ambiente de aprendizaje enriquecedor que sin duda contribuyó al éxito de esta tesis. Con mucho cariño, les dedico estas palabras de gratitud y agradecimiento.*

*También agradezco a nuestro tutor el Dr. Jesús Mendoza quien no sólo nos apoyó con sabiduría y paciencia nuestra investigación, sino que también nos brindó palabras de aliento y ánimo en cada paso del camino. Agradezco de igual manera al Ing. Deglis Centeno por sumarse a este reto y por brindarnos generosamente su tiempo y experiencia. Sus aportes fueron inmensamente valiosos para cada uno de nosotros.*

*Finalmente, a mis queridos padres, dedico un agradecimiento infinito por su amor incondicional y apoyo inquebrantable. Su fe en mis capacidades, incluso en los momentos más difíciles, ha sido el motor que me ha impulsado a seguir adelante. Gracias por ser mi fuente de inspiración y por enseñarme el valor del trabajo duro y la perseverancia.*

***Cesia Jemima Espinoza Hernández***

*Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que han contribuido a la realización de esta tesis:*

*A Dios, por ser mi guía y fortaleza, y por darme la sabiduría y perseverancia para alcanzar mis metas. Su presencia ha sido mi mayor fuente de inspiración y esperanza.*

*A mis padres, por ser mi mayor fuente de inspiración y por enseñarme el valor del esfuerzo y la dedicación. Su confianza y apoyo han sido fundamentales para completar esta etapa de mi vida.*

*A mis profesores y tutores, especialmente al Dr. José Jesús Mendoza Casanova, por su valiosa orientación, sus consejos y por compartir su vasto conocimiento. Su dedicación y compromiso han sido esenciales para la realización de este trabajo. Quiero expresar mi gratitud también al Ing. Deglis Centeno por su ayuda y compartir generosamente su tiempo y experiencia. Sus contribuciones fueron extremadamente valiosas para todos nosotros.*

*A mis compañeros de estudio, por los momentos compartidos y por el apoyo mutuo a lo largo de esta trayectoria.*

*Finalmente, agradezco a todas aquellas personas que, de alguna manera, contribuyeron a la culminación de este proyecto. Su colaboración y aliento han sido invaluable para alcanzar este logro.*

***Frederick Sebastian Kauffman Jirón***

## **Resumen**

El documento aborda la optimización de los tiempos de espera de la flota de camiones en la mina El Limón, con el fin de mejorar la eficiencia operativa y la productividad en el sector minero. Los antecedentes destacan la importancia de abordar la congestión en el parqueo de camiones mediante estrategias personalizadas, utilizando herramientas de simulación como el software ARENA. Los objetivos se centran en identificar cuellos de botella, reducir tiempos de espera y mejorar la eficiencia operativa. Se presentan limitantes en términos de viabilidad, deficiencias y consecuencias, donde se destaca la necesidad de evaluar la factibilidad y sostenibilidad de las soluciones propuestas. El marco referencial y conceptual proporciona el respaldo teórico necesario, mientras que el marco metodológico detalla la metodología de investigación utilizada. Los resultados obtenidos a través de la simulación de escenarios y el análisis detallado del flujo de camiones en la mina permiten identificar causas de colas y proponer mejoras en la gestión de flotas. Las conclusiones resaltan la importancia de tomar decisiones informadas para optimizar la operatividad y garantizar la eficiencia operativa en la Mina El Limón, proyectando posibles mejoras futuras en el flujo de camiones y la productividad minera.

## **Palabras Claves**

Optimización, Simulación, Eficiencia, Gestión, Flotas, Minería.

## **Abstract**

The paper addresses the optimization of truck fleet waiting times at the El Limón mine in order to improve operational efficiency and productivity in the mining sector. The background highlights the importance of addressing truck parking congestion through customized strategies, using simulation tools such as ARENA software. The objectives focus on identifying bottlenecks, reducing waiting times and improving operational efficiency. Limitations are presented in terms of feasibility, shortcomings and consequences, highlighting the need to evaluate the feasibility and sustainability of the proposed solutions. The referential and conceptual framework provides the necessary theoretical support, while the methodological framework details the research methodology used. The results obtained through the scenario simulation and the detailed analysis of the truck flow in the mine allow identifying causes of queuing and proposing improvements in fleet management. The conclusions highlight the importance of making informed decisions to optimize operations and ensure operational efficiency at the El Limón Mine, projecting possible future improvements in truck flow and mining productivity.

## **Keywords**

Optimization, Simulation, Efficiency, Management, Fleet, Mining.

## Índice de Contenido

<b>1. Introducción.....</b>	<b>11</b>
<b>2. Antecedentes y Contexto del Problema .....</b>	<b>13</b>
2.1. Antecedentes .....	13
2.2. Contexto del problema.....	14
<b>3. Objetivos.....</b>	<b>17</b>
3.1 Objetivo General .....	17
3.2 Objetivos Específicos.....	17
<b>4. Pregunta de Investigación.....</b>	<b>18</b>
<b>5. Justificación .....</b>	<b>19</b>
5.1. Conveniencia.....	19
5.2. Relevancia social .....	19
5.3. Implicaciones prácticas .....	20
5.4. Valor teórico .....	20
5.5. Utilidad metodológica.....	21
<b>6. Viabilidad, Deficiencias y Consecuencias.....</b>	<b>22</b>
6.1. Viabilidad de la investigación.....	22
6.2. Deficiencias en el conocimiento del problema .....	23
6.3. Consecuencias de la investigación.....	24
<b>7. Marco Teóricos .....</b>	<b>26</b>
7.1. Marco referencial .....	26
7.2. Marco conceptual.....	28

7.2.1. Respecto al contexto del problema .....	28
7.2.2. Respecto a la simulación.....	34
<b>8. Marco Metodológico.....</b>	<b>39</b>
8.1 Tipo de Investigación.....	39
8.2 Población y Muestra .....	41
8.3 Recopilación de Datos .....	43
8.4 Procedimientos para el Procesamiento y Análisis de Datos .....	44
8.5 Cronograma de la investigación.....	46
<b>9. Resultados y Discusión.....</b>	<b>49</b>
9.1. Diagnóstico descriptivo del circuito interno .....	49
9.2. Análisis del modelo.....	53
9.3. Propuestas de mejora .....	63
<b>10. Conclusiones.....</b>	<b>72</b>
10.1. Conclusiones en base a los objetivos .....	72
10.2. Perspectivas de futuro .....	74
<b>11. Referencias .....</b>	<b>76</b>
<b>12. Anexos.....</b>	<b>81</b>



## Índice de Tablas

Tabla 1. Cronograma de la investigación .....	48
Tabla 2. Proporciones de utilización en porcentaje de cada acopio .....	59
Tabla 3. Tabla comparativa de propuestas de mejora.....	64
Tabla 4. Total toneladas por camión según propuestas .....	68
Tabla 5. Incremento de toneladas por día según propuestas.....	69

## Índice de Figuras

Ilustración 1. Distribución Parqueo .....	50
Ilustración 2. Distribución Báscula.....	51
Ilustración 3. Distribución Tramo 1 .....	51
Ilustración 4. Distribución Tramo 2.....	52
Ilustración 5. Distribución Garita Sur.....	52
Ilustración 6. Flujograma Circuito interno de la mina El Limón.....	55
Ilustración 7. Diagrama del proceso de la mina El Limón en Arena.....	56
Ilustración 8. Módulo Create (Llegada de camiones).....	56
Ilustración 9. Módulo Process (Parqueo).....	57
Ilustración 10. Módulo Hold (Cola única).....	58
Ilustración 11. Módulo Process (Báscula entrada) .....	58
Ilustración 12. Módulo Decide (Decide 1) .....	59
Ilustración 13. Módulo Process (Tramo 1) .....	60
Ilustración 14. Módulo Process (Tramo 2) .....	61
Ilustración 15. Módulo Process (Garita sur).....	61

Ilustración 16. Módulo Process (Báscula salida).....	62
Ilustración 17. Módulo Dispose (Salida de camiones) .....	63
Ilustración 18. Mapa satelital mina El Limón.....	66

## **1. Introducción**

En el apasionante mundo de la minería, la eficiencia operativa es un factor determinante para el éxito y la rentabilidad de las empresas. En este contexto, la optimización de los tiempos de espera de la flota de camiones en la Mina El Limón se presenta como un desafío fundamental para mejorar la productividad. Este proyecto de investigación surge con el objetivo de identificar y eliminar cuellos de botella en el flujo operativo, con el fin de agilizar las operaciones y aumentar la rentabilidad de la empresa.

En este documento, se abordarán diversos aspectos relacionados con la propuesta de optimización en la Mina El Limón. Se analizarán los antecedentes que motivaron esta investigación, los objetivos planteados para alcanzar resultados concretos, la viabilidad del proyecto en términos de su factibilidad y sostenibilidad, las posibles deficiencias que podrían afectar su desarrollo.

Además, se explorarán el marco referencial y conceptual que sustentan esta investigación, proporcionando un contexto teórico sólido para comprender la problemática abordada. Se detallará la metodología utilizada para llevar a cabo el estudio, incluyendo el tipo de investigación, la población y muestra seleccionada, la recopilación y análisis de datos, así como el cronograma de actividades.

Finalmente, se presentarán los resultados obtenidos a través del diagnóstico descriptivo del circuito interno de la mina, el análisis del modelo de simulación y las propuestas de mejora generadas. Estos resultados serán discutidos en función de los objetivos planteados, culminando con conclusiones que resuman los hallazgos clave y proyecten posibles perspectivas futuras para la optimización de los tiempos de espera en la Mina El Limón.

En resumen, este documento abordará los siguientes acápite de manera secuencial: Antecedentes, Objetivos, Viabilidad, Deficiencias y Consecuencias, Marco Referencial, Marco Conceptual, Marco Metodológico, Resultados y Conclusiones.

## **2. Antecedentes y Contexto del Problema**

### **2.1. Antecedentes**

El proceso eficiente de la flota de camiones en las operaciones mineras es un aspecto crucial para garantizar la productividad y rentabilidad de la operación. En el contexto de la Mina El Limón, ubicada en León, se ha identificado un problema recurrente de congestión en el parqueo de camiones de acarreo de mineral, lo que ha generado demoras en las operaciones y posibles riesgos de seguridad.

Diversos estudios previos han abordado la importancia de optimizar el proceso de la flota de transporte en el sector minero (en el apartado 7.1 marco referencial puede encontrar estos estudios), destacando la relevancia de reducir los tiempos de espera y mejorar la eficiencia operativa. Sin embargo, en el caso específico de la mina El Limón, se ha evidenciado la necesidad de desarrollar estrategias personalizadas que aborden de manera efectiva la problemática de la congestión en el parqueo de camiones.

La utilización de herramientas de simulación computacional, como el software ARENA, ha demostrado ser una solución eficaz para mejorar la planificación y optimización de procesos en diferentes industrias, incluyendo la minería. La simulación de escenarios permite analizar de manera detallada el flujo de camiones, identificar cuellos de botella, probar diferentes estrategias y tomar decisiones informadas para mejorar la eficiencia operativa.

En este contexto, la presente investigación surge como una respuesta a la necesidad de desarrollar una propuesta para optimizar el flujo de camiones en el circuito interno de la mina El Limón, mediante la simulación de escenarios utilizando el software ARENA. A través de este enfoque innovador, se busca contribuir a la mejora de la eficiencia operativa y la eliminación de las colas en el parqueo, con el objetivo de incrementar la productividad de la operación minera.

No se encontraron estudios específicos que hayan utilizado el software ARENA para reducir los tiempos de espera y optimizar el flujo de camiones en parqueos de una mina, sin embargo, a nivel global en ciudades como Barcelona, se ha utilizado la simulación en Arena para proponer mejoras en el estacionamiento de un centro comercial, el objetivo de estas mejoras es optimizar la calidad del servicio y aumentar la satisfacción del cliente.

En la región latinoamericana, países como Perú, Colombia y Chile han implementado diversos sistemas de simulación para modelar y optimizar los procesos de carguío y transporte de minerales. Estos esfuerzos buscan mejorar la eficiencia operativa y minimizar riesgos. Además, estas simulaciones permiten identificar los cuellos de botella en los procesos, facilitando la toma de decisiones informadas y estratégicas para incrementar la productividad y la seguridad en la industria minera. Demostrando que la adopción de estas tecnologías refleja el compromiso de estos países con la innovación y la mejora continua en el sector.

En cuanto a nivel nacional, no se encontraron estudios específicos sobre el uso de simulación para reducir tiempos de espera en parqueos mineros en Nicaragua. Sin embargo, la aplicación de software como Arena para simular y optimizar estos procesos podría generar ahorros significativos en tiempos, al igual que se ha logrado en otras áreas de la minería a nivel global y regional. La industria minera nicaragüense tiene un gran potencial para adoptar estas tecnologías y seguir impulsando su desarrollo.

## **2.2. Contexto del problema**

Calibre Mining Corp. es un productor canadiense de oro de nivel medio. Fundada en 1969, Calibre Mining cuenta con una cartera de oportunidades de desarrollo y exploración. Posee varias minas operativas a cielo abierto y subterráneas, dos instalaciones de molienda (las minas El Limón

y La Libertad) y una cartera de oportunidades de exploración y desarrollo en Nicaragua, Centroamérica.

Además de sus operaciones mineras en Nicaragua, también se dedica a la exploración y el desarrollo de varias concesiones en su Proyecto de Oro-Plata Borosí Oriental (EBP), propiedad al 100%, que incluye las minas Borosí Oriental (EBM). Calibre Mining se destaca por su compromiso con la seguridad y la salud en el trabajo, así como por su enfoque en la identificación y control de riesgos para prevenir enfermedades y lesiones laborales (Calibre Mining Corp., 2023).

En la Mina El Limón, ubicada en la ciudad de León, se ha identificado un problema crítico relacionado con el proceso de la flota de camiones de acarreo de mineral, que provoca congestiones en el parqueo de la mina. Esta congestión genera colas en el parqueo, lo que impacta negativamente al aumentar los tiempos de espera, lo cual también conlleva riesgos de seguridad. La probabilidad de que estas congestiones ocurran es alta, bajo las condiciones actuales de la operación, donde la falta de una gestión optimizada de la flota de camiones exacerba el problema.

Como ya se mencionaba anteriormente, la congestión en el parqueo de camiones de acarreo de mineral tiene varios impactos negativos significativos. Primero, causa demoras en las operaciones, lo que reduce la eficiencia operativa de la mina. Además, incrementa la probabilidad de situaciones peligrosas, afectando gravemente la seguridad del personal. Los riesgos específicos incluyen el atropellamiento de personas que realizan reparaciones imprevistas, colisiones vehiculares al realizar maniobras de reversa y el atropellamiento o atrapamiento de personas cuando un camión sale del parqueo. Estos problemas no solo comprometen la seguridad de los trabajadores, sino que también pueden resultar en costos adicionales debido a accidentes, reparaciones y tiempo de inactividad, afectando la productividad y rentabilidad de la mina.

Ante esta problemática, resulta imperativo desarrollar estrategias efectivas para optimizar los tiempos de espera de la flota de camiones en la mina El Limón. La simulación computacional mediante el software ARENA se presenta como una solución ideal debido a su capacidad para modelar sistemas complejos y dinámicos, permitiendo la evaluación de múltiples escenarios operativos sin interferir con las operaciones reales. ARENA facilita la identificación de cuellos de botella y ayuda a optimizar el uso de recursos.

Esta herramienta contribuye directamente a la reducción de los tiempos de espera y la mejora de la eficiencia operativa. Además, su capacidad para proporcionar representaciones visuales y cuantitativas del sistema mejora la comunicación de los resultados y propuestas de mejora a las partes interesadas, asegurando decisiones basadas en datos precisos y análisis rigurosos. Asimismo, su flexibilidad y adaptabilidad aseguran que los modelos puedan ajustarse fácilmente a cambios en las condiciones operativas, permitiendo a Calibre Mining tomar decisiones informadas basadas en datos y mejorar la productividad y seguridad de sus operaciones mineras.



### **3. Objetivos**

#### **3.1 Objetivo General**

Desarrollar una propuesta para la optimización de los tiempos de espera de los camiones de acarreo de mineral que ingresan al circuito interno de mina El Limón, mediante la simulación de escenarios utilizando el software ARENA con el fin de la mejora de la eficiencia operativa.

#### **3.2 Objetivos Específicos**

- Elaborar un diagnóstico de los principales elementos, variables y datos del proceso de la flota de camiones, a través de las fuentes primarias del área de logística terrestre, para llevar a cabo el modelo de simulación.
- Analizar el sistema de colas del diagnóstico obtenido, mediante un modelo de simulación, para la mejora del comportamiento de los tiempos de espera de la flota de camiones.
- Presentar propuestas de mejora basada en los resultados del modelo de simulación que contribuya a la reducción de los tiempos de espera y el incremento de la eficiencia del flujo de camiones.

**4. Pregunta de Investigación**

¿Cómo puede la simulación computacional con el software ARENA optimizar los tiempos de espera y reducir la congestión en el parqueo de camiones de acarreo de mineral en la mina El Limón, mejorando así la eficiencia operativa?

## **5. Justificación**

Esta investigación se centra en abordar la congestión en el parqueo de camiones de acarreo en la mina El Limón, utilizando simulación computacional con el software ARENA para optimizar los tiempos de espera y mejorar la eficiencia operativa. La conveniencia de este estudio radica en la posibilidad de desarrollar soluciones prácticas para la gestión logística minera, impactando positivamente en la productividad.

### **5.1. Conveniencia**

Esta investigación busca optimizar los tiempos de espera de los camiones de acarreo de mineral en el parqueo de la mina El Limón mediante simulación computacional, abordando así la congestión en el parqueo de camiones. Al centrarse en la optimización de estos tiempos de espera, la investigación busca mejorar la eficiencia operativa, esta investigación tiene como propósito principal proporcionar soluciones prácticas y efectivas para optimizar la gestión logística minera, específicamente en lo que respecta al flujo de camiones en el parqueo de la mina.

### **5.2. Relevancia social**

Los principales beneficiarios de los resultados de esta investigación son los trabajadores de la mina El Limón. La reducción de los tiempos de espera y la congestión en el parqueo de camiones de acarreo de mineral tendrá un impacto significativo en la operatividad diaria de la mina. Los trabajadores podrán experimentar mejoras en sus condiciones laborales al enfrentar menos demoras y congestiones al ingresar y salir del área de trabajo, lo que disminuirá los riesgos de accidentes y lesiones relacionados con el tráfico en el área de la mina.

Además, la optimización de los tiempos de espera y la optimización de flotas también se traducirá en una mejora en la eficiencia operativa y la rentabilidad de la mina. Al reducir los tiempos de inactividad de los camiones y mejorar el flujo de tráfico en el parqueo, se optimizará

el proceso de carga y descarga de mineral, lo que resultará en una producción más eficiente por tonelada de mineral extraído.

### **5.3. Implicaciones prácticas**

Esta investigación está vinculada a la resolución de problemas reales en la gestión logística de la mina El Limón. Al abordar la congestión y los tiempos de espera en el parqueo de camiones de acarreo de mineral, la investigación ofrece soluciones concretas y aplicables que mejorarán la eficiencia operativa de la mina. La implementación de estrategias óptimas identificadas a través de simulaciones computacionales no sólo reducirá el flujo de los camiones, sino que también optimizará el flujo de tráfico y los recursos en el parqueo.

Estas soluciones prácticas tendrán un impacto significativo en la operación diaria de la mina, mejorando la productividad. Además, al servir como un modelo para otras operaciones mineras enfrentando problemas similares, esta investigación tiene el potencial de abordar problemas reales en la gestión logística de la industria minera en general.

### **5.4. Valor teórico**

Esta investigación tiene el potencial de ampliar significativamente nuestra comprensión del comportamiento de las variables críticas en la gestión logística minera, centrándose especialmente en los tiempos de espera de los camiones en el parqueo de la mina El Limón. Al utilizar la simulación computacional, se espera que se obtengan nuevos conocimientos sobre cómo factores como el flujo de tráfico, la capacidad del parqueo y las condiciones operativas interactúan entre sí, y cómo estas interacciones afectan la eficiencia operativa de la mina.

Esta investigación nos puede ayudar a mejorar nuestra comprensión de la gestión logística en el entorno minero. Además, los resultados de esta investigación podrían revelar patrones y relaciones entre variables que anteriormente no eran evidentes.

### **5.5. Utilidad metodológica**

Esta investigación puede contribuir significativamente al desarrollo de nuevas metodologías para la recolección y análisis de datos en la gestión logística minera. Al utilizar la simulación computacional como herramienta principal, se está explorando un enfoque innovador para comprender y optimizar los tiempos de espera de los camiones en el parqueo de la mina El Limón. La aplicación de este método no solo permite modelar y simular el comportamiento de variables complejas en un entorno controlado, sino que también facilita la exploración de diferentes escenarios y la evaluación de múltiples estrategias de optimización.

Además, esta investigación puede ayudar a aportar una definición más precisa de conceptos y variables clave en la gestión logística minera. Al identificar las relaciones entre variables como el flujo de tráfico, la capacidad del parqueo y los tiempos de espera de los camiones, se puede mejorar la comprensión de los factores que influyen en la eficiencia operativa de la mina.

## **6. Viabilidad, Deficiencias y Consecuencias**

Toda investigación tiene sus aspectos críticos que deben ser evaluados para interpretar correctamente los resultados y obtener conclusiones sólidas. En el contexto de este estudio, que propone optimizar los tiempos de espera de la flota de camiones en el parqueo de la mina El Limón, se identifican varias cuestiones clave en términos de viabilidad, deficiencias y consecuencias. Evaluar la viabilidad del proyecto es fundamental para determinar si las soluciones propuestas son prácticas y sostenibles.

Además, es esencial reconocer y abordar las deficiencias en el diseño y la metodología del estudio, ya que estas pueden afectar la precisión de los resultados. Por último, considerar las consecuencias potenciales es crucial para entender el impacto a largo plazo de las mejoras implementadas en la eficiencia del flujo de camiones en la mina.

### **6.1. Viabilidad de la investigación**

La investigación propuesta tiene una alta viabilidad debido a su enfoque claro y concreto en la optimización de los tiempos de espera de camiones en el circuito interno de la mina El Limón. Al utilizar el software ARENA para simular diferentes escenarios, se busca mejorar la eficiencia operativa con el proceso de la flota de camiones. Este enfoque permite una evaluación detallada de las variables clave y proporciona una base sólida para la toma de decisiones estratégicas en la logística terrestre de la mina.

Así mismo, contando con un sólido respaldo de información proporcionado por el área de logística terrestre de la empresa Calibre Mining Corp. Nuestra propuesta de investigación adquiere viabilidad gracias a la disponibilidad de datos detallados sobre los tiempos de espera de los camiones de acarreo y las operaciones logísticas de la mina El Limón. Este estrecho vínculo de colaboración con la empresa nos brinda acceso a una fuente de información valiosa y actualizada,

que abarca aspectos cruciales como el proceso de la flota y otros elementos relevantes para el proyecto.

La accesibilidad fluida a estos datos es fundamental para garantizar la precisión y confiabilidad del desarrollo de la investigación. Además, las herramientas de simulación computacional a nuestra disposición nos permitirán explorar y comprender estos datos en profundidad, fortaleciendo así nuestro análisis y conclusiones.

## **6.2. Deficiencias en el conocimiento del problema**

A pesar de la viabilidad de la investigación, existen algunas deficiencias en el conocimiento del problema que deben abordarse. Por ejemplo, podría haber una falta de datos históricos sobre el tiempo de espera de los camiones y las condiciones operativas en la mina, lo que podría afectar la precisión de los modelos de simulación y las decisiones basadas en ellos. Además, la complejidad del proceso de la flota de camiones implica múltiples variables y factores interrelacionados que pueden no estar completamente comprendidos en la etapa inicial del proyecto.

Otra deficiencia potencial en la investigación es la variabilidad en la calidad y consistencia de los datos recolectados, si los datos históricos contienen errores, inconsistencias o están incompletos, esto puede comprometer la precisión y fiabilidad de los modelos de simulación. La falta de estandarización en la recolección de datos, debido a diferentes métodos de registro o a cambios en los procedimientos operativos a lo largo del tiempo, también puede dificultar la comparación y el análisis de la información. Abordar estas variabilidades es crucial para garantizar que los resultados del estudio sean precisos y útiles para la toma de decisiones.

Por otra parte, la experiencia y conocimiento del equipo investigador en el área de estudio pueden influir en la calidad de la investigación. La falta de experiencia o conocimiento especializado puede limitar la capacidad para comprender completamente el problema y diseñar un estudio adecuado, en el que incluso los investigadores pueden tener sesgos inconscientes que pueden afectar la selección de datos, el análisis y la interpretación de los resultados.

Finalmente, otra de las deficiencias que se consideran podrían afectar el desarrollo del proyecto es la disponibilidad de ciertos recursos, como lo es el factor tiempo, debido a que los plazos para la entrega de avances pueden llegar a desencadenar estrés en el equipo, lo que conlleva a tomar decisiones apresuradas comprometiendo la calidad del proyecto.

### **6.3. Consecuencias de la investigación**

Realizar esta investigación tiene consecuencias positivas, especialmente enfocadas en el objetivo principal de mejorar la eficiencia del flujo operativo y eliminar cuellos de botella. Al identificar y analizar los puntos críticos, la empresa podrá implementar soluciones específicas que optimicen el flujo de trabajo. Esto no solo reducirá los tiempos de espera, sino que también reducirá los riesgos y aumentará la productividad.

Por otro lado, no abordar la problemática de los cuellos de botella y no mejorar la eficiencia del flujo operativo puede tener serias consecuencias negativas para la empresa. La persistencia de estos problemas puede resultar en tiempos de espera prolongados y operaciones ineficientes.

En conclusión, aunque la investigación presenta viabilidad y el potencial para mejorar significativamente la eficiencia operativa al identificar y eliminar cuellos de botella, existen varias deficiencias que deben ser abordadas para garantizar la precisión y utilidad de los resultados. La falta de datos históricos completos y consistentes, la complejidad de las variables operativas, la



posible falta de experiencia del equipo investigador y la presión de los plazos son factores que pueden comprometer la calidad del estudio. Sin embargo, si estas deficiencias son adecuadamente gestionadas, la investigación puede proporcionar valiosos conocimientos y soluciones que optimicen el flujo de trabajo, reduciendo los tiempos de espera y los riesgos relacionados, mejorando la rentabilidad y competitividad de la empresa.

## **7. Marco Teóricos**

El marco teórico de esta investigación proporciona el contexto y la base conceptual necesaria para comprender y abordar el problema de estudio. En el caso de esta investigación, que se centra en la propuesta del proceso de la flota de camiones de acarreo de mineral para reducir los tiempos de espera en el parqueo de la mina El Limón mediante simulación computacional, el marco teórico se construye sobre conceptos claves relacionados con el proceso de flotas, la simulación de sistemas y la optimización de procesos logísticos en la industria minera.

En el marco referencial, se revisarán estudios previos y antecedentes relacionados con la gestión de flotas en la industria minera, así como investigaciones sobre la simulación de sistemas logísticos y de transporte. Estos antecedentes permitirán contextualizar el problema de la cola en el parqueo de la mina El Limón y proporcionarán información relevante para el diseño de la propuesta de gestión de flotas.

Por otro lado, en el marco conceptual se definirán y describirán los conceptos que sustentan la investigación, como la teoría de colas, la simulación de sistemas, la eficiencia operativa y la gestión de flotas. Estos conceptos servirán como base teórica para el desarrollo de la propuesta de gestión de flotas y permitirán fundamentar las decisiones y estrategias propuestas.

### **7.1. Marco referencial**

Para la presente investigación, se ha revisado una serie de estudios previos que abordan la optimización de la gestión de flotas y el uso de simulación computacional en entornos mineros. Estas investigaciones proporcionan un marco teórico y metodológico robusto que sustenta el desarrollo de este proyecto.

Modelamiento y Simulación del Minado y Re manipulación de Mineral en Una mina a Tajo Abierto (Morales Pulcha, 2019) destaca la importancia de la simulación computacional para

optimizar las operaciones mineras. El estudio de Morales Pulcha (2019) muestra cómo la simulación puede modelar diferentes escenarios operativos, permitiendo identificar cuellos de botella y proponer soluciones efectivas. Esta investigación es relevante para nuestro proyecto, ya que utilizaremos el software ARENA para modelar y optimizar los tiempos de espera de los camiones en la mina El Limón.

En Optimización de la productividad de los equipos de carguío y acarreo en Gold Fields La Cima SA mediante la disminución de las demoras operativas más significativas (Bustamante Chávez, 2018), se aborda la mejora de la eficiencia operativa mediante la reducción de demoras en el acarreo y carguío. Bustamante Chávez (2018) implementa estrategias específicas para minimizar las interrupciones en el flujo de trabajo, lo cual es directamente aplicable a nuestro objetivo de reducir los tiempos de espera en el parqueo de camiones.

Propuesta de implementación del proyecto: transición de “Dumper a volquete” en una mina subterránea con análisis de costo y simulación de riesgo (Leon Flores, 2021) examina el cambio de equipos de transporte y su impacto en la eficiencia y costos operativos. Leon Flores(2021) destaca la utilidad de la simulación de riesgo para evaluar diferentes alternativas operativas, lo que es paralelo a nuestra metodología de usar simulación computacional para optimizar la gestión de flotas en un entorno minero.

El trabajo de Meza Castro (2011), Desarrollo de un modelo para la aplicación de simulación a un sistema de carguío y acarreo de desmonte en una operación minera a tajo abierto, proporciona un modelo detallado para la simulación de sistemas de carguío y acarreo. Meza Castro (2011) demuestra cómo la simulación puede mejorar significativamente la planificación y gestión

operativa, ofreciendo insights valiosos que serán aplicados en nuestro estudio para modelar el flujo de camiones en la mina El Limón.

Finalmente, Análisis para la selección y reemplazo de volquetes de 25 m<sup>3</sup> de capacidad para la optimización del acarreo y transporte en la operación minera-mina los Andes Perú Gold-Huamachuco (Peña Alva, 2019) presenta un análisis exhaustivo de la selección y reemplazo de equipos de transporte minero. Peña Alva (2019) utiliza técnicas de optimización para mejorar la eficiencia del transporte, alineándose con nuestro objetivo de usar simulación computacional para optimizar la gestión de flotas y reducir los tiempos de espera en el parqueo.

## **7.2. Marco conceptual**

El presente marco conceptual de la investigación se centra en definir y describir los conceptos clave que sustentan la investigación sobre la optimización para la reducción de los tiempos de la gestión de la flota de camiones de acarreo de mineral en la mina. Algunos de los conceptos fundamentales que se abordan en el marco conceptual incluyen:

### ***7.2.1. Respecto al contexto del problema***

En este apartado se centra en definir y describir los conceptos que sustentan la investigación con respecto al contexto del problema:

#### **Teoría de Colas**

La teoría de colas es una rama de la matemática que estudia la relación entre las demandas de servicios y los equipos que los proporcionan. Se aplica en diversos contextos, como el tráfico, la regulación de semáforos, la determinación de cajeros en bancos, y también en el ámbito de la minería.

En la minería, la teoría de colas se utiliza para analizar y optimizar el transporte de mineral en las operaciones mineras. Según MANRIQUE CORDOVA (2021), un ejemplo del uso de la teoría de colas en la minería se encuentra en el documento, donde se aplica en la Unidad Minera San Cristóbal-Junín para determinar el número de viajes de mineral necesarios para aumentar la producción, asignar correctamente los equipos de transporte de mineral en los puntos de carguío de la zona 3, y reducir la flota de transporte de mineral de la zona 3.

La teoría de colas consiste en tres componentes principales: la fuente de entrada, la cola y el mecanismo de servicio. La fuente de entrada representa el total de clientes que pueden solicitar un servicio en un momento determinado, siguiendo una distribución de Poisson y pudiendo tener un tamaño finito o infinito. La cola es el lugar donde los clientes realizan la cola hasta ser atendidos, y puede ser prioritaria, aleatoria o LIFO. El mecanismo de servicio es el número de clientes que pueden ser atendidos a la vez, con cada puesto de atención llamado servidor. (Ludeña, 2021)

En el contexto minero, la teoría de colas puede ayudar a determinar la capacidad óptima del sistema de transporte de mineral, calcular el impacto de modificaciones en la capacidad, cuantificar el tiempo de espera y diseñar soluciones eficientes para minimizar costos sin perder clientes. Esto puede contribuir a mejorar la eficiencia y productividad de las operaciones mineras. (Andrea Calvo & Sierra Fernández, 2017)

### **Gestión de flotas**

La gestión eficiente de flotas en operaciones mineras es crucial para optimizar los procesos y reducir los costos operativos. Según Hexagon, una empresa líder en soluciones tecnológicas para la minería, la implementación de sistemas de gestión de flotas puede mejorar significativamente

la eficiencia operativa al proporcionar herramientas avanzadas de monitoreo y control en tiempo real (Hexagon, 2024). Estas herramientas permiten a los operadores mineros rastrear la ubicación y el desempeño de los vehículos en la flota, identificar y resolver cuellos de botella, y ajustar las rutas y horarios en función de las condiciones operativas actuales.

Este enfoque es particularmente relevante para el tema de investigación, ya que la capacidad de monitoreo en tiempo real y la optimización de rutas y horarios que ofrece la gestión de flotas, tal como describe Hexagon, son elementos esenciales que pueden integrarse en el modelo de simulación ARENA para mejorar la eficiencia operativa y reducir los tiempos de espera en el estacionamiento de camiones de acarreo de mineral de la mina El Limón. Al aplicar estos principios, es posible desarrollar estrategias más efectivas para la asignación y utilización de los recursos de la flota, lo que contribuirá a la eliminación del efecto de cola y a la mejora de la productividad general del proceso minero.

### **Eficiencia operativa**

La eficiencia operativa es una medida de la capacidad de una operación para maximizar la producción con los mínimos recursos posibles. En la minería, se refiere a la optimización de procesos como el transporte y el carguío de mineral, lo que puede lograrse mediante la reducción de tiempos de espera y la eliminación de cuellos de botella (Bustamante Chávez, 2018).

### **Tiempos de Espera**

Los tiempos de espera son los periodos en los que los camiones de acarreo deben esperar antes de poder ser cargados o descargados. La reducción de estos tiempos es crucial para mejorar la eficiencia operativa y la productividad en las minas (Peña Alva, 2019).

## **Congestión**

La congestión se produce cuando el número de vehículos en un área determinada supera su capacidad, resultando en tiempos de espera prolongados y una reducción de la eficiencia operativa. Este problema es común en los parqueos de minas y puede ser mitigado mediante la optimización de la gestión de flotas (Leon Flores, 2021).

## **Cuello de botella**

Cuellos de botella en la producción son puntos críticos que ralentizan el proceso de trabajo e interrumpen el flujo de producción, causados por falta de conocimiento del proceso (COTRANSA GROUP, 2024; SYDLE, 2024). En la gestión de proyectos, los cuellos de botella son puntos de congestión que causan retrasos en el flujo de trabajo, ya sea por sistemas obsoletos o interrupciones en el flujo de trabajo.

Los cuellos de botella en la minería son puntos críticos en el proceso de producción que ralentizan y obstaculizan el flujo de trabajo, causando retrasos e ineficiencias (Cochachi, 2024; Conexión Esan, 2016):

- Falta de infraestructura adecuada, como puertos, ferrocarriles y carreteras, para transportar eficientemente la creciente producción de minerales. Esto encarece los costos de transporte y reduce la competitividad de las exportaciones mineras.
- Limitaciones en la capacidad de procesamiento y logística de la cadena de suministro, como en el transporte interno y la carga de los buques. Esto impide que la mayor producción se traduzca en mayor productividad.
- Problemas en etapas clave del proceso productivo, como la reparación y mantenimiento de equipos, que causan interrupciones y retrasos en el flujo de trabajo.

- Falta de coordinación y sincronización entre las diferentes partes de la cadena logística, desde la producción hasta la exportación.

En resumen, los cuellos de botella son etapas de trabajo que reciben más solicitudes de las que pueden procesar a su máxima capacidad, lo que provoca interrupciones en el flujo de trabajo y demoras en la producción (Universidad Privada del Norte, 2016).

### **Optimización de recursos**

La optimización de recursos en la minería se refiere a la aplicación de diversas estrategias y herramientas para maximizar la eficiencia y el rendimiento en las operaciones mineras, con el objetivo de aumentar la producción, reducir los costos, mejorar la estabilidad y disminuir el impacto ambiental. Esto se logra a través de la optimización de procesos, la planificación estratégica, la automatización y la integración de sistemas y procesos en la cadena de suministro y valor minero.

La optimización de procesos en la minería puede enfocarse en aumentar la producción, reducir los costos y mejorar la estabilidad de los procesos. Esto se puede lograr a través del seguimiento y caracterización del mineral, la optimización de la perforación y tronadura, el diseño y optimización de circuitos de procesamiento, la reducción del consumo de energía y agua, y la adaptación a los tipos de mineral. (*Optimización De Procesos Para La Minería*, 2024)

La planificación estratégica en la minería implica la optimización de la toma de decisiones a largo plazo, considerando las realidades de la empresa en el corto, mediano y largo plazo. Esto incluye la construcción de nuevas plantas de procesos y la incorporación de nuevos yacimientos de mineral, así como la maximización de los retornos económicos a través de una visión integradora de las distintas plantas y yacimientos. (FONDEF, 2006)



La automatización minera se ha convertido en una respuesta para mejorar la productividad, optimizar los procesos y reducir los costos en un entorno dominado por la volatilidad de los precios y la elevación de los costos de los recursos. (*AUTOMATIZACIÓN MINERA: Optimizando Los Recursos*, 2017)

En resumen, la optimización de recursos en la minería implica la aplicación de diversas estrategias y herramientas para maximizar la eficiencia y el rendimiento en las operaciones mineras, con el objetivo de aumentar la producción, reducir los costos, mejorar la estabilidad y disminuir el impacto ambiental. Esto se logra a través de la optimización de procesos, la planificación estratégica, la automatización y la integración de sistemas y procesos en la cadena de suministro y valor minero.

### **Zona de báscula**

Una zona de báscula en la minería es un área donde se lleva a cabo el pesaje de los materiales extraídos, generalmente ubicada en las instalaciones mineras para medir la cantidad de material que se está moviendo. Esta zona es fundamental para controlar y registrar con precisión la cantidad de material que se extrae de la mina, lo que es crucial para la gestión eficiente de la producción y el control de inventario en la industria minera. (*MOVIMIENTO DE TIERRAS*, s.f.)

### **Circuito interno**

El circuito interno de la mina se refiere a la red de rutas y áreas designadas dentro del sitio minero donde se llevan a cabo diversas operaciones de transporte y logística. Este circuito incluye todas las vías y puntos clave por los cuales transitan los vehículos y equipos utilizados para la extracción, carga, transporte, báscula, parqueo y acopios.

### **7.2.2. Respecto a la simulación**

En este apartado se centra en definir y describir los conceptos que sustentan la investigación con respecto a la simulación:

#### **Sistemas industriales**

La simulación es una técnica que utiliza modelos computacionales para replicar y analizar el comportamiento de sistemas complejos. Se utiliza para prever el desempeño del sistema bajo diversas condiciones sin la necesidad de experimentar en el sistema real. La simulación es crucial en la gestión de flotas en la minería porque permite identificar y solucionar problemas potenciales antes de que ocurran en la práctica (Kelton et al., 2015).

#### **Tipos de sistemas**

Los sistemas industriales pueden clasificarse en dos tipos principales:

- **Sistemas Continuos:** Son aquellos en los que el flujo de materiales o información es constante y sin interrupciones. Un ejemplo sería el flujo continuo de mineral en una planta de procesamiento.
- **Sistemas Discretos:** Estos sistemas se caracterizan por manejar elementos individuales o grupos de elementos en intervalos específicos. Un ejemplo sería la flota de camiones de acarreo de mineral en una mina, donde cada camión es una entidad discreta que transporta una carga específica.

#### **Modelo**

Un modelo es una representación simplificada de un sistema real que se utiliza para analizar y comprender su comportamiento. En el contexto de la optimización de la gestión de flotas, un

modelo puede representar el flujo de camiones de acarreo de mineral y su interacción con otros elementos del sistema minero.

### **Tipos de modelos**

- Modelos Físicos: Representaciones tangibles y físicas de un sistema.
- Modelos Matemáticos: Ecuaciones y fórmulas que describen el comportamiento del sistema.
- Modelos Computacionales: Simulaciones digitales que permiten experimentar con el sistema bajo diferentes condiciones y escenarios.

### **Simulación**

La simulación es una técnica que utiliza modelos computacionales para replicar y analizar el comportamiento de sistemas complejos. Se utiliza para prever el desempeño del sistema bajo diversas condiciones sin la necesidad de experimentar en el sistema real. La simulación es crucial en la gestión de flotas en la minería porque permite identificar y solucionar problemas potenciales antes de que ocurran en la práctica (Kelton et al., 2015).

### **Ventajas de la simulación**

- Reducción de Riesgos: Permite probar diferentes escenarios sin afectar la operación real.
- Optimización de Recursos: Ayuda a identificar la mejor manera de utilizar los recursos disponibles.
- Mejora en la Toma de Decisiones: Proporciona datos y análisis que informan decisiones estratégicas.

### **Fases de un estudio de simulación**

- Definición del Problema: Identificar y entender el problema a resolver.

- **Formulación del Modelo:** Crear un modelo que represente el sistema real.
- **Validación y Verificación:** Asegurarse de que el modelo es preciso y representa correctamente el sistema.
- **Experimentación:** Probar diferentes escenarios y recopilar datos.
- **Análisis de Resultados:** Evaluar los datos recopilados y tomar decisiones informadas.

### **Medidas de desempeño del modelo de simulación**

- **Tiempos de Espera:** Duración que las entidades pasan esperando en el sistema.
- **Utilización de Recursos:** Grado en que los recursos disponibles son utilizados.
- **Productividad:** Cantidad de producción lograda en un periodo específico.
- **Costos Operativos:** Gastos asociados con la operación del sistema.

### **Aplicaciones de la Simulación en Minería**

1. **Planificación minera:** La simulación ayuda a planificar y optimizar la extracción de minerales, considerando variables como la disponibilidad de recursos y la eficiencia de los equipos.
2. **Manejo de materiales:** La simulación permite evaluar y optimizar el manejo de materiales, incluyendo el transporte y el procesamiento de minerales.
3. **Optimización de recursos:** La simulación ayuda a identificar las mejores prácticas para reducir costos y mejorar la eficiencia en la extracción y procesamiento de minerales.

En resumen, el modelo de simulación en la minería es una herramienta valiosa para optimizar la eficiencia, reducir costos y mejorar la seguridad en la operación minera. Diversas herramientas y lenguajes de simulación están disponibles y se utilizan en operaciones mineras a cielo abierto y subterráneas.

## Elementos de un modelo de simulación

Según Morales Pulcha (2019), un modelo de simulación se compone de varios elementos fundamentales que permiten replicar y analizar el comportamiento de sistemas complejos. Estos elementos incluyen entidades, atributos, variables, recursos, acumuladores estadísticos y el reloj de simulación.

- Entidades: Las entidades son los objetos dinámicos que se mueven a través del sistema simulado. Pueden representar personas, productos, vehículos o cualquier otro elemento que fluya dentro del sistema. En la simulación de la mina El Limón, las entidades serían los camiones de acarreo de mineral que ingresan al parqueo y pasan por diversos procesos hasta su salida.
- Atributos: Los atributos son las características propias de las entidades que pueden variar entre ellas. Estos pueden incluir parámetros como tamaño, tiempo de llegada, carga transportada, entre otros. Los atributos podrían ser el tiempo de llegada de cada camión al parqueo.
- Variables: Las variables son parámetros del modelo que pueden cambiar durante la simulación. Controlan el comportamiento de las entidades y el funcionamiento general del sistema. Variables relevantes podrían ser el número de camiones en el parqueo en un momento dado, el tiempo de espera promedio, y la tasa de llegada de nuevos camiones.
- Recursos: Los recursos son los elementos del sistema que las entidades necesitan para completar ciertos procesos. Pueden incluir maquinaria, equipos, personal, etc. Los recursos incluirían las estaciones de carga y descarga, así como los operadores de maquinaria.

- **Acumuladores Estadísticos:** Los acumuladores estadísticos son variables que recopilan datos sobre el desempeño del sistema a lo largo del tiempo de simulación. Ayudan a analizar y entender el comportamiento del sistema. Acumuladores como el tiempo total de espera de los camiones, el número de camiones atendidos por hora, y la utilización de recursos serían cruciales para evaluar la eficiencia operativa.
- **Reloj de Simulación:** El reloj de simulación es el mecanismo que lleva el control del tiempo dentro del modelo. Avanza en incrementos discretos o continuos, permitiendo que los eventos se procesen en secuencia. El reloj de simulación avanzaría para cada evento relevante, como la llegada de un nuevo camión, el inicio de la carga, o la salida del camión del parqueo.

En resumen, estos elementos constituyen la base de cualquier modelo de simulación y son esenciales para replicar de manera precisa el sistema real. En el contexto de la optimización del parqueo de camiones en la mina El Limón, estos componentes permiten identificar y analizar los factores que contribuyen a la congestión y proponer soluciones efectivas para mejorar la eficiencia operativa.

## **8. Marco Metodológico**

El presente marco metodológico ofrece una visión completa del enfoque adoptado para optimizar la gestión de la flota de camiones de acarreo de mineral y eliminar las colas en el parqueo de la mina El Limón mediante la simulación computacional. En este contexto, se exploran tanto la naturaleza como el propósito del proyecto, delineando las estrategias y procedimientos específicos diseñados para abordar eficazmente esta problemática en los procesos operativos de la mina.

Se describen las distintas etapas que conforman este proceso metodológico, destacando cómo se recopiló y analizó la información crucial para llevar a cabo una evaluación precisa y exhaustiva de la gestión de la flota y los tiempos de espera en el parqueo de camiones de acarreo de mineral. Este marco metodológico busca proporcionar una guía detallada sobre la implementación de medidas destinadas a mejorar la eficiencia operativa en la mina El Limón. Mediante el uso del software ARENA, se pretende desarrollar un modelo de simulación que permita identificar los cuellos de botella y proponer soluciones efectivas para optimizar la gestión de la flota de camiones de acarreo de minerales.

### **8.1 Tipo de Investigación**

El enfoque de esta investigación se clasifica como cuantitativa, basándose en la recolección y análisis de datos numéricos sobre los tiempos de espera de los camiones de acarreo en el parqueo de la mina El Limón de la empresa Calibre Mining. Además, el software Arena utiliza estos datos cuantitativos para modelar diferentes escenarios de simulación y de esa manera estudiar el comportamiento de los cuellos de botella y encontrar soluciones que mejoren la eficiencia del flujo del equipo pesado.

En cuanto a su aplicabilidad, esta investigación se considera aplicada porque busca utilizar los datos recolectados para resolver un problema específico en el contexto de la operación minera.

En este caso, la investigación se centra en reducir los tiempos de espera de los camiones de acarreo en la mina El Limón, lo cual tiene un impacto práctico en mejorar la eficiencia del flujo constante del equipo pesado. La finalidad es implementar soluciones prácticas basadas en los resultados obtenidos de las simulaciones, lo cual caracteriza a la investigación aplicada, ya que está orientada a la solución de problemas concretos y a la mejora de procesos reales.

Según el nivel de profundidad del conocimiento se centra en detallar y analizar el fenómeno del efecto cola en el parqueo de la mina. Mediante la recolección y análisis de datos históricos y la simulación de escenarios, se busca identificar las causas específicas de las colas. Además, se evaluarán alternativas de mejora en la gestión de la flota, proporcionando un diagnóstico claro y detallado del problema y sus posibles soluciones. Este enfoque descriptivo permite comprender profundamente el contexto operativo y las variables que afectan la eficiencia del flujo de camiones, facilitando la toma de decisiones informadas para optimizar la operatividad.

Al mismo tiempo es un estudio predictivo, al emplear simulaciones computacionales y análisis de información histórica para anticipar y mejorar el flujo de camiones en la mina El Limón. Estas herramientas nos permitirán identificar causas del efecto cola y evaluar alternativas de mejoras para su implementación real y mitigar riesgos a futuro. Al prever los impactos de diferentes estrategias, se optimiza la eficiencia operativa, garantizando decisiones informadas y mitigando riesgos futuros.

Según su orientación en el tiempo, la presente investigación se clasifica como un estudio transversal, ya que este tipo de estudio recopila datos en un único momento, proporcionando una visión instantánea de la situación actual. En este caso, se analizarán los tiempos de espera de la flota de camiones de acarreo de mineral durante el primer trimestre del año 2024. Esta metodología



nos permite describir detalladamente los tiempos de espera en las diferentes áreas claves del proceso y desarrollar modelos predictivos para anticipar futuros tiempos de espera.

## 8.2 Población y Muestra

En el presente estudio, la población está compuesta por los tiempos de espera de la flota de camiones de acarreo de mineral. La muestra teórica se ha determinado a partir de un conjunto de datos obtenidos durante el primer trimestre del año 2024, proporcionados por las fuentes primarias del área de logística terrestre. Esta muestra incluye un total de 23,491 registros, que representan la cantidad de tiempos que los camiones permanecen en el circuito interno de la mina .

Para calcular el tamaño de la muestra representativa se aplicó la fórmula que se muestra a continuación:

$$n = \frac{Z^2 pq N}{e^2(N - 1) + Z^2 pq}$$

Para el modelo estadístico más conveniente, se asume una probabilidad de éxito  $p=0.5$  y de fracaso  $q =0.5$ , lo que implica que las probabilidades de ocurrencia y no ocurrencia de un evento son iguales. Esta suposición maximiza la variabilidad y resulta en valores proporcionales para  $p$  y  $q$ . En este estudio, se utilizó un nivel de confianza del 95% y un margen de error del 5%.

$$n = \frac{(1.96)^2(0.5)(0.5)(23491)}{(0.05)^2(23491 - 1) + (1.96)^2(0.5)(0.5)}$$

$$n = 378$$

Aplicando la fórmula se obtuvo una muestra de tamaño  $n = 378$ .

Posteriormente, con los resultados obtenidos del tamaño de la muestra, se realizó un muestreo estratificado para asegurar que la muestra sea proporcional y representativa de los diferentes grupos dentro de la población aplicando la siguiente fórmula:

$$n_i = \frac{n}{N} \times N_i$$

$N$ : *Tamaño de la población*

$n$ : *Tamaño de la muestra*

$N_i$ : *Tamaño de cada conglomerado*

$n_i$ : *Submuestra de cada conglomerado*

- Para el parqueo:

$$n_1 = \frac{378}{23491} \times 8679 = 139.65 \approx 140$$

- Para báscula:

$$n_2 = \frac{378}{23491} \times 8900 = 143.21 \approx 143$$

- Para el acopio Tramo 1:

$$n_3 = \frac{378}{23491} \times 2894 = 46.56 \approx 47$$

- Para el acopio Tramo 2:

$$n_4 = \frac{378}{23491} \times 1643 = 26.43 \approx 26$$

- Para el acopio Garita Sur:

$$n_5 = \frac{378}{23491} \times 1395 = 22.44 \approx 22$$

$$n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_5 = 140 + 143 + 47 + 26 + 22 = 378$$

Este enfoque permite garantizar la representatividad y precisión en la modelación y análisis del proceso de la flota de camiones.

En resumen, la determinación del tamaño de la muestra y la implementación del muestreo estratificado aseguran que los datos recolectados sean representativos y proporcionen una base sólida para el análisis posterior. Este enfoque nos permite garantizar la precisión y la validez de los resultados obtenidos en la modelación y análisis del proceso de la flota de camiones. En el acápite “Diagnóstico descriptivo del circuito interno”, abordaremos en detalle la aplicación y resultados del muestreo estratificado en el análisis del modelo, proporcionando una visión integral y exhaustiva de los tiempos de espera en los diferentes puntos del circuito interno de la mina.

### **8.3 Recopilación de Datos**

En la presente investigación, se empleó un enfoque de estudio retrospectivo para la recolección de datos. Este método se caracteriza por el análisis de datos existentes previamente recolectados y registrados por la empresa, lo cual permitió acceder a información histórica relevante para el estudio.

Como se mencionó anteriormente, el estudio retrospectivo se fundamenta en la revisión y análisis de una base de datos. En nuestro caso, el área de logística terrestre de la empresa Calibre Mining proporcionó una base de datos que contiene registros detallados del proceso de la flota de

camiones de acarreo de mineral en la mina El Limón. Esta base de datos incluye información sobre los tiempos de llegada y salida de los camiones en el estacionamiento, báscula y patios de acopio.

La base de datos proporcionada por la empresa fue fundamental para el desarrollo de la investigación. Dicha base contiene todos los datos necesarios para realizar los análisis y simulaciones requeridos. No se utilizaron instrumentos adicionales de recolección de datos, ya que la información suministrada cubría ampliamente las necesidades del estudio.

#### **8.4 Procedimientos para el Procesamiento y Análisis de Datos**

En este apartado se detallan los procedimientos que se llevarán a cabo para el procesamiento y análisis de los datos recopilados durante la investigación. Estos procedimientos son fundamentales para asegurar que los datos se manejen de manera precisa y se analicen correctamente para obtener resultados válidos y significativos.

Para el procesamiento y análisis de los datos se utilizará ARENA, este es un software de simulación de eventos discretos líder en el mundo, desarrollado por Rockwell Automation. Se utiliza para modelar sistemas complejos como una serie de eventos bien definidos y ordenados, permitiendo mejorar la visibilidad del efecto de cambios en sistemas o procesos, diagnosticar y corregir cuellos de botella.

Este software se enfoca en la optimización del rendimiento del sistema, la reducción de riesgos a través de simulaciones rigurosas, la disminución de la incertidumbre al evaluar el impacto de la variabilidad, y la visualización de resultados con animaciones en 2D y 3D. ARENA Software es una herramienta valiosa para empresas que buscan mejorar sus procesos y tomar decisiones empresariales fundamentadas (Rockwell Automation, 2023).

Además, se utilizará la característica Input Analyzer de ARENA, que ayuda a seleccionar y ajustar distribuciones de probabilidad a los datos de entrada, asegurando que los modelos de simulación se basen en datos precisos y representativos.

Los datos recopilados durante la investigación serán sometidos a un proceso de procesamiento para asegurar su calidad y prepararlos adecuadamente para el análisis. Los pasos a seguir para el procesamiento de los datos son los siguientes:

- 1) Limpieza de Datos: Se eliminarán los datos duplicados y se gestionarán los valores faltantes mediante técnicas de imputación. Esto garantizará que los datos estén completos y sean coherentes antes de proceder con el análisis.
- 2) Organización de Datos: Los datos se organizarán en tablas y se codificarán según sea necesario para facilitar el análisis. Se crearán variables adicionales si es necesario para representar los datos de manera efectiva en el software de simulación.
- 3) Transformación de Datos: Se aplicarán transformaciones a los datos, como normalización y escalado, para prepararlos para el análisis estadístico. Esto asegurará que los datos estén en un formato adecuado para su procesamiento en el software de simulación.

Una vez que los datos estén limpios y organizados, se procederá con el análisis utilizando las siguientes técnicas:

- 1) Simulación en ARENA: Se utilizará el software ARENA para modelar y analizar el flujo de la flota de camiones de acarreo de mineral, identificando cuellos de botella y optimizando el número de camiones de acarreo de mineral necesarios. La

simulación permitirá evaluar el impacto de diferentes escenarios y la variabilidad en el rendimiento del sistema.

- 2) **Análisis Descriptivo:** Se realizará un análisis descriptivo para resumir y describir las características principales de los datos. Se utilizarán medidas de tendencia central y dispersión para facilitar la comprensión de los patrones y distribuciones en los datos.
- 3) **Input Analyzer:** Se utilizará la característica Input Analyzer de ARENA para seleccionar y ajustar las distribuciones de probabilidad a los datos de entrada. Esto asegurará que los modelos de simulación se basen en datos precisos y representativos.

En definitiva, los procedimientos detallados en esta sección aseguran que los datos recopilados sean procesados y analizados de manera precisa y rigurosa. El uso de software especializado como ARENA y su función Input Analyzer garantizan la calidad y representatividad de los modelos de simulación. Estos pasos son fundamentales para obtener resultados válidos y significativos que contribuyan a la optimización de la gestión de la flota de camiones de acarreo de mineral en la mina El Limón.

### **8.5 Cronograma de la investigación**

En este apartado, se presenta un cronograma detallado de la investigación, el cual refleja las etapas clave y los plazos establecidos para cada fase del proyecto. Este cronograma ha sido diseñado meticulosamente para garantizar una gestión eficiente del tiempo y de los recursos, permitiendo un seguimiento riguroso del progreso de la investigación. Cada actividad ha sido programada con el objetivo de cumplir con los hitos fundamentales, asegurando así el logro de los objetivos planteados.

Fecha	Actividad a realizar	Responsables	Observación
marzo, 2024	Elección y aprobación del tema	Equipo de Investigación.: Cesia, Frederick y Maryann. Decano de la facultad	Se analizan diferentes propuestas de tema y se elige una, luego el decano la aprueba
marzo, 2024	Revisión de anteriores investigaciones existentes sobre el tema	Equipo de Investigación: Cesia, Frederick y Maryann.	Se analizan estudios previos y el estado actual del conocimiento del mismo
marzo, 2024	Planteamiento del problema y objetivos	Equipo de Investigación: Cesia, Frederick y Maryann.	Definir claramente la pregunta de investigación y formular hipótesis
abril, 2024	Aprobación del planteamiento del problema y los objetivos de la investigación	Decano de la facultad de ingeniería	El decano de la facultad aprueba los objetivos y el planteamiento del problema
abril, 2024	Establecer diseño de la investigación	Equipo de Investigación: Cesia, Frederick y Maryann.	Elegir el enfoque metodológico, el diseño y las técnicas de recolección de datos
mayo, 2024	Recolección de datos	Equipo de Investigación: Cesia, Frederick y Maryann.	Obtener los datos necesarios mediante las técnicas seleccionadas
mayo, 2024	Desarrollo del modelo de simulación	Equipo de Investigación: Cesia, Frederick y Maryann. Profesor Jesús Mendoza	Se realizó la construcción y validación del modelo simulación en ARENA
junio, 2024	Simulación de escenario	Equipo de Investigación: Cesia, Frederick y Maryann. Profesor Jesús Mendoza	Se crearon diferentes escenarios operativos para evaluar el impacto de diversas estrategias de optimización
junio, 2024	Análisis de resultado	Equipo de Investigación: Cesia, Frederick y Maryann.	Interpretación y comparación de escenarios en ARENA

junio, 2024	Propuesta de soluciones	Equipo de Investigación: Cesia, Frederick y Maryann.	Se basó en los resultados de los análisis para determinar las mejores estrategias de optimización de la flota de camiones de acarreo en la mina El Limón
julio, 2024	Defensa de la investigación	Equipo de Investigación: Cesia, Frederick y Maryann.	Presentación de la investigación a un jurado

*Tabla 1. Cronograma de la investigación*

*Fuente: Elaboración propia*



## **9. Resultados y Discusión**

### **9.1. Diagnóstico descriptivo del circuito interno**

Para entender y mejorar el rendimiento de la flota de camiones en la mina El Limón, se realizó un diagnóstico exhaustivo del proceso operativo. Este diagnóstico incluyó la identificación y análisis de elementos y variables clave que influyen en la eficiencia del transporte. La información necesaria para este análisis fue recopilada a través de reuniones detalladas con las fuentes primarias del área de logística terrestre, lo que permitió obtener una visión precisa y comprensiva del funcionamiento actual.

Para comprender el sistema y el funcionamiento completo del circuito de la mina, se nos informó que esta opera 12 horas diarias, de 6 a.m. a 6 p.m. La obtención de esta información fue fundamental para la creación del modelo en ARENA, permitiendo ajustar las recomendaciones a las necesidades reales de la mina y asegurando así una mejora tangible en el rendimiento y la productividad del transporte.

De dichas reuniones obtuvimos una base de datos robusta, alimentada por sistemas de geocercas implementadas en los sistemas GPS de los camiones. Las geocercas son perímetros virtuales definidos geográficamente, que permiten el monitoreo preciso de la ubicación y movimientos de los camiones dentro de áreas específicas como el estacionamiento, la báscula y los patios de acopios. Entonces, cada vez que un camión ingresaba o salía de estas áreas, el sistema GPS registraba automáticamente el evento, proporcionando datos precisos sobre los tiempos de llegada y salida.

La base de datos fue cuidadosamente depurada, seleccionando únicamente los tiempos registrados durante el primer trimestre del año en curso. Posteriormente, se procedió a eliminar

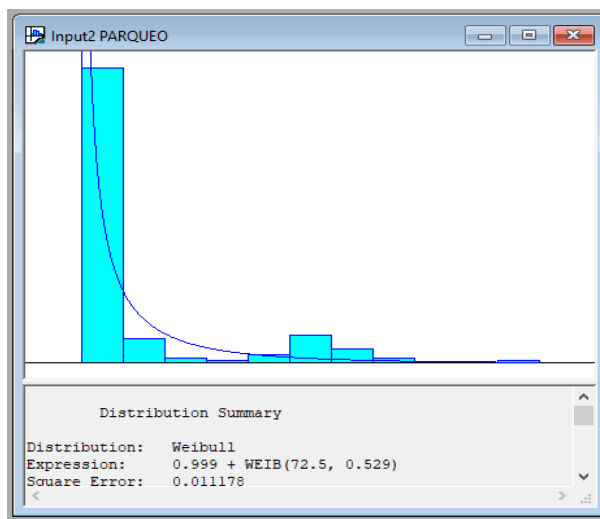
todos los datos duplicados, asegurando así la precisión y la integridad de la información utilizada para el análisis. De esta manera, se obtuvo un total de 23,491 registros.

Con el total de registros recopilados, se determinó el tamaño de la muestra y se llevó a cabo el muestreo estratificado. Posteriormente se analizaron las muestras utilizando la herramienta Input Analyzer de Arena para conocer el tipo de distribución de los datos en cada proceso.

Antes de ir al Input Analyzer se extrajeron de forma aleatoria los datos de la base proporcionada por el área de logística terrestre de la empresa Calibre Mining según los resultados de la muestra estratificada, donde esos datos extraídos fueron agrupados en distintos documentos de textos (TXT), uno para cada proceso del sistema, que luego fueron importados al Input Analyzer.

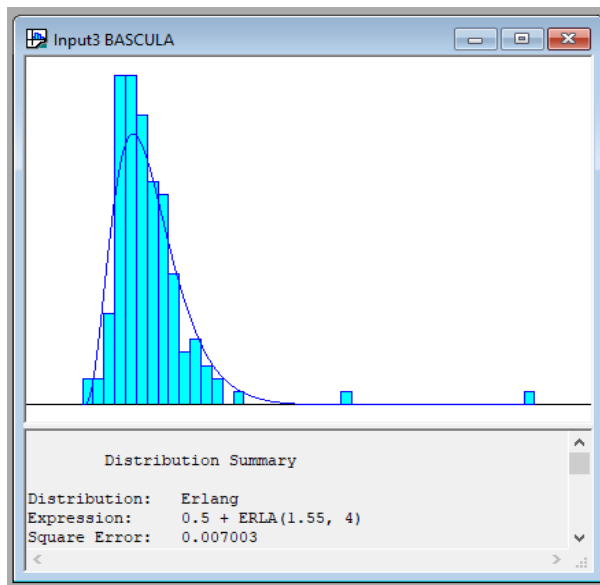
Una vez importados los datos, Input Analyzer analizó las distribuciones estadísticas de los datos cargados, luego el software ajustó la distribución que más coincide con los datos cargados, y como resultado obtuvimos las siguientes distribuciones para cada proceso:

- Parqueo:



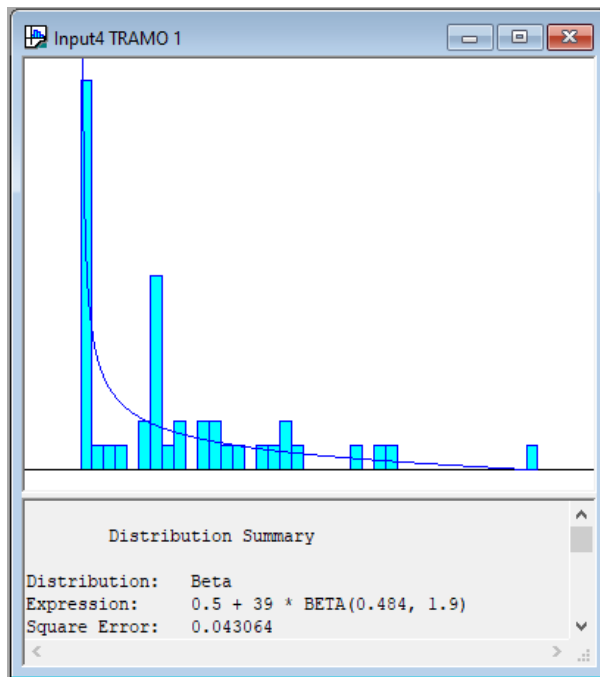
*Ilustración 1. Distribución Parqueo  
Fuente: Input Analyzer Arena*

- Báscula:



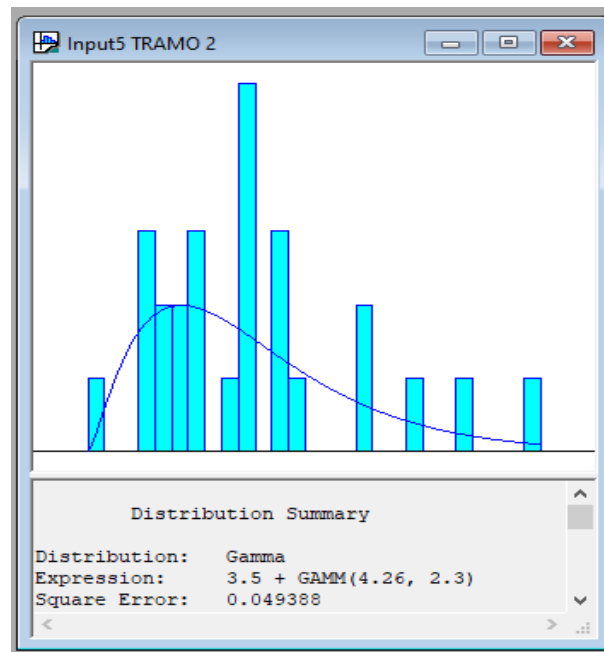
*Ilustración 2. Distribución Báscula  
Fuente: Input Analyzer Arena*

- Tramo 1:



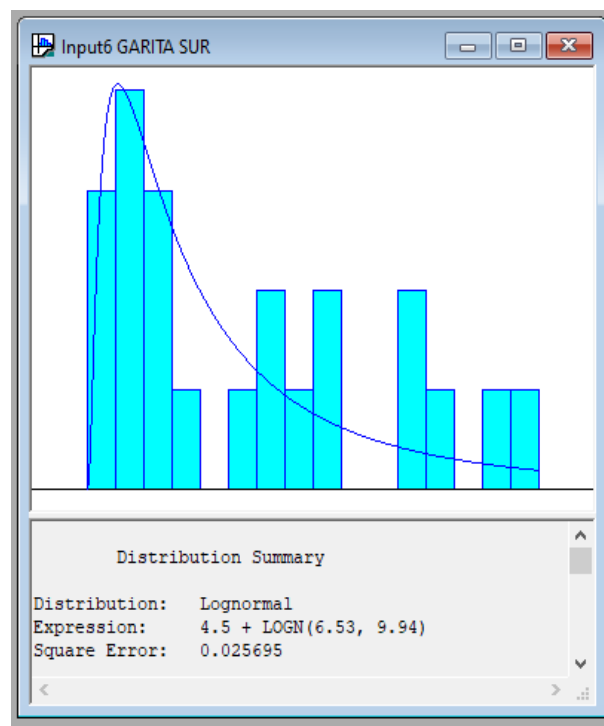
*Ilustración 3. Distribución Tramo 1  
Fuente: Input Analyzer Arena*

- Tramo 2:



*Ilustración 4. Distribución Tramo 2  
Fuente: Input Analyzer Arena*

- Garita Sur:



*Ilustración 5. Distribución Garita Sur  
Fuente: Input Analyzer Arena*

Este procedimiento se repitió para cada proceso del sistema con el fin de determinar la distribución más adecuada para los datos de cada uno, y qué luego dichas distribuciones servirán para correr el modelo de simulación.

## **9.2. Análisis del modelo**

Para la elaboración del modelo en Arena se analizó primeramente el proceso del circuito interno de la mina el cual se detalla a continuación:

- El camión llega al parqueo (el cual tiene una capacidad para 25 camiones). Se estaciona, el conductor coloca cuñas y cono y acude a su supervisor para recibir una breve charla de seguridad y llenar el formato correspondiente.
- Luego el conductor en conjunto con su supervisor y un mecánico, realiza una inspección del camión.
- Seguidamente el conductor recibe instrucciones sobre a qué acopio dirigirse para cargar el mineral y su autorización de ingreso.
- El camión se traslada a la báscula y garita.
- Se estaciona, el conductor baja del camión, coloca cono y cuñas, se dirige a la garita a pie, entrega la documentación correspondiente, ingresa su huella y se le realiza una prueba de alcoholemia.
- El conductor regresa a su camión, lo lleva a báscula para ser pesado vacío (peso tara). Fotos de la báscula y garita se encuentran en los anexos.
- El camión emprende marcha al acopio correspondiente, se posiciona para ser cargado, y una vez finalizada la carga, procede a realizar el encarpado.
- Regresa a la báscula y marca salida, luego sube nuevamente a la báscula para pesarse cargado (peso bruto).

- En caso de que el peso no sea conforme, el camión regresa al acopio para descargar el exceso de mineral y repite el proceso de encarpado y pesaje.
- Una vez el peso es conforme, el camión emprende su marcha hacia la vía pública.

Para ilustrar el proceso descrito, se ha desarrollado un flujograma que detalla cada una de las etapas clave. Este diagrama proporciona una representación visual del flujo de trabajo, facilitando la comprensión de los pasos involucrados y su secuencia lógica. A continuación, se presenta el flujograma correspondiente:

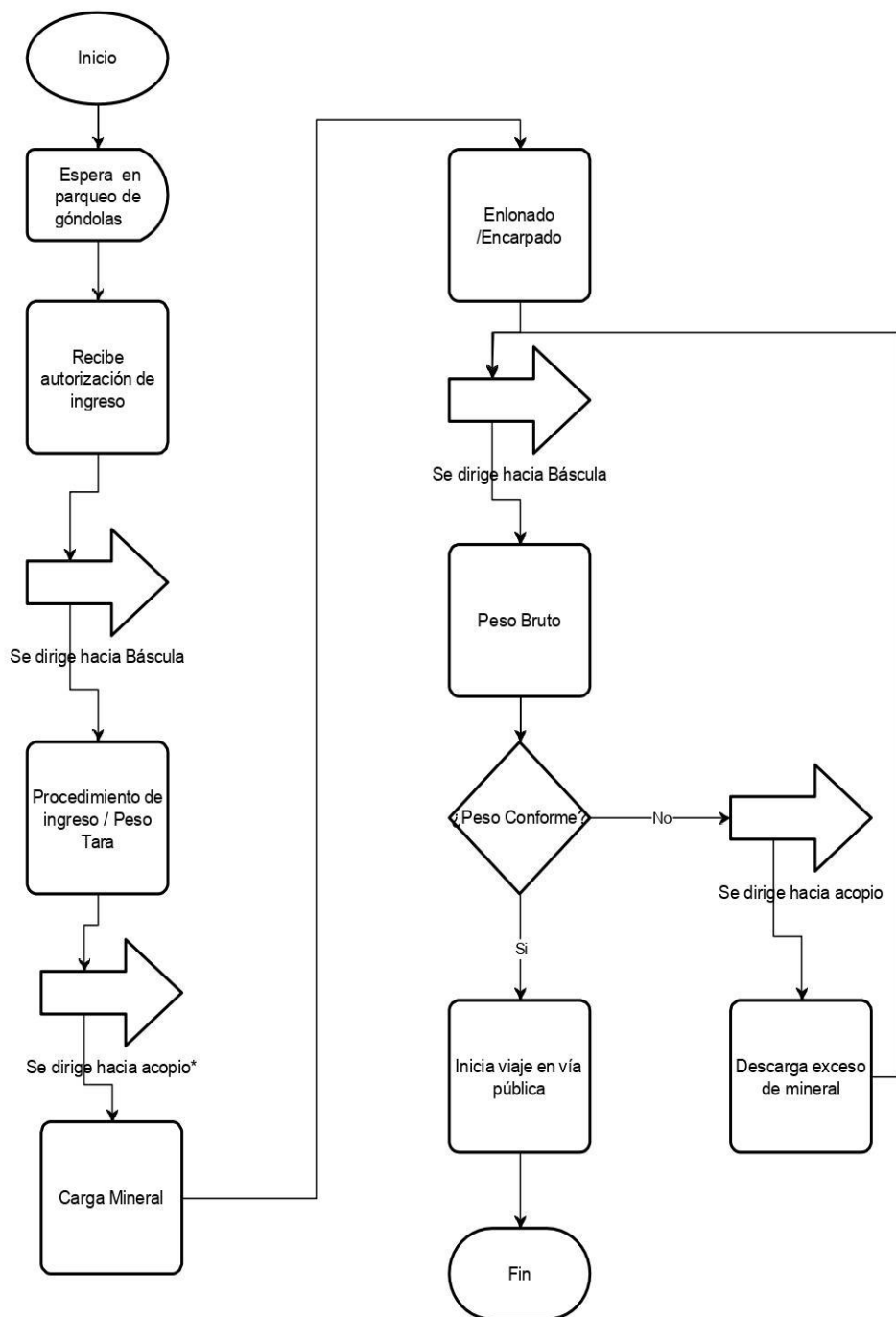


Ilustración 6. Flujograma Circuito interno de la mina El Limón

Fuente: Elaboración Propia

A partir del flujograma, se elaboró el diagrama del proceso de la flota de camiones en Arena:

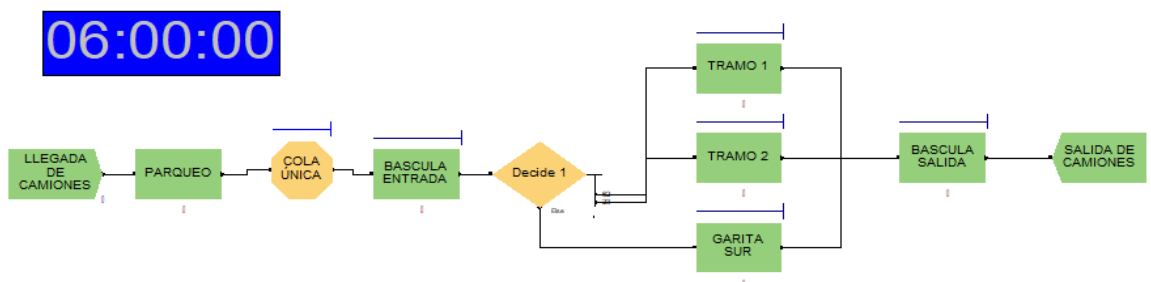


Ilustración 7. Diagrama del proceso de la mina El Limón en Arena  
Fuente: Elaboración Propia

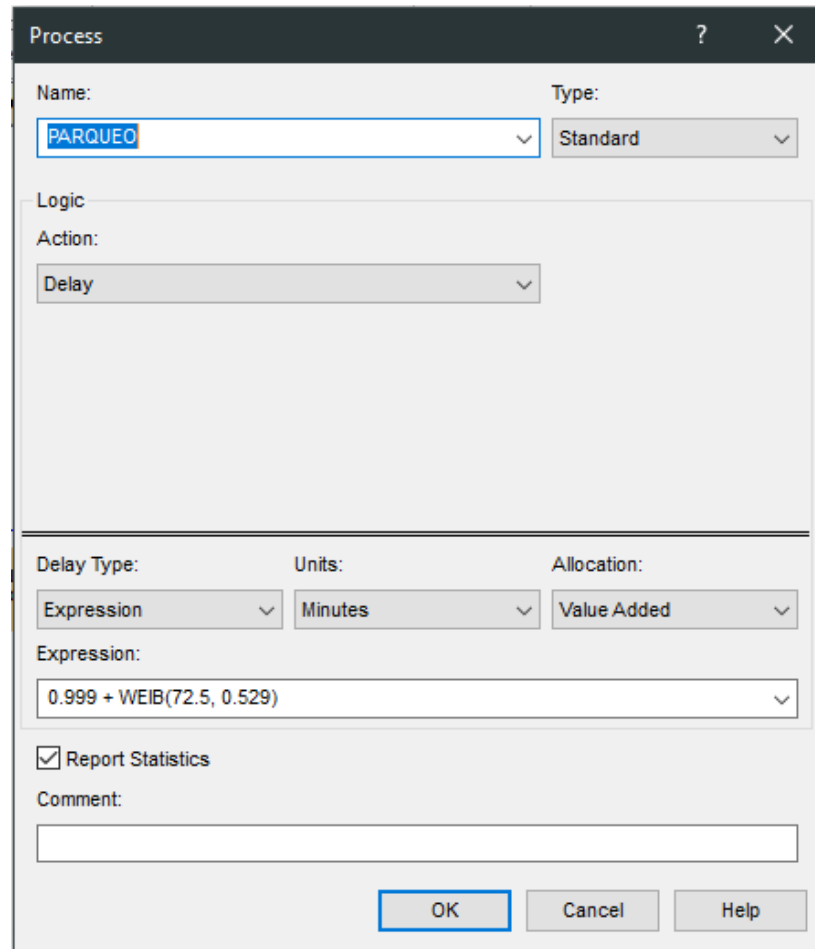
El modelo de simulación en ARENA para la mina El Limón está formado por los siguientes componentes y etapas:

- 1) Create (Llegada de camiones): Inicia el flujo de camiones en el sistema, definiendo las tasas de llegada y otros parámetros iniciales. Esta etapa representa la llegada de los camiones al sistema. Se utiliza un módulo "Create" para generar entidades que representan los camiones que ingresan al proceso. Se tiene definido que el tiempo entre llegada de los camiones es constante cada 10 minutos.

Ilustración 8. Módulo Create (Llegada de camiones)  
Fuente: Arena software



- 2) Process (Parqueo): Los camiones que ingresan al sistema se dirigen al área de parqueo. Se utiliza un módulo "Process" para simular el tiempo que los camiones permanecen estacionados. Modela el tiempo de espera y la disponibilidad de espacio en el parqueo antes de continuar al siguiente paso.



The screenshot shows the 'Process' dialog box in Arena software. The 'Name' field is set to 'PARQUEO' and the 'Type' is 'Standard'. Under the 'Logic' section, the 'Action' is set to 'Delay'. The 'Delay Type' is 'Expression', 'Units' are 'Minutes', and 'Allocation' is 'Value Added'. The 'Expression' field contains the formula '0.999 + WEIB(72.5, 0.529)'. The 'Report Statistics' checkbox is checked. There is an empty 'Comment' field at the bottom. The 'OK', 'Cancel', and 'Help' buttons are located at the bottom right of the dialog.

Ilustración 9. Módulo Process (Parqueo)  
Fuente: Arena software

- 3) Hold (Cola única): Una vez estacionados, los camiones se mueven a una cola única. Se emplea un módulo "Hold" para gestionar esta cola, asegurando que los camiones esperen su turno de manera ordenada. Controla el flujo de camiones hacia la báscula de entrada, manteniendo un orden de llegada.

Ilustración 10. Módulo Hold (Cola única)  
Fuente: Arena software

- 4) Process (Báscula entrada): En esta etapa, los camiones pasan por la báscula de entrada para registrar su peso inicial. Se utiliza un módulo "Process" para simular el proceso de pesaje. Captura el peso de los camiones y simula el tiempo necesario para completar el pesaje.

Ilustración 11. Módulo Process (Báscula entrada)  
Fuente: Arena software

5) Decide: Este módulo determina la ruta que tomarán los camiones después de la báscula de entrada. Se utiliza un módulo "Decide" para dirigir los camiones a uno de los tres acopios disponibles (Tramo 1, Tramo 2, Garita Sur). Rutea los camiones según criterios predefinidos, distribuyendo el flujo de manera equilibrada entre las diferentes rutas. Los porcentajes utilizados en este módulo se definieron sumando los tiempos de los tres acopios y, con respecto a ese total, se calcularon las proporciones de utilización en porcentaje de cada acopio en esos tres meses de registro.

TRAMO 1	62203	62.3%
TRAMO 2	22442	22.5%
GARITA SUR	15258	15.3%
TOTAL	99903	100.00%

Tabla 2. Proporciones de utilización en porcentaje de cada acopio  
Fuente: Elaboración propia

The screenshot shows the 'Decide' configuration dialog box. The 'Name' field is set to 'Decide 1' and the 'Type' is 'N-way by Chance'. The 'Percentages' list contains three entries: '62', '23', and '<End of list>'. The 'OK' button is highlighted with a blue border.

Ilustración 12. Módulo Decide (Decide 1)  
Fuente: Arena software

- 6) Process (Tramo 1, Tramo 2 y Garita Sur): Los camiones transitan por uno de los tramos designados. Cada tramo es simulado con un módulo "Process" para representar el tiempo de viaje y las operaciones específicas de cada ruta. Modela el tiempo de tránsito y las operaciones realizadas en cada tramo antes de llegar a la báscula de salida.

The screenshot shows the 'Process' dialog box with the following configuration:

- Name:** TRAMO 1
- Type:** Standard
- Logic:**
  - Action:** Seize Delay Release
  - Priority:** Medium(2)
- Resources:**
  - Resource: MAQUINISTA, 1
  - <End of list>
- Delay Type:** Expression
- Units:** Minutes
- Allocation:** Value Added
- Expression:**  $0.5 + 39 * \text{BETA}(0.484, 1.9)$
- Report Statistics
- Comment:** (empty text box)

Buttons: OK, Cancel, Help

Ilustración 13. Módulo Process (Tramo 1)  
Fuente: Arena software

The screenshot shows the 'Process' dialog box with the following configuration:

- Name:** TRAMO 2
- Type:** Standard
- Logic:**
  - Action:** Seize Delay Release
  - Priority:** Medium(2)
  - Resources:** Resource, MAQUINISTA, 1
- Delay Type:** Expression
- Units:** Minutes
- Allocation:** Value Added
- Expression:**  $3.5 + \text{GAMM}(4.26, 2.3)$
- Report Statistics
- Comment:** (empty text box)

Buttons at the bottom: OK, Cancel, Help.

Ilustración 14. Módulo Process (Tramo 2)  
Fuente: Arena software

The screenshot shows the 'Process' dialog box with the following configuration:

- Name:** GARITA SUR
- Type:** Standard
- Logic:**
  - Action:** Seize Delay Release
  - Priority:** Medium(2)
  - Resources:** Resource, MAQUINISTA, 1
- Delay Type:** Expression
- Units:** Minutes
- Allocation:** Value Added
- Expression:**  $4.5 + \text{LOGN}(6.53, 9.94)$
- Report Statistics
- Comment:** (empty text box)

Buttons at the bottom: OK, Cancel, Help.

Ilustración 15. Módulo Process (Garita sur)  
Fuente: Arena software

- 7) Process (Báscula salida): Registra el peso final de los camiones, simulando el tiempo necesario para completar esta operación. Los camiones pasan por la báscula de salida para registrar su peso final. Se emplea un módulo "Process" para simular el pesaje al final del proceso.

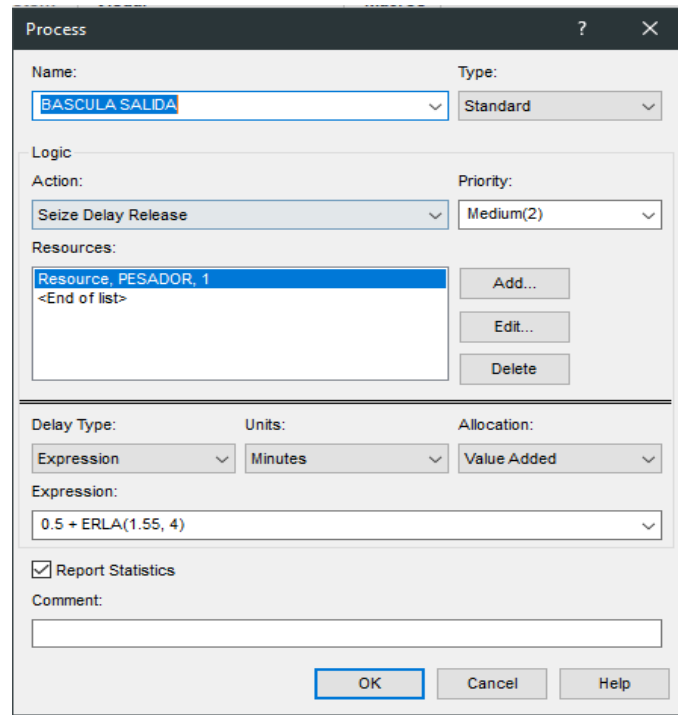
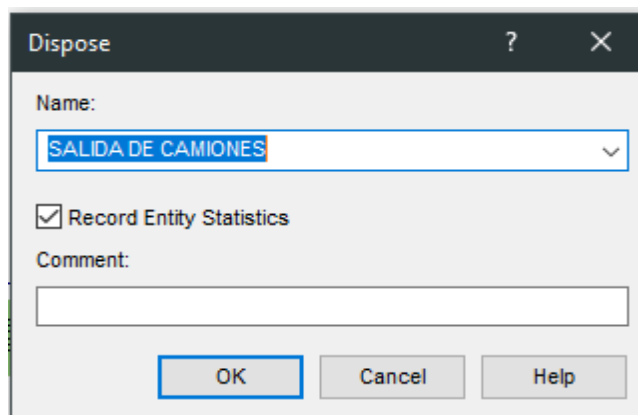


Ilustración 16. Módulo Process (Báscula salida)  
Fuente: Arena software

- 8) Dispose (Salida de camiones): Finaliza el flujo de camiones, indicando que han completado el ciclo operativo y han salido del sistema. Esta última etapa representa la salida de los camiones del sistema. Se utiliza un módulo "Dispose" para remover las entidades (camiones) del modelo.



*Ilustración 17. Módulo Dispose (Salida de camiones)  
Fuente: Arena software*

Para finalizar, el modelo de simulación en ARENA funcionó adecuadamente y generó resultados significativos para la investigación. Se obtuvo como resultado simulando durante 12 horas que ingresaron 73 camiones al sistema y salieron 48 camiones, donde su tiempo total promedio en el sistema fue de 138.20 minutos y como promedio de camiones en el sistema (WIP) tenemos 14.4 camiones. Y también obtuvimos que el promedio de camiones en la cola era de 4.20 camiones con un tiempo promedio en la cola de 51.57 minutos.

A partir de la simulación, se pudieron analizar los tiempos de espera y evaluar diferentes estrategias para mejorar la eficiencia operativa en el parqueo de camiones de la mina El Limón. Estos resultados obtenidos proporcionan una base sólida para la toma de decisiones informadas y la implementación de mejoras en el proceso, contribuyendo a la eliminación de las colas y al incremento de la productividad de la operación minera.

### **9.3. Propuestas de mejora**

En este apartado se analizan dos propuestas de mejora con el objetivo de optimizar el rendimiento del sistema actual de gestión de camiones. La evaluación se basa en indicadores clave de desempeño como el tiempo total promedio en el sistema, el tiempo promedio de espera en la

cola, el promedio de camiones en el sistema (WIP), el promedio de camiones en la cola, y la cantidad de camiones que ingresan y salen del sistema.

A continuación, verán una tabla comparativa que resume estos indicadores para la situación actual y las dos propuestas de mejora. A partir de estos análisis, se busca identificar la configuración que permita una mayor eficiencia operativa y una mejor gestión del flujo de camiones.

Medidas de desempeño	Situación Actual (1 báscula)(1 máquina)	Propuesta 1 (2 básculas)(2 máquinas)	Propuesta 2 (2 básculas) (1 máquina)
Tiempo total promedio en el sistema	138.20 minutos	109.51 minutos	129.68 minutos
Tiempo promedio de espera en la cola	51.57 minutos	3.38 minutos	4.18 minutos
Promedio de camiones en el sistema (WIP)	14.40 camiones	12.18 camiones	13.75 camiones
Promedio de camiones en la cola	4.20 camiones	0.33 camiones	0.35 camiones
Número de camiones que ingresan al sistema	73 camiones	73 camiones	73 camiones
Número de camiones que salen del sistema	48 camiones	57 camiones	54 camiones

*Tabla 3. Tabla comparativa de propuestas de mejora  
Fuente: Elaboración propia*

Al comparar la situación actual con las propuestas de mejora, se observan diferencias significativas en los indicadores de desempeño.

En la situación actual, con un solo operador y un maquinista para los tres acopios, el tiempo total promedio en el sistema es de 138.20 minutos y el tiempo promedio de espera en la cola es de 51.57 minutos. Además, el promedio de camiones en el sistema (WIP) es de 14.40 y el promedio de camiones en la cola es de 4.20. El número de camiones que ingresan al sistema es de 73,



mientras que solo 48 camiones logran salir del sistema, lo que indica una eficiencia limitada en la gestión actual.

Para la propuesta 1, se introduce un operador adicional para la báscula de salida y un maquinista adicional para la Garita sur. Esta configuración reduce drásticamente el tiempo promedio de espera en la cola a 3.38 minutos y el tiempo total promedio en el sistema a 109.51 minutos. El promedio de camiones en el sistema (WIP) disminuye a 12.18 y el promedio de camiones en la cola se reduce a 0.33. El número de camiones que salen del sistema aumenta significativamente a 57, lo que refleja una mejora sustancial en la eficiencia operativa.

Para la propuesta 2, se mantiene un operador adicional para la báscula de salida, pero no se agrega un maquinista adicional. Aun así, se observa una mejora con respecto a la situación actual. El tiempo promedio de espera en la cola se reduce a 4.18 minutos y el tiempo total promedio en el sistema disminuye a 129.68 minutos. El promedio de camiones en el sistema (WIP) es de 13.75 y el promedio de camiones en la cola baja a 0.35. El número de camiones que salen del sistema se incrementa a 54, lo que sigue siendo una mejora notable respecto a la situación actual.

Ambas propuestas presentan mejoras en comparación con la situación actual. Sin embargo, la Propuesta 1 destaca como la opción más efectiva, ya que proporciona la mayor reducción en los tiempos de espera y el tiempo total en el sistema, así como un aumento significativo en el número de camiones procesados. Por lo tanto, se recomienda implementar la Propuesta 1 para lograr una optimización óptima en la gestión del flujo de camiones en el sistema.

Consideramos que la mejor propuesta es la Propuesta 1, donde se sugiere contar con una cargadora para el tramo 1 y 2 y otra cargadora para la Garita sur, debido a la distancia considerable que hay entre los acopios. El tramo 1 y 2 están cerca entre sí, lo que facilita la gestión conjunta

con una sola cargadora. En cambio, la Garita sur se encuentra a una distancia significativa, lo que implica que trasladar una cargadora desde los tramos 1 y 2 hasta la Garita sur generaría retrasos. Esta configuración optimiza la eficiencia al reducir tiempos de traslado y mejorar la capacidad de respuesta en cada punto del sistema.

En la siguiente imagen de un mapa satelital del circuito interno de El Limón, se han marcado las ubicaciones del parqueo, la báscula y los patios de acopio. Esta representación nos proporciona una visión clara de la distribución geográfica y las distancias relativas entre los diferentes elementos del sistema, lo cual es útil al momento de formular propuestas de mejora, ya que nos permite visualizar las rutas en el circuito.



*Ilustración 18. Mapa satelital mina El Limón  
Fuente: Google Maps*

Tomando en cuenta que en el sistema actual del circuito interno, se operan 48 camiones cada día, cada uno con una capacidad de carga de 35 toneladas de mineral y que la meta del total de toneladas diaria es de 2200 según las fuentes primarias del área de logística terrestre. Tenemos que el cálculo del total de toneladas transportadas al día es el siguiente:

Capacidad del servicio de carga de mineral:

$$\text{Total de toneladas} = \text{Número de camiones} \times \text{Toneladas por camión}$$

$$\text{Total de toneladas} = 48 \text{ camiones} \times 35 \text{ toneladas/camión} = 1680 \text{ toneladas}$$

Propuesta de mejora 1: 57 camiones

La primera propuesta de mejora consiste en incrementar el número de camiones a 57. Con esta propuesta, el total de toneladas transportadas al día se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Total de toneladas} = 57 \text{ camiones} \times 35 \text{ toneladas/camión} = 1995 \text{ toneladas}$$

Propuesta de mejora 2: 54 camiones

La segunda propuesta de mejora consiste en incrementar el número de camiones a 54. Con esta propuesta, el total de toneladas transportadas al día se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Total de toneladas} = 54 \text{ camiones} \times 35 \text{ toneladas/camión} = 1890 \text{ toneladas}$$

A continuación en la siguiente tabla se resumen los resultados de las capacidades de acuerdo a cada una de las propuestas.

Propuestas	Número de camiones	Toneladas por camión	Total de toneladas (ton/ día)
Situación actual (1 báscula, 1 máquina)	48	35	1680
Propuesta 1 (2 báscula, 2 máquinas)	57	35	1995

Propuestas	Número de camiones	Toneladas por camión	Total de toneladas (ton/ día)
Propuesta 2 (2 báscula, 1 máquina)	54	35	1890

*Tabla 4. Total toneladas por camión según propuestas  
Fuente: Elaboración propia*

Además, realizamos el cálculo en porcentaje del incremento de la carga de mineral para evaluar de manera precisa cómo cada propuesta de mejora logística contribuye a mejorar la eficiencia operativa del sistema.

### **Incremento porcentual**

*Incremento de toneladas porcentual*

$$= \left( \frac{\text{Nueva capacidad de toneladas diaria} - \text{Capacidad de toneladas actual}}{\text{Capacidad de tonelada actual}} \right) \times 100$$

Sistema actual 48 camiones con un total de toneladas de 1680

### **Propuesta de mejora 1**

Total de toneladas con 57 camiones: 1995 toneladas

Incremento en toneladas de mineral:

$$1995 - 1680 = 315 \text{ toneladas}$$

$$\left( \frac{315}{1680} \right) \times 100 = 18.75 \%$$

## Propuesta de mejora 2

Total de toneladas con 54 camiones: 1890 toneladas

Incremento en toneladas de mineral:

$$1890 - 1680 = 210 \text{ toneladas}$$

$$\left( \frac{210}{1680} \right) \times 100 = 12.50 \%$$

La siguiente tabla resume las comparaciones clave entre la situación actual de operación con 48 camiones y dos propuestas de mejora logística: una con 57 camiones y otra con 54 camiones. Se detalla el total de toneladas de mineral transportadas diariamente, así como los incrementos absolutos y porcentuales en la producción, proporcionando una visión clara del impacto potencial de cada escenario en la eficiencia operativa.

Propuestas	Total de Toneladas (ton/día)	Incremento en Toneladas (ton/día)	Incremento en Toneladas (ton/día)
Situación Actual (48 camiones)	1680	-	-
Propuesta de Mejora 1 (57 camiones)	1995	315	18.75
Propuesta de Mejora 2 (54 camiones)	1890	210	12.50

Tabla 5. Incremento de toneladas por día según propuestas  
Fuente: Elaboración propia

- La Propuesta de Mejora 1 (57 camiones) ofrece un mayor incremento en el total de toneladas (315 toneladas) y un mayor incremento porcentual (18.75%) en comparación con la situación actual.
- La Propuesta de Mejora 2 (54 camiones) también ofrece una mejora significativa pero menor (210 toneladas y 12.50% de incremento).

La Propuesta de Mejora 1 (57 camiones) es la mejor opción para mejorar la eficiencia operativa. Al incrementar el número de camiones a 57, se logra un aumento significativo en la cantidad de toneladas de mineral transportadas diariamente. Con esta propuesta, se transportarán 1995 toneladas diarias, lo que representa un incremento de 315 toneladas (18.75%) en comparación con la situación actual de 48 camiones. Este aumento no solo permite un mayor volumen de producción, sino que también contribuye a una mejora de la capacidad de cumplir y superar las metas diarias establecidas.

No fue posible calcular el beneficio económico de las propuestas, ya que esta información es confidencial y no puede ser proporcionada. Sin embargo, la mejora en la eficiencia operativa y el aumento en la capacidad de transporte de mineral son indicadores claros de que la Propuesta de Mejora 1 tiene un impacto positivo significativo en el rendimiento del sistema de transporte interno.

Por otro lado, estos beneficios no solo se traducen en una mejora cuantificable en la productividad y la capacidad operativa, sino que también fortalecen la cultura de seguridad en el lugar de trabajo. Al reducir el promedio de camiones en la cola de 4.20 a 0.33, se disminuyen significativamente los riesgos en el parqueo:

- Atropellamiento de personas durante reparaciones imprevistas: Menos camiones en espera reducen la necesidad de reparaciones urgentes en áreas de tráfico, permitiendo que estas se realicen en zonas seguras y designadas, lejos de la circulación de los equipos pesados.
- Colisiones durante maniobras de reversa: Menor congestión facilita las maniobras de reversa, proporcionando más espacio y visibilidad, lo que reduce el riesgo de colisiones con otros vehículos.
- Atropellamiento o atrapamiento al salir del parqueo: Un flujo vehicular más ordenado permite rutas claras y seguras para camiones y peatones, disminuyendo el riesgo de atropellamientos o atrapamientos y asegurando una salida más rápida y segura de los camiones y personal mecánico.

En conjunto, estas mejoras contribuyen a un entorno de parqueo más seguro y eficiente, minimizando la probabilidad de accidentes. La Propuesta de Mejora 1 no solo incrementa la eficiencia operativa y la producción diaria de mineral, sino que también reduce significativamente los riesgos asociados con el parqueo. Menos congestión en las áreas de tránsito permite reparaciones más seguras, maniobras de reversa más controladas y una salida de camiones más ordenada, mitigando los riesgos de atropellamiento, colisiones y atrapamientos. Esta mejora integral fortalece la seguridad laboral y optimiza el flujo de trabajo, beneficiando tanto a la operación como al bienestar del personal.

## **10. Conclusiones**

### **10.1. Conclusiones en base a los objetivos**

En este estudio, se abordó la compleja problemática de la congestión en el parqueo de camiones de acarreo de mineral en la mina El Limón, localizada en León. Utilizando el software ARENA para la simulación de escenarios, se desarrolló una investigación exhaustiva con el objetivo primordial de reducir los tiempos de espera de los camiones, mejorando así la eficiencia operativa y mitigando los riesgos de seguridad asociados.

El enfoque principal de la investigación fue diseñar y evaluar estrategias innovadoras para reducir los tiempos de espera de los camiones de acarreo de mineral mediante el uso avanzado de simulaciones computacionales. Los resultados obtenidos revelan de manera contundente la efectividad de esta metodología para identificar cuellos de botella operativos y proponer soluciones prácticas que optimizan significativamente el flujo logístico en el parqueo de camiones de la mina.

Se elaboró un diagnóstico exhaustivo de los principales elementos, variables y datos del proceso de la flota de camiones a través de fuentes primarias del área de logística terrestre. Este diagnóstico proporcionó una visión detallada y precisa de los factores que influyen en el desempeño de la flota, incluyendo tiempos de espera, rutas, y capacidades de carga, entre otros. La información obtenida sirvió como base fundamental para el desarrollo del modelo de simulación.

En este estudio, se aplicó un muestreo estratificado con el objetivo de garantizar la representatividad y precisión de la muestra utilizada en el análisis del proceso de la flota de camiones. Este enfoque comenzó con la determinación del tamaño de la muestra, seguido por la aplicación de una fórmula específica para calcular el número de unidades de cada estrato dentro



de la población. Este método aseguró que diferentes grupos dentro del sistema logístico fueran adecuadamente representados, incluyendo áreas como parqueos, básculas, y puntos de acopio. La implementación del muestreo estratificado fortaleció la validez de los resultados obtenidos, proporcionando una base robusta para el análisis detallado de los tiempos de espera y la eficiencia operativa de la flota de camiones.

Luego se analizó el sistema de colas utilizando el modelo de simulación desarrollado a partir del diagnóstico. Este análisis permitió identificar los cuellos de botella y las ineficiencias en el sistema, revelando cómo las diferentes variables impactan en los tiempos de espera de los camiones. El modelo de simulación facilitó una evaluación precisa del comportamiento del sistema en diferentes escenarios, lo cual es crucial para la formulación de estrategias de mejora.

Finalmente, se presentaron dos propuestas de mejora basadas en los resultados del modelo de simulación y se compararon para determinar la más efectiva. Ambas propuestas están orientadas a reducir los tiempos de espera y aumentar la eficiencia del flujo de camiones. La primera propuesta, que consiste en la implementación de 2 básculas y 2 máquinas, redujo significativamente el tiempo total promedio en el sistema a 109.51 minutos y el tiempo promedio de espera en la cola a 3.38 minutos. Además, disminuyó el promedio de camiones en el sistema y en la cola, aumentando el número de camiones que salen del sistema a 57.

La segunda propuesta, que implica la implementación de 2 básculas y 1 máquina, mostró mejoras respecto a la situación actual, con un tiempo total promedio en el sistema de 129.68 minutos y un tiempo promedio de espera en la cola de 4.18 minutos, aumentando el número de camiones que salen del sistema a 54. Comparando ambas propuestas, se determinó que la primera

es la más efectiva para reducir los tiempos de espera, mejorar la eficiencia del flujo de camiones y la reducción de riesgos, contribuyendo significativamente a la optimización del proceso logístico.

## **10.2. Perspectivas de futuro**

En cuanto a las perspectivas de futuro y recomendaciones para investigaciones posteriores en la temática de optimización de los tiempos de espera de la flota de camiones en la mina El Limón, se sugieren las siguientes acciones:

- 1) **Ampliación del Estudio:** Se recomienda ampliar el alcance de la investigación para incluir un análisis más detallado de otros procesos logísticos dentro de la mina que puedan beneficiarse de estrategias de optimización similares. Esto permitirá una visión integral de la gestión logística en la mina y potenciales áreas de mejora adicionales.
- 2) **Análisis de Impacto Económico:** Realizar estudios que evalúen el impacto económico de la implementación de las estrategias de optimización propuestas. Esto permitirá cuantificar los beneficios financieros derivados de la reducción de tiempos de espera y la mejora en la eficiencia operativa.
- 3) **Colaboración Interdisciplinaria:** Fomentar la colaboración interdisciplinaria con expertos en áreas como ingeniería de sistemas, logística y tecnología de la información para enriquecer el enfoque de optimización y desarrollar soluciones más integrales y efectivas.
- 4) **Estudio de Sostenibilidad:** Considerar la sostenibilidad ambiental en las estrategias de optimización, evaluando cómo reducir los tiempos de espera de los camiones puede contribuir a la disminución de emisiones de carbono y al uso más eficiente de los recursos naturales.

- 5) Validación en Otros Contextos: Extender la investigación a otras minas o industrias con operaciones logísticas similares para validar la efectividad de las estrategias de optimización propuestas en diferentes entornos y contextos operativos.

Estas recomendaciones buscan enriquecer y ampliar el conocimiento en el campo de la optimización logística minera, brindando nuevas perspectivas y oportunidades para seguir mejorando la eficiencia y la productividad en este sector.

## 11. Referencias

- Andrea Calvo, E., & Sierra Fernández, C. (2017). *Técnicas de mantenimiento en instalaciones mineras*. OCW - Universidad de Cantabria. Obtenido de Mayo 29, 2024, de [https://ocw.unican.es/pluginfile.php/2522/course/section/2616/Mantenimiento\\_7.pdf](https://ocw.unican.es/pluginfile.php/2522/course/section/2616/Mantenimiento_7.pdf)
- Arias, F. G. (2012). *El Proyecto de Investigación. Introducción a la metodología científica* (6th ed.). Episteme. Caracas, República Bolivariana de Venezuela.
- Automatización minera: Optimizando los recursos. (2017, Noviembre 20). *Rumbo Minero Internacional*. Obtenido de Mayo 29, 2024, de <https://www.rumbominero.com/revista/informes/automatizacion-minera-optimizando-los-recursos/>
- Bustamante Chávez, J. E. (2018). Optimización de la productividad de los equipos de carguío y acarreo en Gold Fields La Cima SA mediante la disminución de las demoras operativas más significativas.
- Calibre Mining Corp. (2023). Calibre Mining Corp. | Home. Obtenido de Mayo 28, 2024, de <https://www.calibremining.com/>
- Cochachi, M. A. (2024, Abril 30). 8 Puntos Claves para Resolver Cuellos de Botella en Minería. LinkedIn. Obtenido de Mayo 29, 2024, de <https://www.linkedin.com/pulse/8-puntos-claves-para-resolver-cuellos-de-botella-en-cochachi-h-oamle>
- Conexión Esan. (2016, Agosto 01). Minería: mayor producción generará cuellos de botella y costos más altos. Esan. Obtenido de Mayo 29, 2024, de <https://www.esan.edu.pe/conexion-esan/mineria-mayor-produccion-generara-cuellos-de-botella-y-costos-mas-altos>

COTRANSA GROUP. (2024). Cuellos de botella: qué son y cuál es su origen. COTRANSA GROUP. Obtenido de Mayo 29, 2024, de <https://cotransagroup.com/cuellos-de-botella-que-son-y-cual-es-su-origen/>

FONDEF. (2006, Diciembre 13). Optimización De La Planificación Estratégica En Empresas Mineras. CONICYT. Obtenido de Mayo 29, 2024, de <https://www.conicyt.cl/fondef/2006/12/13/optimizacion-de-la-planificacion-estrategica-en-empresas-mineras/>

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). Metodología de la investigación (P. Baptista Lucio, Ed.; 6th ed.). McGraw-Hill Education. México D.F.

Hexagon. (2024). Gestión de flotas de minas. Hexagon. Obtenido de Mayo 29, 2024, de <https://hexagon.com/es/solutions/mine-fleet-management>

Hidalgo Sánchez, T. E. (2017). Análisis Comparativo De Software Para Simulación En Minería Subterránea. Repositorio UCHILE. Obtenido de Mayo 29, 2024, de <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/146287/An%C3%A1lisis-Comparativo-de-Software-para-Simulaci%C3%B3n-en-Miner%C3%ADa-Subterr%C3%A1nea-.pdf?sequence=1>

Instituto ESSS. (2023). Simulación para la industria minera y siderúrgica. ESSS. Obtenido de Mayo 29, 2024, de <https://www.esss.com/es/industria-minera-siderurgica/>

Instituto ESSS. (2023, Mayo 6). Cómo la industria minera puede mejorar su eficiencia usando herramientas de simulación. ESSS. Obtenido de Mayo 29, 2024, de <https://www.esss.com/es/blog/como-la-industria-minera-puede-mejorar-su-eficiencia-usando-herramientas-de-simulacion/>

Kelton, W. D., Sadowski, R. P., & Supick, N. B. (2015). Simulation with Arena (6ª ed.). McGraw-Hill.

Leon Flores, E. F. (2021). Propuesta de implementación del proyecto: transición de “Dumper a volquete” en una mina subterránea con análisis de costo y simulación de riesgo. Pontificia Universidad Católica del Perú.

Ludeña, J. A. (2021, Mayo 1). Teoría de colas - Qué es, definición y concepto. Economipedia. Obtenido de Mayo 29, 2024, de <https://economipedia.com/definiciones/teoria-de-colas.html>

Manrique Córdova, J. L. (2021). Evaluación de los equipos de carguío y transporte para el incremento de la productividad. Aplicando la teoría de colas en la unidad minera San Cristóbal Junín. Universidad Nacional De San Antonio Abad Del Cusco. [https://repositorio.unsaac.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12918/6134/253T20210313\\_TC.pdf?isAllowed=y&sequence=1](https://repositorio.unsaac.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12918/6134/253T20210313_TC.pdf?isAllowed=y&sequence=1)

Meza Castro, J. E. (2011). Desarrollo de un modelo para la aplicación de simulación a un sistema de carguío y acarreo de desmonte en una operación minera a tajo abierto. Pontificia Universidad Católica del Perú.

Morales Pulcha, M. A. (2019). Modelamiento y Simulación del Minado y Re manipulación de Mineral en Una Mina a Tajo Abierto. Universidad Católica de Santa María. <https://core.ac.uk/download/pdf/233005378.pdf>

Movimiento de tierras. (s.f.). Archivo Digital UPM. Obtenido de Mayo 29, 2024, de [https://oa.upm.es/67524/1/movimiento\\_tierras.pdf](https://oa.upm.es/67524/1/movimiento_tierras.pdf)

Optimización de procesos para la minería. (2024). Metso. Obtenido de Mayo 29, 2024, de

<https://www.metso.com/es/productos-y-servicios/servicios/optimizacion-de-procesos-y-servicios-conectados/optimizacion-de-procesos-para-la-mineria/>

Orellana, F. I. (2018). Modelo integrado de simulación y optimización. Repositorio UCHILE.

Obtenido de Mayo 29, 2024, de

<https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/151868/Modelo-integrado-de-simulacion-y-optimizacion-para-planes-mineros-de-mediano-plazo-en-mineria-a-cielo-abierto.pdf?isAllowed=y&sequence=1>

Peña Alva, D. A. (2019). Análisis para la selección y reemplazo de volquetes de 25 m<sup>3</sup> de

capacidad para la optimización del acarreo y transporte en la operación minera - mina los Andes Perú Gold - Huamachuco. Universidad Nacional de Trujillo.

Rockwell Automation. (2023). Arena Simulation Software | Arena Simulation Software. Rockwell

Automation. Obtenido de Mayo 29, 2024, de <https://www.rockwellautomation.com/es-co/products/software/arena-simulation.html>

Streefkerk, R. (2020, Noviembre 6). APA Formatting and Citation (7th Ed.) | Generator, Template,

Examples. Scribbr. Obtenido de Mayo 29, 2024, de <https://www.scribbr.com/apa-style/format/>

SYDLE. (2024, Mayo 13). Cuellos de botella en la producción: ¿cómo identificarlos y eliminarlos?

sydle. Obtenido de Mayo 29, 2024, de <https://www.sydle.com/es/blog/cuellos-de-botella-en-la-produccion-61aa121f5448461cf9143d8d>

Universidad Privada del Norte. (2016, Noviembre 14). ¿Qué es un cuello de botella en el proceso

de producción? Blogs UPN. Obtenido de Mayo 29, 2024, de

<https://blogs.upn.edu.pe/ingenieria/2016/11/14/que-es-un-cuello-de-botella-en-el-proceso-de-produccion/>



## 12. Anexos

### Tablas Muestras estratificadas por proceso

- Muestras Parqueo

No. Muestras	No. Registro	Duración (minutos)
1	2134	51
2	3225	3
3	4451	97
4	3415	4
5	3372	33
6	5804	7
7	4584	8
8	2165	65
9	2887	14
10	4211	69
11	4389	49
12	7341	4
13	2024	5
14	5286	3
15	2581	25
16	646	56
17	4545	4
18	2679	9

19	678	14
20	1308	3
21	434	16
22	1027	63
23	7156	9
24	4419	12
25	5030	11
26	5937	7
27	7051	104
28	4382	36
29	4105	111
30	6185	45
31	122	21
32	6264	5
33	5312	8
34	2095	8
35	5667	87
36	145	74
37	2818	70
38	79	82
39	6149	2
40	3719	11

41	4800	8
42	6863	11
43	6273	1
44	5317	130
45	6731	7
46	1505	3
47	5059	11
48	4405	121
49	2865	7
50	3324	35
51	2334	5
52	3377	17
55	3344	14
56	5180	10
57	5600	7
58	2447	11
59	3748	4
60	5493	47
61	338	44
62	450	4
63	4551	6
64	5614	118

65	4138	67
66	5723	47
67	1641	6
68	2361	26
69	2841	100
70	1558	12
71	5304	5
72	7343	131
73	7280	26
74	2191	6
75	6381	5
76	2077	3
77	6167	1
78	4617	36
79	4544	7
80	4122	7
81	1764	8
82	802	112
83	1043	18
84	3622	63
85	1186	66
86	7348	130

87	2881	50
88	780	57
89	2274	82
90	1800	117
91	7148	58
92	354	7
93	4604	9
94	1791	8
95	4945	10
96	4555	26
97	4748	8
98	5868	110
99	3715	11
100	2658	11
101	1357	3
102	7341	4
103	4137	14
104	3842	85
105	1871	24
106	2447	11
107	6062	149
108	1900	6

109	309	67
110	1746	109
111	3714	6
112	6184	24
113	3586	52
114	5809	96
115	2231	80
116	490	9
117	5767	36
119	5491	45
120	3591	6
121	981	44
123	7359	19
126	1087	123
127	4581	3
128	4212	91
129	6602	4
130	4240	52
131	3091	2
132	4283	10
133	6066	44
134	6453	59

135	7420	4
136	1252	69
137	4883	54
138	5673	52
139	4794	106
140	2790	21

- Muestras Báscula

No. Muestras	No. Registro	Duración(minutos)
1	318	4
2	4	4
3	8775	13
4	6158	6
5	5634	8
6	1253	8
7	752	7
8	2348	8
9	4658	5
10	3478	6
11	7108	8
12	872	6
13	5636	7
14	878	3
15	7499	7
16	8777	9
17	4155	4
18	5288	6
19	4052	7
20	911	3
21	208	5
22	8316	9
23	5622	5
24	2802	5
25	5586	6
26	7945	4
27	4154	8
28	5427	4
29	3659	4
30	4024	3
31	907	6
32	4933	7
33	1453	12
34	3913	8



35	2965	5
36	7150	6
37	5982	4
38	8576	7
39	3633	4
40	7906	1
41	4220	9
42	21	25
43	8241	5
44	8086	4
45	1255	7
46	7413	7
47	300	8
48	2630	9
49	7520	3
50	8770	5
51	2768	6
52	4593	2
53	8601	10
54	547	5
55	7376	6
56	3915	6
57	8296	8
58	590	6
59	7790	1
60	959	6
61	2729	7
62	7731	5
63	6710	5
64	7174	10
65	3550	10
66	216	6
67	7759	8
68	6051	11
69	2586	4
70	4257	11
71	591	7

72	5308	5
73	2193	11
74	5310	4
75	6619	6
76	5414	5
77	8197	5
78	5024	9
79	8341	12
80	1450	9
81	5743	15
82	3936	8
83	7510	7
84	1337	4
85	3067	4
86	587	6
87	6556	6
88	8816	7
89	2796	4
90	4857	6
91	3652	6
92	2021	7
93	1481	6
94	2896	4
95	4266	13
96	4476	3
97	6669	5
98	5730	3
99	8122	9
100	3411	7
101	6514	8
102	6776	5
103	1450	9
104	1865	5
105	7612	9
106	4505	4
107	1173	4
108	570	8

109	4940	9
110	4700	5
111	8830	7
112	8583	6
113	6904	8
114	1356	4
115	5231	12
116	5425	4
117	2817	5
118	7767	5
119	6452	5
120	3161	5
121	8704	11
122	3003	8
123	1569	42
124	5401	6
125	964	2
126	1286	8
127	5602	5
128	4383	4
129	7918	11
130	7896	5
131	1155	5
132	4414	6
133	7568	8
134	5920	5
135	7023	10
136	6400	7
137	5687	3
138	6383	4
139	5918	7
140	5115	4
141	496	4
142	8150	4
143	6642	4

- Muestras Tramo 1

No. Muestras	No. Registro	Duración(minutos)
1	1841	1
2	255	1
3	2179	1
4	1606	12
5	383	1
6	325	7
7	2009	7
8	329	14
9	844	1
10	1878	1
11	183	18
12	33	7
13	1530	1
14	492	24
15	2171	6
16	440	1
17	2041	6
18	1397	11
19	2801	27
20	952	12
21	1048	1
22	2761	39
23	2191	7
24	48	4
25	280	17
26	1255	1
27	491	1
28	196	7
29	2864	2
30	1323	19
31	239	1
32	2026	1
33	1014	9
34	2218	9
35	845	7

36	698	7
37	2294	1
38	522	7
39	2839	16
40	1672	26
41	1808	13
42	19	11
43	1187	1
44	823	8
45	2374	3
46	163	1
47	304	18

- Muestras Tramo 2

No. Muestras	No. Registro	Duración(minutos)
1	1486	13
2	820	7
3	932	10
4	979	8
5	637	20
6	789	7
7	343	9
8	184	13
9	31	13
10	458	4
11	1013	16
12	287	20
13	1362	9
14	931	7
15	712	23
16	852	10
17	155	15
18	30	15
19	1476	26
20	731	13
21	1069	12
22	413	15
23	983	10
24	394	13
25	849	8
26	1527	30

- Muestras Garita Sur

No. Muestras	No. Registro	Duración(minutos)
1	209	19
2	444	16
3	126	17
4	1174	5
5	829	5
6	1218	7
7	685	6
8	1151	16
9	487	11
10	408	20
11	888	6
12	241	11
13	191	12
14	945	6
15	864	7
16	1255	6
17	1203	5
18	775	13
19	764	13
20	721	10
21	881	7
22	145	8



Capturas tomadas desde las cámaras de los GPS de los camiones  
Ubicación: Parqueo mina El Limón León  
Fuente: Centro de monitoreo de logística terrestre de Calibre Mining Corp.





Imágenes aéreas del parqueo  
Ubicación: Parqueo mina El Limón León  
Fuente: Centro de monitoreo de logística terrestre de Calibre Mining Corp.



Capturas tomadas de las cámaras de seguridad  
Ubicación: Báscula mina El Limón León  
Fuente: Centro de monitoreo de logística terrestre de Calibre Mining Corp.



**Riesgo de colisión vehicular al realizar maniobra de reversa.**



**Riesgo de atropellamiento o atrapamiento de personas cuando sale un camión.**



**Riesgo de atropellamiento de personas que hacen reparaciones imprevistas**

Imágenes de los riesgos

Ubicación: Parqueo mina El Limón - León

Fuente: Centro de monitoreo de logística terrestre de Calibre Mining Corp.

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS DE PUBLICACIÓN

Nosotros, Maryann de los Ángeles Blandón Cáceres con cédula de identidad 081-310801-1001L, Cesia Jemima Espinoza Hernández con cédula de identidad 001-191099-1064S, y Frederick Sebastian Kauffman Jirón con cédula de identidad 001-250303-1044K, egresados del programa académico de Grado, Licenciatura en ingeniería industrial declaramos que:


El contenido del presente documento es un reflejo de nuestro trabajo personal, y toda la información que se presenta está libre de derechos de autor, por lo que, ante cualquier notificación de plagio, copia o falta a la fuente original, nos hacemos responsables de cualquier litigio o reclamación relacionada con derechos de propiedad intelectual, exonerando de toda responsabilidad a la Universidad Católica Redemptoris Mater (UNICA).

Así mismo, autorizamos a UNICA por este medio, publicar la versión aprobada de nuestro trabajo de investigación, bajo el título Propuesta de optimización para la reducción de los tiempos de espera de la flota de camiones de acarreo de mineral en el parqueo de la mina El Limón mediante simulación computacional, durante el primer trimestre del 2024 en el campus virtual y en otros espacios de divulgación, bajo la licencia Atribución-No Comercial-Sin derivados, irrevocable y universal para autorizar los depósitos y difundir los contenidos de forma libre e inmediata.

Todo esto lo hacemos desde nuestra libertad y deseo de contribuir a aumentar la producción científica. Para constancia de lo expuesto anteriormente, se firma la presente declaración en la ciudad de Managua, Nicaragua a los 27 días del mes julio de 2024.

Atentamente,

Firma:   
Maryann de los Ángeles Blandón Cáceres  
mblandon15@unica.edu.ni

Firma:   
Cesia Jemima Espinoza Hernández  
cespinoza7@unica.edu.ni

Firma:   
Frederick Sebastian Kauffman Jirón  
fkauffman@unica.edu.ni