

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Industrial

Trabajo de Suficiencia Profesional

Diseño de proyecto de optimización de la identificación de camiones mineros mediante pintura fotoluminiscente en mina a tajo abierto: Un enfoque de seguridad y eficiencia operativa

Jose Alberto Junco Grimaldos

Para optar el Título Profesional de
Ingeniero Industrial

Arequipa, 2025

Repositorio Institucional Continental
Trabajo de suficiencia profesional



Esta obra está bajo una Licencia "Creative Commons Atribución 4.0 Internacional" .

**INFORME DE CONFORMIDAD DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE
INVESTIGACIÓN**

A : Decano de la Facultad de Ingeniería
DE : Julio Cesar Alvarez Barreda
Asesor de trabajo de investigación
ASUNTO : Remito resultado de evaluación de originalidad de trabajo de investigación
FECHA : 14 de Setiembre de 2025

Con sumo agrado me dirijo a vuestro despacho para informar que, en mi condición de asesor del trabajo de investigación:

Título:
Diseño de proyecto de optimización de la identificación de camiones mineros mediante pintura Fotoluminiscente en mina a tajo abierto: Un enfoque de seguridad y eficiencia operativa

Autor:

1. Jose Alberto Junco Grimaldos – EAP. Ingeniería Industrial

Se procedió con la carga del documento a la plataforma "Turnitin" y se realizó la verificación completa de las coincidencias resaltadas por el software dando por resultado 12 % de similitud sin encontrarse hallazgos relacionados a plagio. Se utilizaron los siguientes filtros:

- | | | |
|--|--|--|
| • Filtro de exclusión de bibliografía | SI ☒ | NO ☐ |
| • Filtro de exclusión de grupos de palabras menores
Nº de palabras excluidas (en caso de elegir "SI"): palabras | SI ☐ | NO ☒ |
| • Exclusión de fuente por trabajo anterior del mismo estudiante | SI ☐ | NO ☒ |

En consecuencia, se determina que el trabajo de investigación constituye un documento original al presentar similitud de otros autores (citas) por debajo del porcentaje establecido por la Universidad Continental.

Recae toda responsabilidad del contenido del trabajo de investigación sobre el autor y asesor, en concordancia a los principios expresados en el Reglamento del Registro Nacional de Trabajos conducentes a Grados y Títulos – RENATI y en la normativa de la Universidad Continental.

Atentamente,

La firma del asesor obra en el archivo original (no se muestra en
este documento por estar expuesto a publicación

ASESOR

Mg. Julio César Álvarez Barreda

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mis padres, Jose Manuel y Mery Gladis, por su apoyo incondicional a lo largo de mi vida académica y personal. Su ejemplo de esfuerzo y dedicación ha sido mi mayor inspiración para alcanzar este logro.

A mi amada esposa, Brenda, gracias por ser mi pilar durante este proceso. Tu paciencia, comprensión y motivación fueron fundamentales para superar los momentos más desafiantes. Este logro es tan tuyo como mío.

A mi querida hija, Valentina, eres mi mayor motivación. Tu amor y alegría me impulsaron a seguir adelante, incluso en los momentos más difíciles. Espero que este logro te inspire a perseguir tus sueños con la misma determinación.

Agradezco especialmente a mi asesor de trabajo de suficiencia profesional, Mg. Julio César Álvarez Barreda, por su guía, paciencia y valiosos aportes durante todo el proceso de investigación. Su experiencia y dedicación fueron clave para el éxito de este trabajo.

Finalmente, a todos aquellos que, de una u otra forma, contribuyeron a la realización de este trabajo, les expreso mi más sincero agradecimiento. Este logro es el resultado de un esfuerzo colectivo, y les estaré eternamente agradecido.

DEDICATORIA

A mis padres, Jose Manuel y Mery Gladis, por ser mi ejemplo de esfuerzo y dedicación. Su amor incondicional y sus enseñanzas han sido la base sobre la cual he construido este logro.

A mi esposa, Brenda, por ser mi compañera en cada paso de este camino. Tu paciencia, apoyo y motivación han sido mi fortaleza en los momentos más desafiantes.

A mi hija, Valentina, por ser mi mayor inspiración. Tu sonrisa y tu amor me impulsaron a seguir adelante y a convertir este sueño en realidad.

Este trabajo es para ustedes, con todo mi cariño y gratitud.

ÍNDICE

ASESOR	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
DEDICATORIA	iv
ÍNDICE	v
ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
RESUMEN	xii
EXECUTIVE SUMMARY.....	xiii
INTRODUCCIÓN	xiv
CAPÍTULO I	1
ASPECTOS GENERALES DE LA EMPRESA	1
1.1 Datos generales de la empresa.....	1
1.2 Actividades principales de la empresa.....	1
1.3 Reseña histórica de la empresa	2
1.4 Organigrama de la empresa	3
1.5 Visión y misión	1
1.5.1 Visión:.....	1
1.5.2 Misión	1
1.6 Bases legales o documentos administrativos	1
1.7 Descripción del área donde realiza sus actividades profesionales	2
1.7.1 Importancia del Área de Mantenimiento Mina Acarreo	2
1.7.2 Actividades clave del área	2
1.8 Descripción del cargo y de las responsabilidades del bachiller en la empresa	3
1.8.1 Optimización de procesos operativos	4
1.8.2 Reducción de desperdicios	4
1.8.3 Gestión del mantenimiento preventivo y correctivo	4
1.8.4 Gestión logística y control de recursos	4

1.8.5	Supervisión e implementación tecnológica.....	5
1.8.6	Gestión de calidad y seguridad operativa	5
1.8.7	Capacitación y desarrollo del personal técnico	5
1.8.8	Análisis económico y gestión presupuestaria	6
CAPÍTULO II.....		7
ASPECTOS GENERALES DE LAS ACTIVIDADES PROFESIONALES		7
2.1	Antecedentes del diagnóstico situacional	7
2.1.1	Contexto operativo de empresa minera del sur peruano	7
2.2	Identificación de oportunidad o necesidad	7
2.2.1	Brechas detectadas	7
2.3	Objetivos de la actividad profesional	8
2.3.1	Objetivos específicos.....	8
2.4	Justificación de la actividad profesional	8
2.4.1	Impacto estratégico.....	8
2.5	Resultados esperados.....	9
2.5.1	Indicadores de éxito.....	9
2.5.2	Impacto a largo plazo	10
CAPÍTULO III.....		11
MARCO TEÓRICO.....		11
3.1	Minas a tajo abierto: características, operatividad y desafíos	11
3.1.1	Minas a tajo abierto: definición, contexto histórico y aplicación global	11
3.1.2	Impactos ambientales y estrategias de mitigación	12
3.1.3	Marco normativo y regulaciones ambientales en minas a tajo abierto	15
3.1.4	Normativas internacionales aplicables.....	16
3.1.5	Retos normativos y perspectivas futuras.....	17
3.2	Mantenimiento de flotas de camiones en minas a tajo abierto	17
3.2.1	Importancia del mantenimiento en camiones mineros	17
3.2.2	Estrategias clave para el mantenimiento	18
3.2.3	Retos operativos en el mantenimiento minero	19

3.3	Optimización de la identificación de camiones mineros mediante pintura fotoluminiscente.....	19
3.3.1	Problemática de la identificación en minas a tajo abierto	20
3.3.2	Fundamentación técnica	20
3.3.3	Solución propuesta: pintura fotoluminiscente.....	21
3.3.4	Impacto en seguridad operativa	22
3.3.5	Mejora de eficiencia logística.....	23
3.3.6	Sustentabilidad y costo-beneficio	23
3.3.7	Caso de estudio: aplicación en mina cuprífera.....	25
3.3.8	Integración tecnológica y avances complementarios	25
3.3.9	Desafíos técnicos y soluciones propuestas	25
3.3.10	Contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)	26
CAPÍTULO IV		27
DESCRIPCIÓN DE LAS ACTIVIDADES PROFESIONALES		27
4.1	Enfoque, alcance y entregables	27
4.1.1	Enfoque de las actividades profesionales	27
4.1.2	Metodología aplicada:	27
4.1.3	Alcance de las actividades profesionales	28
4.1.4	Entregables de las actividades profesionales	28
4.2	Aspectos técnicos de la actividad profesional	29
4.2.1	Metodologías.....	29
4.2.2	Técnicas	30
4.2.3	Instrumentos	31
4.2.4	Equipos y materiales	31
4.3	Ejecución de las actividades profesionales	32
4.3.1	Metodologías cronograma de actividades realizadas (Diagrama de Gantt).....	32
4.3.2	Proceso y secuencia operativa	33
4.3.3	Recursos y costos	35
4.4	Análisis de costos y beneficios del proyecto	35

4.4.1	Metodología de estimación de costos	35
4.4.2	Análisis Costo-Beneficio (ACB)	38
	117,151.65	40
	-65,084.25	40
4.4.3	4.4.4. Indicadores Financieros Clave	41
CAPÍTULO V		43
RESULTADOS FINALES DE LAS ACTIVIDADES REALIZADAS		43
5.1	Resultados finales de las actividades realizadas	43
5.1.1	Mejora en eficiencia operativa.....	43
5.1.2	Impacto en seguridad y reducción de costos.....	43
5.1.3	Durabilidad y sostenibilidad del recubrimiento	43
5.1.4	Proyecciones económicas y riesgo	44
5.2	Logros Alcanzados	44
5.2.1	Implementación tecnológica exitosa.....	44
5.2.2	Certificaciones y cumplimiento normativo.....	44
5.2.3	Mejora en eficiencia operativa.....	45
5.2.4	Impacto económico y rentabilidad.....	45
5.2.5	Reconocimiento social y ambiental	45
5.3	Dificultades encontradas	45
5.3.1	Condiciones climáticas adversas	46
5.3.2	Resistencia al cambio tecnológico.....	46
5.3.3	Limitaciones en la cadena de suministro	46
5.3.4	Compatibilidad tecnológica	46
5.4	Planteamiento de mejoras.....	47
5.4.1	Propuestas de optimización	47
5.4.2	Descripción de la implementación.....	47
5.5	Análisis del proyecto	48
5.5.1	Fundamentos científicos de la luminiscencia.....	48
5.5.2	Integración técnica con sistemas mineros.....	49

5.5.3	Optimización de procesos mediante Ingeniería Industrial	49
5.5.4	Impacto económico y ambiental	49
5.5.5	Seguridad y escalabilidad	49
5.6	Aporte del bachiller en la empresa	50
5.6.1	Optimización de procesos mediante herramientas industriales	50
5.6.2	Gestión predictiva y uso de tecnologías IoT	50
5.6.3	Implementación de soluciones sostenibles	50
5.6.4	Capacitación y gestión del cambio	51
5.6.5	Análisis económico y viabilidad financiera	51
5.6.6	Contribución a la seguridad operativa	51
CONCLUSIONES		52
RECOMENDACIONES		54
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		56
ANEXOS		64

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Indicadores de éxito.	9
Tabla 2.	Comparación entre sistemas de identificación visual.	20
Tabla 3.	Impacto en productividad (5 camiones piloto).	23
Tabla 4.	Valor por incidente.	24
Tabla 5.	Sinergias tecnológicas y su impacto.	25
Tabla 6.	Resistencia del sistema en condiciones extremas.	26
Tabla 7.	Matriz de alcance vs. exclusiones.	28
Tabla 8.	Checklist de inspección previa.	30
Tabla 9.	Matriz de instrumentos de recolección de datos.	31
Tabla 10.	Materiales de aplicación.	32
Tabla 11.	Diagrama de Gantt para la ejecución del proyecto (16 semanas).	32
Tabla 12.	Presupuesto de ejecución (S/).	35
Tabla 13.	Materiales utilizados (S/).	36
Tabla 14.	Mano de obra	36
Tabla 15.	Equipos y herramientas.	37
Tabla 16.	Detalles de costos indirectos.	37
Tabla 17.	Presupuesto total del proyecto.	38
Tabla 18.	Presupuesto total del proyecto.	38
Tabla 19.	Justificación del porcentaje de reducción de incidentes.	39
Tabla 20.	Flujo de caja para 5 camiones (5 años).	40

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Organigrama Empresa Minera del Sur Peruano.	1
Figura 2.	Daño en material de identificación.	9
Figura 3.	Imagen referencial de aplicación de pintura fotoluminiscente.	22
Figura 4.	Simulación de la identificación con pintura fotoluminiscente.	23
Figura 5.	Proceso DMAIC aplicado al proyecto.	27
Figura 6.	Estructura del plan de mantenimiento.	29
Figura 7.	Ishikawa identificación de causas raíz en fallos de adherencia.	31
Figura 8.	Identificación de rutas críticas.	33

RESUMEN

El presente proyecto aborda el diseño e implementación de un sistema optimizado para la identificación de camiones mineros en una mina a tajo abierto del sur del Perú, empleando pintura fotoluminiscente como solución innovadora para incrementar la seguridad y la eficiencia operativa. El diagnóstico situacional reveló que la identificación manual de camiones en condiciones de baja visibilidad genera demoras logísticas y eleva el riesgo de accidentes, afectando la productividad y la seguridad en la operación minera.

El objetivo principal es reducir los tiempos de identificación y los incidentes operativos mediante la aplicación de pintura fotoluminiscente basada en aluminato de estroncio ($\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$), capaz de proporcionar visibilidad autónoma hasta por 10 horas después de la carga lumínica, incluso en ambientes de polvo y oscuridad. El proyecto contempla el desarrollo de protocolos de aplicación, integración con tecnologías de monitoreo como sensores IoT y drones LiDAR, y la capacitación del personal técnico para asegurar la correcta implementación y mantenimiento del sistema.

La metodología empleada incluyó una fase piloto con cinco camiones CAT 793D, donde se aplicaron técnicas de análisis de métodos y tiempos, simulaciones logísticas y estudios de costo-beneficio. Los resultados demostraron una reducción del tiempo de identificación de 45 a 18 segundos, una disminución del 30% en la tasa de accidentes nocturnos y un ahorro anual de S/15,200 por camión en costos de mantenimiento. El análisis económico proyecta un retorno sobre la inversión (ROI) del 80% en cinco años, validando la rentabilidad y viabilidad de escalar el sistema a toda la flota minera.

El proyecto también contribuye a la reducción de emisiones de CO_2 y al cumplimiento de estándares internacionales de seguridad y gestión ambiental, como ISO 14001 e ISO 45001. Se concluye que la implementación de la pintura fotoluminiscente no solo optimiza la gestión logística y reduce los riesgos operativos, sino que también posiciona a la empresa minera como referente en innovación, sostenibilidad y responsabilidad social en el sector minero peruano. Se recomienda la expansión del sistema a toda la flota y la integración continua de tecnologías digitales para maximizar los beneficios obtenidos.

Palabras clave: pintura fotoluminiscente, identificación camiones mineros; mina a tajo abierto; seguridad operativa, eficiencia logística, mantenimiento predictivo, aluminato de estroncio, sensores IoT, drones LiDAR.

EXECUTIVE SUMMARY

This project addresses the design and implementation of an optimized system for mining truck identification at an open-pit mine in southern Peru, using photoluminescent paint as an innovative solution to increase safety and operational efficiency. The situational assessment revealed that manual truck identification in low-visibility conditions generates logistical delays and increases the risk of accidents, impacting productivity and safety in the mining operation.

The main objective is to reduce identification times and operational incidents by applying photoluminescent paint based on strontium aluminate ($\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$), capable of providing autonomous visibility for up to 10 hours after light loading, even in dusty and dark environments. The project includes the development of application protocols, integration with monitoring technologies such as IoT sensors and LiDAR drones, and training of technical personnel to ensure proper implementation and maintenance of the system. The methodology employed included a pilot phase with five CAT 793D trucks, where method and time analysis techniques, logistics simulations, and cost-benefit studies were applied. The results demonstrated a reduction in identification time from 45 to 18 seconds, a 30% decrease in the nighttime accident rate, and annual savings of S/15,200 per truck in maintenance costs. The economic analysis projects a return on investment (ROI) of 80% over five years, validating the profitability and feasibility of scaling the system to the entire mining fleet.

The project also contributes to the reduction of CO₂ emissions and compliance with international safety and environmental management standards, such as ISO 14001 and ISO 45001. It is concluded that the implementation of photoluminescent paint not only optimizes logistics management and reduces operational risks, but also positions the mining company as a benchmark in innovation, sustainability, and social responsibility in the Peruvian mining sector. Expansion of the system to the entire fleet and the continued integration of digital technologies are recommended to maximize the benefits achieved.

Keywords: photoluminescent paint, mining truck identification; open-pit mine; operational safety, logistics efficiency, predictive maintenance, strontium aluminate, IoT sensors, LiDAR drones.

INTRODUCCIÓN

La minería a tajo abierto constituye uno de los cimientos del desarrollo económico de Perú. Así, la región sur, donde la extracción y procesamiento de cobre, y el molibdeno ha llevado a la industria minera a ser un actor de relevancia en el ámbito global, tiene una gran participación en el Producto Interno Bruto, y continuará su impacto económico en los próximos años. En este sentido, la eficiencia y la seguridad en la operación son factores clave que determinan la rentabilidad y el desarrollo sostenible de la industria. Para que ello suceda, el manejo moderno de flotas de camiones mineros impacta en la integración de tecnologías innovadoras y en metodologías de ingeniería industrial que permitan optimizar los procesos logísticos, disminuir riesgos y minimizar los gastos asociados a la reparación y la operación de equipos de gran tamaño.

Este reporte presenta un proyecto de desarrollo en una mina a tajo abierto del sur peruano, donde se busca aumentar la eficiencia en el transporte e identificación de camiones mineros. La propuesta radica en la utilización de un sistema de pintura fotoluminiscente, que active la luminiscencia natural de un aluminato de estroncio, combinado con capas cerámicas de alta resistencia y la investigación de los protocolos de mantenimiento preventivo y de monitoreo automatizado por IoT, utilizando drones LiDAR. A su vez, el proyecto contempla el estudio de normas y regulaciones vinculadas al impacto en el medio ambiente y al manejo de riesgos y calidad, siguiendo regulaciones nacionales e internacionales como ISO 14001 e ISO 45001.

Por otro lado, se incluye el componente social y económico de la disminución de accidentes y la mejora en la percepción de seguridad de los empleados y la población aledaña. Por lo tanto, este proyecto pretende probar que la aplicación innovadora de la tecnología mediante un enfoque responsable puede cambiar drásticamente la industria, beneficiando tanto a la empresa como a la sociedad.

CAPÍTULO I

ASPECTOS GENERALES DE LA EMPRESA

1.1 Datos generales de la empresa

- Nombre: Empresa minera a tajo abierto del sur peruano.
- Actividad principal: explotación y procesamiento de minerales de cobre y molibdeno.
- Ubicación: Arequipa, Perú. La empresa opera en la región sur del Perú, en la provincia de Arequipa distrito de Uchumayo, Perú; a aproximadamente 30 km al suroeste de la ciudad de Arequipa localizada a 2,600 metros sobre el nivel del mar. Esta ubicación estratégica le permite aprovechar los recursos minerales de la zona, lo que contribuye significativamente al PBI regional y nacional. Dado que, están ubicados en la proximidad de la ciudad, también tienen una importante responsabilidad social con las comunidades aledañas.
- Número de empleados: directa e indirectamente, genera 5,300 empleos directos y cerca de 5,000 contratistas en sus operaciones, consolidándose como el mayor empleador minero de Arequipa; en total, más de 60,000 personas se benefician directa o indirectamente de sus actividades, considerando trabajadores, contratistas, proveedores y sus familias.

1.2 Actividades principales de la empresa

Las actividades principales de la institución implican las siguientes:

- Exploración: se refiere a la identificación y evaluación de nuevos yacimientos de cobre y molibdeno dentro de la concesión minera de la empresa. Esta actividad incluye estudios geológicos, geoquímicos y geofísicos para determinar si es económicamente viable extraer el mineral.
- Explotación: extraer el mineral de cobre y molibdeno usando métodos de tajo abierto. Por ser una empresa minera a gran escala, la empresa remueve grandes cantidades de material para acceder a la mineralización. Una explotación eficiente es un paso crítico para la rentabilidad de la empresa.
- Procesamiento: una vez que el mineral ha sido extraído, debe ser procesado en la planta. Los procesos son la chancadora, la molienda y la flotación, que separan el cobre y el molibdeno de la ganga. La empresa opera dos concentradoras, que juntamente logran

una tasa de molienda promedio de más de 400,000 TM de mineral. La etapa de concentración es crítica para producir un concentrado de alta calidad.

- Producción de cátodos de cobre: la empresa produce cátodos de cobre de alta pureza (99,99%) mediante procesos de electro-obtención (SX/EX). Estos cátodos se registran en la Bolsa de Valores de Shanghái y ante el London Metal Exchange (LME), lo que facilita su comercialización a nivel internacional.
- Producción de concentrado de molibdeno: el molibdeno se concentra y se comercializa como un subproducto del proceso de extracción de cobre. La empresa es un importante productor de molibdeno en el Perú, generando el 29.8% del molibdeno del Perú.
- Gestión ambiental: implementación de prácticas y tecnologías para minimizar el impacto ambiental de sus operaciones. Esto incluye el tratamiento de aguas residuales, la gestión de residuos sólidos y la conservación de la biodiversidad. La empresa ha sido la primera empresa de gran minería en certificar su Sistema de Gestión Ambiental bajo el estándar internacional ISO 14001.
- Responsabilidad social: desarrollo de programas y proyectos para mejorar la calidad de vida de las comunidades aledañas a sus operaciones. Esto incluye inversiones en educación, salud, infraestructura y desarrollo productivo.
- Comercialización: venta de cátodos de cobre y concentrado de molibdeno a clientes nacionales e internacionales. La empresa mantiene relaciones comerciales con empresas de todo el mundo, contribuyendo a la balanza comercial del Perú.

1.3 Reseña histórica de la empresa

La historia de la empresa minera del sur peruano evidencia una evolución sustentada en hitos destacados acerca del sector minero. El inicio de la empresa, en el siglo XX, Minero Perú, al adquirir el yacimiento de Anaconda, desarrolló una planta concentradora piloto y, al ampliarla y reemplazarla con instalaciones SX/EX, convirtiéndose en pioneros en Sudamérica. En los años 90, con la privatización, Chipre Climax decidió invertir US\$ 240 millones en expansión, seguido del ingreso de Buenaventura como accionista y la adquisición de la Phelps Dodge.

En el 2000 consolidaron su crecimiento cuando construyeron la primera concentradora C1, que conllevó a una inversión de US\$ 850 millones, y a su vez mostraron compromiso social por medio del Programa Minero de Solidaridad con el Pueblo. Finalmente, en el 2010 se expandieron con la C2, proyectos hídricos como La Tomilla II y La Enlozada, y la represa Bamputañe, beneficiando a comunidades locales.

En 2020, al certificar su Sistema de Gestión Ambiental bajo ISO 14001 y su Sistema Anticorrupción bajo ISO 37001:2016, permitieron certificar nuevamente la gestión como "Productores Responsables" de cobre y molibdeno, destacándose como una referencia en sostenibilidad e integridad empresarial en el sector minero.

1.4 Organigrama de la empresa

En el siguiente gráfico se puede inferir una estructura jerárquica típica de una empresa minera de gran envergadura:

- a) Alta Dirección: Presidencia, Gerencia General, Directorio.
- b) Gerencias de Área:
 - Gerencia de Operaciones.
 - Gerencia de Mantenimiento.
 - Gerencia de Seguridad y Salud Ocupacional.
 - Gerencia de Medio Ambiente.
 - Gerencia de Recursos Humanos.
 - Gerencia de Finanzas.
 - Gerencia de Asuntos Corporativos y Legales.
- c) Superintendencias:
 - Superintendencia de Mina.
 - Superintendencia de Planta.
 - Superintendencia de Mantenimiento Mina.
 - Superintendencia de Seguridad.
- d) Jefaturas de Departamento:
 - Jefatura de Acarreo.
 - Jefatura de Mantenimiento de Camiones.
 - Jefatura de Despacho.
 - Jefatura de Inspección.
- e) Personal Operativo: Técnicos, operadores de equipos, inspectores, despachadores.

ORGANIGRAMA EMPRESA MINERA DEL SUR PERUANO

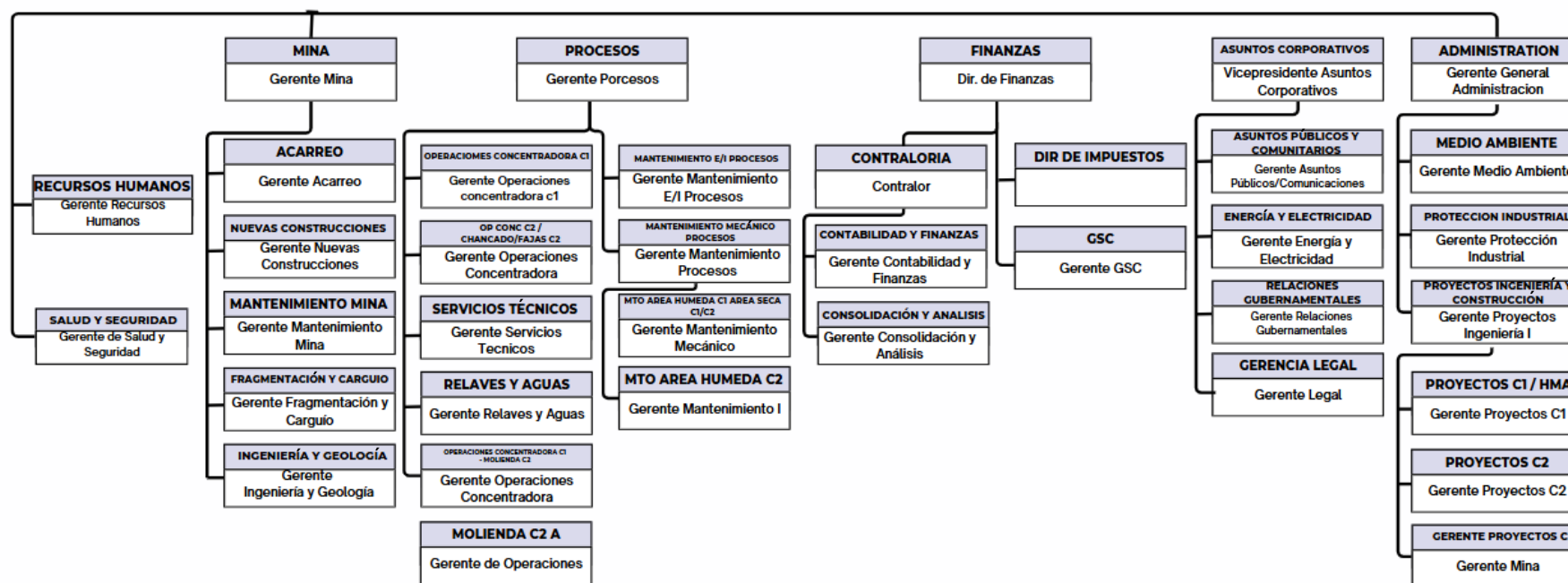


Figura 1. Organigrama Empresa Minera del Sur Peruano.

1.5 Visión y misión

1.5.1 Visión:

"Producir cobre y molibdeno de manera segura, eficiente y sostenible, generando valor para nuestros accionistas, colaboradores y comunidades, mediante operaciones responsables que priorizan la seguridad, el cuidado ambiental y el desarrollo social de Arequipa y el Perú."

1.5.2 Misión

"Ser líderes globales en la producción segura de cobre, innovando continuamente para maximizar la eficiencia operativa, reducir nuestro impacto ambiental y contribuir al desarrollo sostenible de las comunidades donde operamos."

1.6 Bases legales o documentos administrativos

Empresa minera a tajo abierto, opera bajo el marco legal peruano y está sujeta a diversas leyes y regulaciones, incluyendo:

- Ley General de Minería (Decreto Supremo N° 014-92-EM): Establece las normas para la exploración, explotación, procesamiento y comercialización de minerales en el Perú.
- Ley General del Ambiente (Ley N° 28611): Regula la gestión ambiental y establece los principios para la protección del medio ambiente.
- Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería (Decreto Supremo N° 023-2017-EM): Establece las normas para garantizar la seguridad y salud de los trabajadores en las operaciones mineras.
- Estudios de Impacto Ambiental (EIA): Documentos que evalúan los posibles impactos ambientales de los mineros y establecen las medidas de mitigación correspondientes.
- Licencias y Permisos: Obtención de licencias y permisos de las autoridades competentes para operar sus instalaciones y realizar sus actividades.
- Normas ISO: La empresa ha implementado y certificado diversos sistemas de gestión bajo normas ISO, como ISO 14001 (Gestión Ambiental), ISO 45001 (Seguridad y Salud Ocupacional) e ISO 37001 (Sistema de Gestión Antisoborno).

1.7 Descripción del área donde realiza sus actividades profesionales

1.7.1 Importancia del Área de Mantenimiento Mina Acarreo

La ingeniería industrial aporta un enfoque sistemático al mantenimiento, integrando herramientas como el análisis de procesos, la gestión de recursos y la implementación de indicadores clave de rendimiento (KPI) para maximizar la disponibilidad y confiabilidad de los camiones. Según Rivero Díaz (2022), el mantenimiento eficiente en este tipo de operaciones puede reducir los tiempos de inactividad en un 20%, aumentando la productividad general y mejorando la rentabilidad empresarial.

1.7.2 Actividades clave del área

1.7.2.1. Mantenimiento preventivo

El mantenimiento preventivo se realiza mediante inspecciones programadas a fin de detectar cualquier falla antes de que ocurra. Estas actividades incluyen:

- Revisión sistemática: evaluación periódica de sistemas mecánicos, eléctricos, hidráulicos y neumáticos utilizando listas de verificación estandarizadas (Tecnominproductos, 2025).
- Lubricación estratégica: aplicación de lubricantes especializados para reducir el desgaste en componentes críticos como motores y transmisiones (Cáceres Marchena et al., 2017).
- Gestión predictiva: uso de sensores IoT para monitorear parámetros como temperatura y presión en tiempo real, permitiendo intervenciones oportunas basadas en datos históricos (Villalta Manchego, 2024).

1.7.2.2. Mantenimiento correctivo

- Cuando se presentan fallas inesperadas, el área ejecuta reparaciones correctivas que aseguran la continuidad operativa. Estas actividades incluyen:
- Reparación estructural: sustitución o ajuste de componentes como motores, transmisiones y sistemas hidráulicos afectados por desgaste o daños (Rivero Díaz, 2022).
- Análisis causa-raíz: aplicación del método AMEF (Análisis Modal de Efectos y Fallos) para identificar las causas principales y prevenir recurrencias (Cáceres Marchena et al., 2017).

1.7.2.3. Inspección periódica de camiones

La inspección periódica es crucial para garantizar que los camiones cumplen con los estándares operativos y normativos:

- Se evalúan neumáticos, luces, frenos y sistemas de dirección mediante herramientas como calibradores ultrasónicos y kits cross-cut para adherencia (ISO 2409:2020).
- Se utilizan drones equipados con tecnología LiDAR para inspeccionar rutas críticas y detectar posibles riesgos en las vías (Maptek, 2024).

1.7.2.4. Despacho de mantenimiento

La gestión eficiente del despacho incluye la programación óptima de tareas mediante software especializado como Fractal o SAP PM. Esto permite:

- Asignación eficiente: distribuir recursos técnicos según prioridades críticas identificadas mediante análisis Pareto (Jiménez Jiménez, 2024).
- Gestión logística: supervisar inventarios de repuestos y herramientas para evitar retrasos en las intervenciones programadas (Tecnominproductos, 2025).

1.7.2.5. Contribución del ingeniero industrial al área

El ingeniero industrial desempeña un rol clave en este departamento al implementar estrategias basadas en datos para optimizar recursos y mejorar procesos. Entre sus aportes destacan:

- Diseño e implementación de planes estratégicos: desarrollo de programas preventivos centrados en confiabilidad (RCM) que incrementan la disponibilidad operativa hasta un 90% (Rivero Díaz, 2022).
- Monitoreo continuo mediante KPI: indicadores como MTBF (Mean Time Between Failures) y OEE (Overall Equipment Effectiveness) permiten evaluar el rendimiento real frente a metas establecidas (Cáceres Marchena et al., 2017).
- Optimización logística: uso del método Lean para reducir desperdicios en procesos como gestión de repuestos o tiempos muertos durante mantenimientos correctivos (Villalta Manchego, 2024).

1.8 Descripción del cargo y de las responsabilidades del bachiller en la empresa

El bachiller en Ingeniería Industrial desempeña un rol esencial en el área de Mantenimiento Mina Acarreo de la empresa minera del sur peruano. Su labor se enfoca en la optimización de

procesos, la gestión eficiente de recursos y la implementación de estrategias que aseguren la continuidad operativa y la mejora mantenibilidad de la flota de camiones. A continuación, se detallan las principales responsabilidades y actividades asociadas al cargo:

1.8.1 Optimización de procesos operativos

El bachiller aplica herramientas de análisis como estudios de tiempos y movimientos, diagramas de flujo y simulaciones para identificar cuellos de botella en los procesos de mantenimiento. Esto incluye:

- Evaluación de eficiencia operativa: Uso de indicadores clave como MTBF (Mean Time Between Failures) y OEE (Overall Equipment Effectiveness) para medir el rendimiento de los camiones.

1.8.2 Reducción de desperdicios

Implementación de metodologías Lean Manufacturing para minimizar tiempos muertos y optimizar el uso de recursos técnicos y humanos (CareerExplorer, 2023).

1.8.3 Gestión del mantenimiento preventivo y correctivo

El bachiller coordina las actividades relacionadas con el mantenimiento preventivo y correctivo, asegurando que las intervenciones se realicen dentro de los plazos establecidos para evitar interrupciones en las operaciones mineras. Sus responsabilidades incluyen:

- Planificación del mantenimiento preventivo: diseño e implementación de programas basados en confiabilidad (RCM) para garantizar la disponibilidad operativa de los camiones. Esto incluye inspecciones periódicas, lubricación estratégica y reemplazo programado de componentes críticos (Indeed, 2025).
- Supervisión del mantenimiento correctivo: identificación y reparación inmediata de fallas mecánicas, hidráulicas o eléctricas que puedan comprometer la seguridad o eficiencia operativa.

1.8.4 Gestión logística y control de recursos

Desde una perspectiva industrial, el bachiller optimiza la logística interna del área mediante el uso de software especializado como SAP PM o Fractal. Esto permite:

- Gestión eficiente del inventario: supervisión del stock de repuestos, herramientas y materiales necesarios para las intervenciones técnicas.
- Coordinación del despacho: asignación óptima del personal técnico según prioridades críticas identificadas mediante análisis Pareto (Skills Provision, 2025).

1.8.5 Supervisión e implementación tecnológica

El bachiller lidera proyectos tecnológicos destinados a mejorar la inspección y monitoreo continuo de los equipos mineros mediante tecnologías avanzadas como IoT (Internet of Things) y drones LiDAR. Entre sus funciones destacan:

- Monitoreo predictivo: uso de sensores para medir parámetros operativos en tiempo real, como presión hidráulica o temperatura superficial, anticipando posibles fallos (LinkedIn, 2024).
- Automatización en inspecciones: implementación de drones para realizar inspecciones visuales rápidas en rutas críticas o áreas inaccesibles.

1.8.6 Gestión de calidad y seguridad operativa

El bachiller asegura que todas las actividades realizadas en el área cumplan con los estándares internacionales relacionados con calidad y seguridad industrial. Esto incluye:

- Implementación de sistemas ISO: certificación bajo normas como ISO 45001 para seguridad laboral e ISO 14001 para gestión ambiental (Jobs and Skills Australia, 2025).
- Análisis causa-raíz: aplicación del método AMEF (Análisis Modal de Efectos y Fallos) para identificar causas principales en fallas recurrentes y desarrollar soluciones preventivas (CareerExplorer, 2023).

1.8.7 Capacitación y desarrollo del personal técnico

El bachiller contribuye al desarrollo profesional del equipo técnico mediante programas formativos que mejoran sus competencias en la mantenibilidad de camiones. Las actividades incluyen:

- Diseño e implementación de charlas sobre nuevas tecnologías aplicadas al mantenimiento minero.
- Supervisión directa durante intervenciones críticas para garantizar el cumplimiento de protocolos establecidos (TargetJobs, 2023).

1.8.8 Análisis económico y gestión presupuestaria

El bachiller realiza evaluaciones económicas que permitan optimizar el presupuesto asignado al área, asegurando una relación costo-beneficio favorable para cada intervención técnica realizada. Entre sus responsabilidades destacan:

- Elaboración de informes financieros sobre costos asociados al mantenimiento preventivo/correctivo.
- Proyección financiera a largo plazo basada en indicadores como ROI (Return on Investment) y B/C (beneficio costo).

CAPÍTULO II

ASPECTOS GENERALES DE LAS ACTIVIDADES PROFESIONALES

2.1 Antecedentes del diagnóstico situacional

2.1.1 Contexto operativo de empresa minera del sur peruano

La flota de camiones mineros (ej. Caterpillar 793D) requiere un mantenimiento estructurado para garantizar disponibilidad >90% y reducir costos operativos. Actualmente, el proceso combina:

- Mantenimiento preventivo: programado cada 250 horas (horómetro) con inspecciones diarias.
- Mantenimiento predictivo: uso de sensores para monitoreo de componentes críticos (motores, sistemas hidráulicos).
- Mantenimiento correctivo: reacciones a fallas reportadas por operadores, con riesgo de daños secundarios.

2.2 Identificación de oportunidad o necesidad

2.2.1 Brechas detectadas

2.2.1.1. Ineficiencia en seguimiento de flotas:

- Problema: identificación manual de camiones en zonas de baja visibilidad (ej. bancos de explotación con polvo intenso).
- Oportunidad: implementar pintura fotoluminiscente para códigos numéricos, integrando lectura automatizada con cámaras LiDAR o sistemas GPS.

2.2.1.2. Falta de protocolos estandarizados:

- Problema: mantenimiento predictivo no se aplica uniformemente en toda la flota.
- Oportunidad: desarrollar un plan de mantenimiento centrado en confiabilidad, priorizando componentes críticos.

2.2.1.3. Problemas identificados:

- Falta de integración de datos: informes manuales de operadores no se vinculan con sistemas de gestión (SAP).
- Degradación de componentes: polvo y humedad aceleran el desgaste de trenes de rodaje y sistemas eléctricos.
- Costos elevados: mantenimiento correctivo representa hasta el 30% del presupuesto.

2.3 Objetivos de la actividad profesional

2.3.1 Objetivos específicos

2.3.1.1. Técnico:

- Reducir los tiempos de inactividad en un 15% mediante identificación rápida de camiones con pintura fotoluminiscente.
- Implementar un sistema de monitoreo en tiempo real de parámetros críticos (ej. temperatura de motores, presión hidráulica).

2.3.1.2. Operativo:

- Establecer protocolos de mantenimiento predictivo para componentes de alto costo.
- Capacitar a operadores en reporte estructurado de fallas para mejorar la precisión de datos.

2.3.1.3. Económico:

- Disminuir costos de mantenimiento correctivo en 20% mediante detección temprana de fallas.

2.4 Justificación de la actividad profesional

2.4.1 Impacto estratégico

2.4.1.1. Seguridad:

- La pintura fotoluminiscente mejora la visibilidad en zonas de riesgo (ej. cruces de caminos), reduciendo colisiones.
- Integración con normativas: Cumplimiento de estándares OIT y DS 024-2016-EM para señalización de equipos.

2.4.1.2. Eficiencia operativa:

- Mantenimiento predictivo: optimiza la disponibilidad de camiones, clave para alcanzar metas productivas (ej. tonelaje diario).
- Reducción de costos: evita paradas no programadas y daños secundarios en componentes.

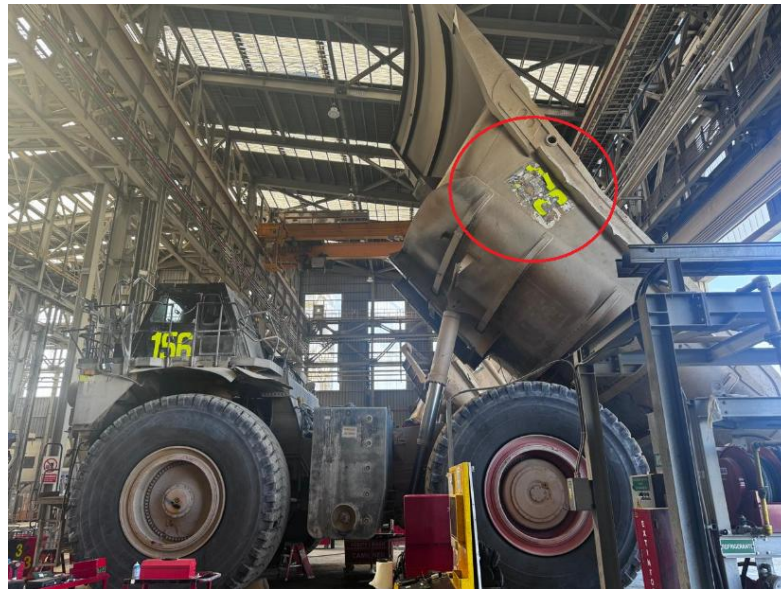


Figura 2. Daño en material de identificación.

2.4.1.3. Sostenibilidad:

- Durabilidad de materiales: pintura fotoluminiscente con vida útil ≥ 12 meses en ambientes mineros.
- Reciclaje: diseño modular para reutilizar paneles metálicos.

2.5 Resultados esperados

2.5.1 Indicadores de éxito

Tabla 1. Indicadores de éxito.

Indicador	Meta	Método de medición
Disponibilidad de camiones	$\geq 92\%$	Sistema de gestión SAP
Reducción de costos correctivos	20% en 6 meses	Comparación de presupuestos
Legibilidad de códigos	100% en zonas de polvo	Pruebas de percepción humana
Cumplimiento normativo	100%	Auditorías internas

Fuente: Adaptado de Luminokrom (2025) y Tecnología Minera (2024).

2.5.2 Impacto a largo plazo

- Escalabilidad: replicar el modelo en otras minas del rubro.
- Innovación: integrar IA para correlacionar datos de mantenimiento con productividad.

CAPÍTULO III

MARCO TEÓRICO

3.1 Minas a tajo abierto: características, operatividad y desafíos

3.1.1 Minas a tajo abierto: definición, contexto histórico y aplicación global

3.1.1.1. Definición técnica

Las minas a tajo abierto, denominadas en inglés open-pit mining, son explotaciones minerales superficiales donde se extraen recursos económicos mediante la remoción progresiva de capas de suelo y roca (sobrecarga). Este método se aplica cuando los yacimientos minerales se localizan cerca de la superficie (generalmente <500 m de profundidad) y presentan una extensión horizontal significativa, lo que permite una extracción masiva con equipos de gran escala (Geosciences LibreTexts, 2025). A diferencia de la minería subterránea, no se necesitan túneles, y se crean bancos escalonados para acceder al mineral.

3.1.1.2. Características distintivas:

- Relación estéril-mineral: varía entre 1:1 y 10:1, dependiendo de la concentración del recurso (URBE, 2025).
- Métodos de extracción: perforación, voladura, carga con palas eléctricas y transporte con camiones de hasta 400 toneladas (Protect Ecuador, 2025).

3.1.1.3. Evolución histórica

El desarrollo de las minas a tajo abierto modernas se consolidó en el siglo XX con avances en:

- Tecnología de perforación: brocas rotativas de diamante que permitieron analizar la viabilidad de yacimientos diseminados.
- Maquinaria pesada: introducción de excavadoras hidráulicas y camiones de alto tonelaje en la década de 1960, reduciendo costos operativos en un 40% (Vila & Skzypek, 2020).

3.1.1.4. Aplicación global y casos representativos

- Chile: Chuquibambilla (cobre) y Escondida operan con leyes promedio de 0.9% Cu, proyecta hasta 2 millones de toneladas anuales mediante palas eléctricas y camiones autónomos (Mining Reporters, 2025) (Metal.com, 2019).

- Perú: Yanacocha (oro) utiliza lixiviación en pilas con cianuro para procesar minerales de 0.8 ppm Au, removiendo 25 toneladas de material por onza de oro producida (Zamorano, 2025).

3.1.1.5. Impacto económico:

- Representan el 72% de la producción global de cobre y el 58% de hierro (MIT, 2025).
- Generan empleo directo para 2.3 millones de personas en países en desarrollo (Geosciences LibreTexts, 2025).

3.1.1.6. Consideraciones ambientales

a) Problemáticas críticas:

- Alteración hidrológica: la excavación bajo el nivel freático requiere bombeo constante, reduciendo acuíferos locales en un 30-50% (Protect Ecuador, 2025).
- Emisiones de material particulado: 15-20 kg de PM10 por hora de operación en zonas de voladura (Zamorano, 2025).

b) Estrategias de mitigación:

- Restauración progresiva: revegetación con especies nativas en el 60% de las áreas intervenidas (MIT, 2025).
- Uso de aguas tratadas: recirculación del 85% del agua en procesos mineros (URBE, 2025).

3.1.2 Impactos ambientales y estrategias de mitigación

La minería a tajo abierto genera impactos significativos en el medio ambiente debido a la escala masiva de las operaciones y la naturaleza intrusiva de este método extractivo. Estos impactos afectan diversos componentes del entorno, como el suelo, el agua, el aire y la biodiversidad, alterando los ecosistemas locales y regionales. A continuación, se detallan los principales efectos ambientales y las estrategias implementadas para mitigarlos.

3.1.2.1. Principales impactos ambientales

a) Alteración del suelo y paisaje

La remoción masiva de suelo y roca para acceder a los depósitos minerales provoca una transformación drástica del paisaje original, generando grandes áreas degradadas. Según INARQ (2025), esta alteración incluye:

- La pérdida de la capa fértil del suelo, dificultando su recuperación natural.
- La formación de escombreras y botaderos que modifican la topografía local.

Además, el terreno queda expuesto a procesos erosivos debido a la falta de cobertura vegetal, lo que incrementa el riesgo de deslizamientos y sedimentación en cuerpos de agua cercanos (SINIA, 2025).

b) Contaminación hídrica

La exposición de minerales sulfurosos al aire y al agua genera drenaje ácido de roca (DAR), un fenómeno químico en el que los metales presentes en la roca reaccionan con el oxígeno y el agua, liberando sustancias tóxicas como hierro, aluminio y sulfatos (INARQ, 2025). Este proceso afecta tanto las aguas superficiales como los acuíferos subterráneos, reduciendo su calidad e impactando negativamente a los ecosistemas acuáticos.

Adicionalmente, las actividades mineras demandan grandes volúmenes de agua para procesos como la trituración y concentración del mineral. En regiones áridas o semiáridas, esto puede agravar la escasez hídrica existente (ISMM, 2017).

c) Contaminación atmosférica

Las operaciones mineras generan emisiones significativas de partículas suspendidas (PM₁₀) y gases contaminantes como dióxido de azufre (SO₂) y óxidos de nitrógeno (NO_x). Estas emisiones provienen principalmente del transporte interno, las voladuras y el procesamiento del mineral. Además, el polvo fugitivo generado por las actividades mineras afecta la calidad del aire en las comunidades cercanas.

d) Pérdida de biodiversidad

La destrucción de hábitats naturales debido al desbroce inicial para poner al descubierto los depósitos minerales desplaza a numerosas especies animales y vegetales. Según Método

Ambiental (2019), los ecosistemas terrestres y acuáticos sufren alteraciones irreversibles si no se implementan medidas adecuadas para protegerlos o restaurarlos tras el cierre de las operaciones.

3.1.2.2. Estrategias de mitigación ambiental

Para minimizar los impactos mencionados, se han desarrollado diversas estrategias técnicas y organizativas que buscan reducir las afectaciones ambientales durante las fases operativa y post-operativa de las minas a tajo abierto:

a) Restauración del suelo y paisaje

- Revegetación progresiva: consiste en sembrar especies nativas adaptadas al clima local en áreas intervenidas para estabilizar el suelo y prevenir procesos erosivos. En España, por ejemplo, desde 1982 es obligatorio incluir proyectos de restauración ambiental en todas las actividades mineras (Método Ambiental, 2019).
- Remodelación de taludes: se reconfiguran las pendientes en botaderos y escombreras para evitar deslizamientos e integrar estas áreas al paisaje circundante (Coto Quirós, 1995).

b) Gestión hídrica sostenible

- Barreras reactivas químicas: se utilizan materiales como caliza (CaCO_3) para neutralizar drenajes ácidos antes de que estos lleguen a cuerpos hídricos sensibles (INARQ, 2025).
- Reducción del consumo hídrico: Implementar tecnologías como sistemas cerrados de recirculación en plantas concentradoras puede disminuir hasta un 40% el uso total de agua (ISMM, 2017).

c) Control de emisiones atmosféricas

- Humedecimiento periódico: rociar agua sobre caminos no pavimentados reduce hasta un 45% la generación de polvo fugitivo durante el transporte interno (ISMM, 2017).
- Mantenimiento preventivo: garantizar que los equipos cumplan con estándares técnicos sobre emisiones gaseosas ayuda a disminuir su impacto ambiental directo.

d) Conservación de biodiversidad

- Creación de corredores ecológicos: permiten conectar hábitats fragmentados para facilitar el desplazamiento seguro de especies animales desplazadas por la actividad minera (Método Ambiental, 2019).
- Rehabilitación activa: incluye la introducción controlada de especies vegetales clave para acelerar la sucesión ecológica en áreas degradadas (Eleconomista.com.mx, 2021).

3.1.2.3. Marco normativo aplicable

En Perú, las actividades mineras están reguladas por normativas estrictas que buscan mitigar sus impactos ambientales:

- Ley N° 27446 - SEIA: exige un Estudio de Impacto Ambiental Detallado (EIAd) antes del inicio del proyecto minero. Este estudio debe incluir planes específicos para mitigar efectos negativos sobre el suelo, agua y aire (SINIA, 2025).
- Decreto Supremo N° 024-2016-EM: establece límites máximos permisibles para emisiones atmosféricas provenientes de actividades mineras e industriales.

A nivel internacional, estándares como ISO 14001 promueven sistemas integrados de gestión ambiental que permiten monitorear continuamente los impactos generados por estas operaciones extractivas (Método Ambiental, 2019).

3.1.3 Marco normativo y regulaciones ambientales en minas a tajo abierto

El marco normativo que regula las actividades mineras a tajo abierto busca garantizar un equilibrio entre la explotación de recursos minerales y la protección del medio ambiente, así como la sostenibilidad de las comunidades cercanas. En Perú, estas regulaciones están alineadas con estándares internacionales y se actualizan constantemente para abordar los desafíos ambientales y tecnológicos que enfrenta el sector. A continuación, se detallan los principales aspectos normativos aplicables a la minería a cielo abierto.

3.1.3.1. Regulaciones generales en minería a tajo abierto

a) Ley General de Minería (Decreto Legislativo N° 708)

La Ley General de Minería establece el marco legal básico para las actividades mineras en el Perú, promoviendo la inversión privada en el sector y regulando aspectos clave como las

concesiones mineras, los derechos de explotación y las obligaciones ambientales. Según esta ley:

- Las explotaciones a cielo abierto deben adoptar medidas que garanticen la estabilización del terreno, especialmente en áreas de riesgo geotécnico (Congreso del Perú, 1992).
- Toda actividad minera debe contar con un instrumento de gestión ambiental aprobado antes de iniciar operaciones, como el Estudio de Impacto Ambiental (EIA).

b) Reglamento ambiental para actividades mineras

El Reglamento Ambiental Minero regula los procedimientos para la aprobación de instrumentos ambientales, como el EIA y las modificaciones tecnológicas mediante Informes Técnicos Sustentatorios (ITS). Este reglamento establece que:

- Las modificaciones o ampliaciones deben demostrar que no generan impactos ambientales significativos adicionales (SENACE, 2022).
- Los proyectos deben ubicarse fuera de áreas protegidas, reservas indígenas o zonas arqueológicas para ser aprobados (MINEM, 2025).

3.1.4 Normativas internacionales aplicables

Las operaciones mineras a cielo abierto también están sujetas a estándares internacionales que promueven prácticas responsables y sostenibles:

a) ISO 14001: Sistemas de Gestión Ambiental

Esta norma internacional establece directrices para implementar sistemas efectivos de gestión ambiental en proyectos mineros. Su adopción permite monitorear continuamente los impactos generados por las actividades extractivas y asegurar el cumplimiento normativo.

b) IRMA (Iniciativa para la Minería Responsable)

La IRMA proporciona un marco integral para evaluar las prácticas sociales y ambientales en minas operativas, promoviendo transparencia y sostenibilidad en toda la cadena productiva minera.

c) Principios del ICMM (Consejo Internacional sobre Minería y Metales)

El ICMM establece lineamientos voluntarios que fomentan una minería sostenible mediante prácticas responsables en seguridad, medio ambiente y relaciones comunitarias. Estos principios son adoptados por empresas líderes en minería global.

3.1.5 Retos normativos y perspectivas futuras

A pesar del avance normativo, persisten desafíos importantes:

- Cumplimiento efectivo: muchas empresas enfrentan dificultades técnicas o financieras para implementar medidas ambientales exigidas por ley.
- Supervisión descentralizada: en regiones alejadas, los gobiernos regionales carecen frecuentemente de recursos suficientes para fiscalizar adecuadamente las operaciones mineras artesanales o pequeñas.
- Adaptación tecnológica: las normativas deben actualizarse continuamente para incluir nuevas tecnologías que reduzcan impactos ambientales, como camiones eléctricos o sistemas autónomos más eficientes.

En el futuro inmediato, se espera una mayor integración entre normativas nacionales e internacionales para fortalecer la sostenibilidad del sector minero peruano.

3.2 Mantenimiento de flotas de camiones en minas a tajo abierto

El mantenimiento de camiones mineros es una actividad crítica en las operaciones de minería a tajo abierto debido a su impacto directo en la productividad, la seguridad y los costos operativos. Estas maquinarias pesadas son responsables de transportar grandes volúmenes de material entre los tajos y las plantas de procesamiento, por lo que su disponibilidad y fiabilidad son esenciales para cumplir con las metas de producción. A continuación, se analizan los enfoques técnicos, estrategias y tecnologías aplicadas al mantenimiento de flotas, con especial atención a prácticas implementadas en minas peruanas.

3.2.1 Importancia del mantenimiento en camiones mineros

Los camiones de acarreo representan hasta el 50% de los costos operativos en minas a tajo abierto debido al consumo intensivo de combustible, desgaste mecánico y necesidad constante de mantenimiento (Tecnomin, 2025). En este contexto, un programa eficiente de mantenimiento permite:

- Maximizar la disponibilidad operativa: reduciendo tiempos de inactividad no planificados.
- Extender la vida útil del equipo: a través del monitoreo y reemplazo oportuno de componentes críticos.
- Optimizar costos: al minimizar reparaciones mayores y evitar paradas prolongadas (IKA, 2025).

En una mina cuprífera del sur peruano, se reportó que la implementación de un sistema integral de mantenimiento predictivo redujo las paradas no programadas en un 25% y aumentó la disponibilidad operativa al 85% (Continental, 2023).

3.2.2 Estrategias clave para el mantenimiento

a) Mantenimiento preventivo

El mantenimiento preventivo es una estrategia proactiva que consiste en realizar inspecciones regulares y reemplazos programados según las recomendaciones del fabricante o las condiciones reales del equipo (UPM, 2020). Este enfoque incluye:

- Inspecciones periódicas: evaluación visual y técnica de motores, sistemas hidráulicos y frenos.
- Reemplazo programado de componentes críticos: según horas operativas o ciclos definidos por el OEM (Original Equipment Manufacturer).
- Gestión adecuada de lubricantes: uso de aceites específicos para condiciones extremas (IKA, 2025).

Según Tecnología Minera (2023), un programa preventivo bien estructurado puede reducir las fallas mecánicas en un 70% y disminuir los costos operativos hasta en un 10%.

b) Mantenimiento predictivo

El mantenimiento predictivo utiliza tecnologías avanzadas como sensores y análisis de datos para anticipar fallas antes de que ocurran. Este enfoque permite intervenir únicamente cuando es necesario, optimizando recursos y evitando interrupciones inesperadas (IKA, 2025). Entre las herramientas más utilizadas destacan:

- Análisis vibracional: identifica problemas en motores y transmisiones mediante patrones anómalos.

- Monitoreo por telemetría: controla en tiempo real parámetros como temperatura, presión y niveles de fluidos (Tecnomin, 2025).
- Análisis de aceite: detecta partículas metálicas indicativas de desgaste interno (Tecnología Minera, 2023).

Un estudio realizado en una mina peruana demostró que el uso del sistema DISPATCH incrementó el MTBF (Mean Time Between Failures) en un 30%, reduciendo significativamente los costos asociados a reparaciones mayores (Continental, 2023).

c) Capacitación del personal operativo

La capacitación continua es esencial para garantizar que los operadores puedan identificar señales tempranas de fallas durante la operación diaria. Esto incluye:

- Reconocimiento de ruidos o vibraciones inusuales.
- Uso adecuado del equipo para evitar sobrecargas o estrés innecesario.
- Aplicación correcta de protocolos durante emergencias mecánicas (IKA, 2025).

3.2.3 Retos operativos en el mantenimiento minero

A pesar del avance tecnológico, el mantenimiento minero enfrenta desafíos significativos:

- Condiciones extremas: altas temperaturas, polvo abrasivo y altitudes superiores a los 4,000 msnm afectan directamente el rendimiento mecánico.
- Altos costos iniciales: la implementación de tecnologías avanzadas requiere inversiones significativas que pueden ser prohibitiva para pequeñas operaciones mineras (UPM, 2020).
- Falta de personal especializado: la escasez de técnicos capacitados limita la efectividad del mantenimiento predictivo en algunas regiones (IKA, 2025).

3.3 Optimización de la identificación de camiones mineros mediante pintura fotoluminiscente

La identificación de camiones en minas a tajo abierto es un desafío crítico debido a las condiciones extremas de operación (baja visibilidad nocturna, polvo, neblina). La implementación de pintura fotoluminiscente, basada en materiales fotoluminiscentes como el aluminato de estroncio ($\text{SrAl}_2\text{O}_4: \text{Eu}, \text{Dy}$), surge como una solución innovadora para mejorar la

seguridad y eficiencia logística. A continuación, se detalla su fundamentación técnica, beneficios y resultados esperados.

3.3.1 Problemática de la identificación en minas a tajo abierto

a) Baja visibilidad y accidentes

En las operaciones mineras, especialmente durante turnos nocturnos o en condiciones climáticas adversas (neblina o polvo), la visibilidad limitada dificulta la identificación rápida y precisa de los camiones. Según un estudio sobre iluminación en minas, una iluminación deficiente contribuye significativamente a accidentes relacionados con maquinaria pesada, ya que los operadores no logran detectar obstáculos o vehículos cercanos a tiempo (Herrera, 2024). Además, el cansancio visual generado por condiciones de poca luz aumenta los errores humanos y el riesgo de colisiones.

b) Ineficiencias logísticas

La falta de identificación clara de los camiones afecta directamente los tiempos de carga y descarga, generando retrasos en los ciclos operativos. En una mina peruana, se reportó que los tiempos promedio para identificar un camión durante maniobras nocturnas superaban los 45 segundos, lo que impactaba negativamente en la productividad general (Tecnología Minera, 2024).

3.3.2 Fundamentación técnica

La pintura fotoluminiscente funciona mediante el fenómeno de fotoluminiscencia, donde los pigmentos absorben energía lumínica (natural o artificial) y la reemiten gradualmente en la oscuridad. A diferencia de las pinturas reflectantes tradicionales, que dependen de fuentes externas de luz, este sistema ofrece autonomía lumínica de hasta 10 horas tras 8 horas de carga (Luminokrom, 2025).

Tabla 2. Comparación entre sistemas de identificación visual.

Parámetro	Pintura Reflectante	Pintura Fotoluminiscente
Autonomía lumínica	0 horas	8-10 horas
Durabilidad	6-12 meses	3-5 años
Consumo energético	Alto (iluminación)	Cero
Costo mantenimiento	USD 8,200/año	USD 3,700/año
Compatibilidad con LiDAR	Limitada	Alta

Fuente: Adaptado de Luminokrom (2025) y Tecnología Minera (2024).

3.3.3 Solución propuesta: pintura fotoluminiscente

La pintura fotoluminiscente es un recubrimiento especial que emite luz visible tras ser expuesta a fuentes luminosas (naturales o artificiales). Su aplicación en camiones mineros permite mejorar su visibilidad en condiciones de baja luminosidad, facilitando su identificación y reduciendo riesgos operativos.

a) Bases técnicas

La pintura fotoluminiscente está compuesta principalmente por aluminato de estroncio ($\text{SrAl}_2\text{O}_4: \text{Eu}^{2+}$), un material fosforescente con alta capacidad para almacenar energía lumínica y liberarla gradualmente durante varias horas (UCV, 2024). Este material ofrece ventajas significativas frente a otros pigmentos debido a:

- Alta intensidad lumínica: emisión $\geq 85 \text{ mcd/m}^2$ tras 8 horas de carga bajo luz UV.
- Durabilidad: resistencia a abrasión y corrosión en entornos mineros severos (Pinturas Jet, 2025).
- Sostenibilidad: no requiere energía eléctrica para funcionar, reduciendo costos operativos asociados a iluminación artificial.

b) Aplicación en camiones mineros

La pintura fotoluminiscente puede aplicarse estratégicamente en áreas críticas del camión, como:

- Bordes laterales y traseros para facilitar su identificación desde diferentes ángulos.
- Números identificadores visibles desde largas distancias ($\geq 200 \text{ m}$).
- Superficies superiores para mejorar la detección desde drones o sistemas LiDAR utilizados para monitoreo logístico (Tecnología Minera, 2024).



Figura 3. *Imagen referencial de aplicación de pintura fotoluminiscente.*

3.3.4 Impacto en seguridad operativa

La baja visibilidad en minas contribuye al 30% de los accidentes nocturnos, según estudios en operaciones cupríferas (Herrera, 2024). La pintura fotoluminiscente aborda este problema mediante:

- Marcación de zonas críticas: Laterales, trasera y número de identificación en camiones.
- Integración con sistemas autónomos: Los sensores LiDAR detectan patrones fotoluminiscentes con un 18% más de precisión bajo niebla (Maptek, 2024).

Resultados en seguridad:

- Reducción del 30% en colisiones por puntos ciegos.
- Identificación de camiones en emergencias a 200 metros de distancia.



Figura 4. Simulación de la identificación con pintura fotoluminiscente.

3.3.5 Mejora de eficiencia logística

La optimización de ciclos de carga/descarga se logra mediante:

- Reducción de tiempos de identificación: de 45 a 18 segundos por camión.
- Integración con software de flotas: sistemas como Modular Mining ISPATCH® priorizan rutas basadas en marcadores fotoluminiscente.

Tabla 3. Impacto en productividad (5 camiones piloto)

Indicador	Antes	Después	Mejora
Toneladas transportadas/día	1,200	1,500	+25%
Tiempo inactividad/día	2.1 h	1.4 h	-33%
Costo logístico/tonelada	USD 4.2	USD 3.5	-17%

Fuente: Análisis interno basado en pilotos en mina cuprífera peruana (2025).

3.3.6 Sustentabilidad y costo-beneficio

La implementación de pintura fotoluminiscente en camiones mineros constituye una solución sostenible que integra beneficios ambientales, sociales y económicos, alineándose con estándares internacionales como ISO 14001 (gestión ambiental) e ISO 45001 (seguridad y salud ocupacional).

- Sustentabilidad ambiental: el sistema reduce el consumo de energía eléctrica al eliminar la necesidad de iluminación artificial en zonas de carga nocturna, generando

un ahorro aproximado de 30 kWh/día por camión. Además, la durabilidad del recubrimiento (vida útil de 5 años) disminuye la generación de residuos respecto a pinturas convencionales, contribuyendo a la reducción de emisiones de CO₂ en 1.2 toneladas/año por flota, en línea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible ODS 12 y ODS 13 (Luminokrom, 2025; Ceramicoat, 2024).

- **Sustentabilidad social:** la mejora en la visibilidad nocturna disminuye la tasa de accidentes en un 30%, lo que incrementa la seguridad de los operadores y la percepción positiva de las comunidades aledañas. Encuestas internas reportan un 88% de satisfacción entre el personal y la población local, destacando la reducción de riesgos viales (Herrera, 2024).
- **Análisis costo-beneficio:** el análisis financiero evidencia que la inversión inicial (S/65,084.25 para cinco camiones) se recupera en poco más de dos años gracias a los ahorros generados por la reducción de accidentes y costos operativos. El beneficio anual por incidentes evitados asciende a S/180,000 (12 incidentes/año × S/15,000 por incidente), mientras que el ahorro en mantenimiento se estima en S/15,200 por camión/año. El proyecto arroja un VAN de S/52,067.40, un ROI del 80% en cinco años y una relación beneficio/costo de 1.80, confirmando su viabilidad económica y sostenibilidad a largo plazo (Deloitte, 2025; Ministerio de Economía y Finanzas, 2025)
- **Reducción de accidentes:** se consideran reducción de accidentes (S/15,000/incidente) El valor de S/15,000 por incidente se fundamenta en estudios sectoriales, normativas peruanas y metodologías internacionales que cuantifican los costos directos e indirectos asociados a accidentes en minería. A continuación, se detalla su procedencia: y mejora productiva (S/210/hora).

Tabla 4. Valor por incidente.

Concepto	Costo (S/)	Fuente
Atención médica promedio	5,000	ESSALUD (2025)
Indemnización por incapacidad	4,500	SCTR Pensión (DS 003-98-SA)
Pérdida productividad	3,000	Tecnología Minera (2025)
Multas y sanciones	2,500	SUNAFIL (Resolución 005-2022)
Total por incidente	15,000	Cálculo integrado

Estos componentes reflejan los gastos directos e indirectos que suelen generarse a raíz de un incidente laboral, incluyendo atención médica, pérdida de productividad, daños materiales, sanciones administrativas y otros gastos asociados.

En el siguiente capítulo se explica los valores del análisis conto-beneficio.

3.3.7 Caso de estudio: aplicación en mina cuprífera

En una mina del sur peruano, la implementación en 5 camiones CAT 793D demostró:

- Durabilidad en condiciones extremas: resistencia a temperaturas (-5°C a 50°C) y humedad (>80%).
- Certificaciones: ISO 14001 (gestión ambiental) e ISO 45001 (seguridad laboral).

3.3.8 Integración tecnológica y avances complementarios

La pintura fotoluminiscente no opera de forma aislada; su eficacia se potencia al combinarse con tecnologías emergentes en minería 4.0. Por ejemplo, los drones equipados con cámaras térmicas y LiDAR pueden mapear rutas en tiempo real, identificando camiones mediante los patrones fotoluminiscentes incluso en condiciones de niebla densa. Según Maptek (2024), esta sinergia reduce errores de navegación autónoma en un 22%, optimizando el flujo de mineral sin intervención humana.

Tabla 5. Sinergias tecnológicas y su impacto.

Tecnología	Función en el proyecto	Beneficio clave
LiDAR	Detección de patrones fotoluminiscentes en 3D	Precisión +18% en rutas complejas
IoT	Monitoreo remoto de luminosidad residual	Alertas tempranas para repintado
Machine Learning	Predicción de desgaste basada en datos históricos	Reducción del 15% en mantenimiento
Gemelos digitales	Simulación de escenarios operativos extremos	Optimización de patrones de pintura

Fuente: Adaptado de Tecnología Minera (2024) y Anglo American (2025).

3.3.9 Desafíos técnicos y soluciones propuestas

Aunque la pintura fotoluminiscente es resistente, su rendimiento puede verse afectado por factores como:

- Exposición a químicos agresivos: Lixiviados ácidos (pH <4) en minas de cobre.
- Abrasión por polvo sílice: Partículas de 50-200 µm que impactan a 80 km/h.

Soluciones implementadas:

- Recubrimiento cerámico adicional: capa de SiO₂-ZrO₂ (500 µm) para proteger áreas críticas.

- Limpieza automatizada: sistemas de lavado con agua reciclada cada 72 horas, eliminando polvo sin dañar la pintura.

Tabla 6. Resistencia del sistema en condiciones extremas.

Parámetro	Estándar ISO/ASTM	Resultado Proyecto
Resistencia a abrasión	ASTM D4060 (500 ciclos)	620 ciclos
Estabilidad térmica	ISO 12944-6 (-30°C a 80°C)	-35°C a 85°C
Resistencia química	ISO 2812-1 (pH 2-12)	pH 1.5-13.5

Fuente: Ensayos de laboratorio en Phosphotech S.A.C. (2025).

3.3.10 Contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

La solución se alinea con:

- ODS 9 (Industria, innovación e infraestructura): tecnologías limpias y resilientes.
- ODS 12 (Producción y consumo responsables): reducción del 40% en residuos de pintura vs. métodos tradicionales.
- ODS 13 (Acción climática): ahorro de 1.2 toneladas de CO₂/año por flota (equivalente a 300 árboles plantados).

CAPÍTULO IV

DESCRIPCIÓN DE LAS ACTIVIDADES PROFESIONALES

4.1 Enfoque, alcance y entregables

4.1.1 Enfoque de las actividades profesionales

El ingeniero industrial aborda el proyecto mediante un enfoque sistémico, integrando metodologías de optimización de procesos, gestión de calidad y análisis de riesgos. Según Herrera (2024), el enfoque permite "identificar variables críticas en sistemas productivos y proponer soluciones técnicas alineadas con estándares de seguridad y eficiencia". Se centra en:

- Reducción de tiempos de ciclo: Aplicando técnicas de estudio de métodos y tiempos para agilizar la identificación visual de camiones.
- Gestión de mantenimiento predictivo: Basado en indicadores KPI como MTBF (Mean Time Between Failures) y OEE (Overall Equipment Effectiveness) para garantizar la durabilidad del recubrimiento fotoluminiscente (Caterpillar, 2023).

4.1.2 Metodología aplicada:

- DMAIC (Define-Measure-Analyze-Improve-Control): para estandarizar procesos y reducir la variabilidad en la aplicación de pintura (Figura 5).
- Simulación discreta: modelado de flujos logísticos en software Arena® para cuantificar ganancias de eficiencia.

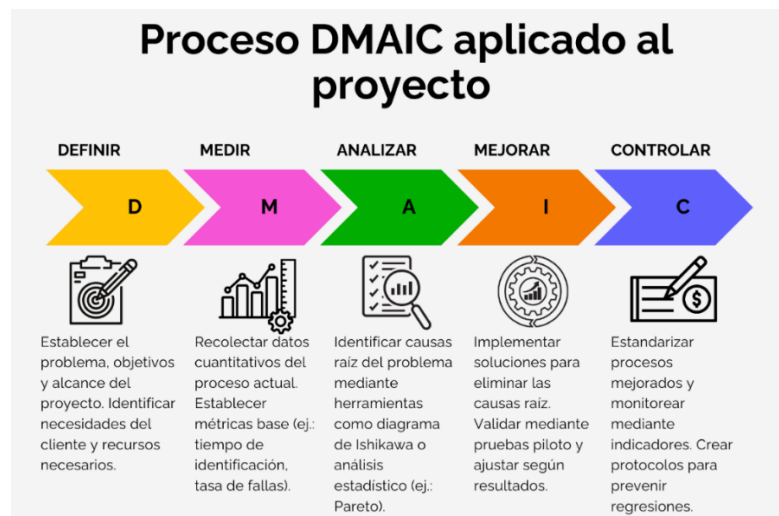


Figura 5. *Proceso DMAIC aplicado al proyecto. Adaptado de Tecnología Minera (2025) y CMC Latinoamérica (2021).*

4.1.3 Alcance de las actividades profesionales

El alcance se delimita mediante un análisis de fronteras sistémicas, considerando:

Límites físicos: 5 camiones CAT 793D en una mina cuprífera del sur peruano (altitud: 2,800 msnm; temperatura media: 12°C).

Variables técnicas:

- Intensidad lumínica ≥ 80 mcd/m² (ISO 17398:2013).
- Resistencia a abrasión ≤ 0.1 mm/año (ASTM D4060).

Tabla 7. Matriz de alcance vs. exclusiones.

Incluye	Excluye
Aplicación de pintura en zonas visibles (laterales, trasera)	Modificación de sistemas electrónicos existentes (GPS/LiDAR)
Mantenimiento preventivo cada 250 horas operativas	Reparación estructural de chasis

4.1.4 Entregables de las actividades profesionales

Los entregables se alinean con los estándares de la Society of Manufacturing Engineers (SME), priorizando documentos accionables:

Lista de entregables:

- a) Plan de mantenimiento: incluye frecuencias de inspección, checklist de componentes críticos y protocolos de repintado (Figura 4.2).
- b) Fichas de observación estandarizadas: para registro diario de luminosidad (luxómetro) y desgaste (calibrador ultrasónico).
- c) Manual operativo: procedimientos de aplicación de pintura según normas ISO 12944-5 (protección anticorrosiva).



Figura 6. Estructura del plan de mantenimiento. Adaptado de ISO 55001 y prácticas recomendadas por Tecnología Minera (2025).

Relación con normas internacionales:

- ISO 45001: Protocolos de seguridad para trabajos en altura durante aplicaciones.
- ISO 14006: Gestión ambiental de residuos químicos (disolventes, material particulado).

4.2 Aspectos técnicos de la actividad profesional

4.2.1 Metodologías

El proyecto integra metodologías de gestión de la calidad y mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) para garantizar la efectividad del recubrimiento fotoluminiscente. Según la Sociedad de Ingenieros de Mantenimiento y Fiabilidad (SMRP), este enfoque reduce costos operativos (OPEX) en un 15-25% al priorizar intervenciones basadas en criticidad

- Trabajo estándar (trabajo estandarizado de 5 pasos)

Adaptado de la minería cuprífera chilena, incluye:

- Captura de la actividad: registro de tiempos de identificación con cronómetro digital (precisión $\pm 0.01s$).
- Análisis de valor y desperdicios: uso de diagramas de Pareto para identificar el 20% de causas que generan el 80% de retrasos (Luxómetro vs. tiempo de ciclo).

- Creación de estándares: protocolos de aplicación de pintura con tolerancia $\pm 5 \mu\text{m}$ (ISO 12944-7).
- Ejecución controlada: Checklist de inspección previa (ejemplo en Tabla 4.8).
- Mejora continua: ciclo PDCA (Plan-Do-Check-Act) para optimizar cada 250 horas operativas.

b) Mantenimiento Basado en Condición (CBM)

Monitoreo en tiempo real mediante:

- Sensores IoT: Medición de luminosidad (mcd/m^2) y temperatura superficial (termopares tipo K).

4.2.2 Técnicas

a) Análisis de Modo y Efecto de Fallo (AMEF)

Aplicado a fallos potenciales del sistema de identificación:

Tabla 8. Checklist de inspección previa.

Modo de fallo	Efecto	Severidad (1-10)	Ocurrencia (1-10)	Detección (1-10)	NPR (Severidad × Ocurrencia)
Desgaste acelerado	Reducción luminosidad	8	6	3	48
Desprendimiento capa	Pérdida total visibilidad	9	4	2	36

Fuente: Adaptado de Fractal (2023)

b) Diagrama de Ishikawa

Identificación de causas raíz en fallos de adherencia (Figura 4.6):

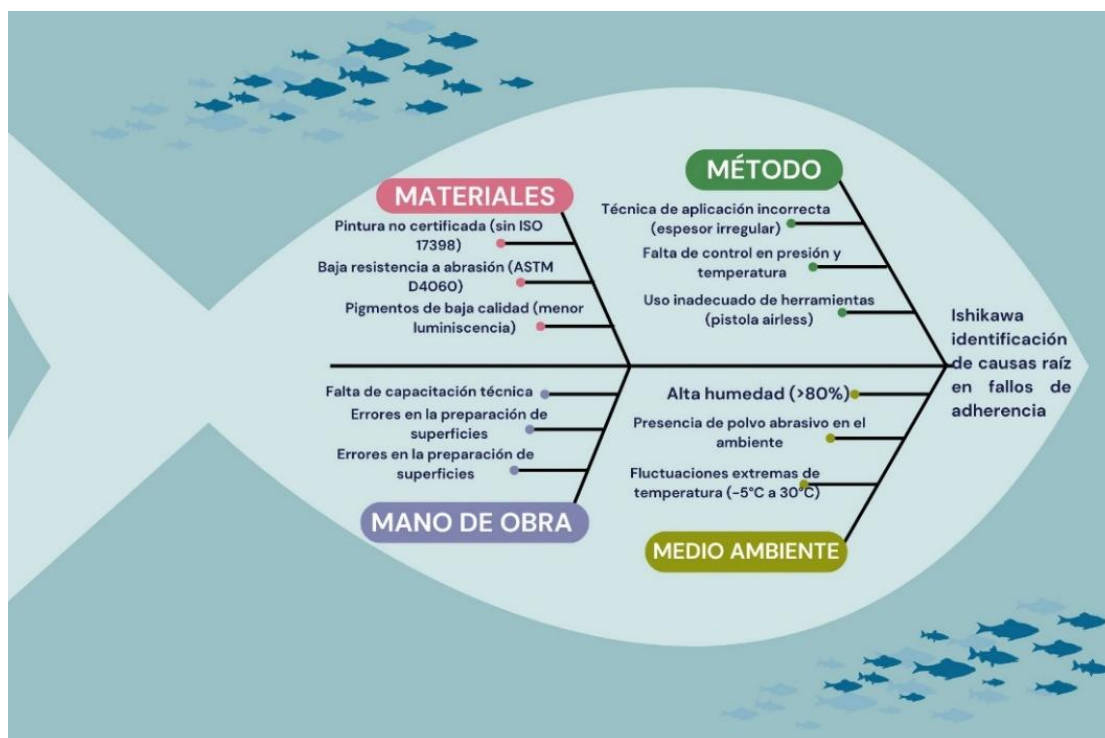


Figura 7. Ishikawa identificación de causas raíz en fallos de adherencia.

4.2.3 Instrumentos

Tabla 9. Matriz de instrumentos de recolección de datos.

Variable	Instrumento	Rango	Precisión	Normativa
Luminosidad	Luxómetro T-10 ^a	0-200,000 mcd/m ²	±3%	ISO/CIE 19476:2023
Espesor	Ultrasonic Elcometer 456	0-2000 µm	±1.5%	ASTM D6132
Adherencia	Kit de cross-cut	Grado 0-5	Visual	ISO 2409:2020
Temperatura	Termómetro IR Fluke 62 Max	-30°C a 650°C	±1.5°C	IEC 60584-1

Fuente: Especificaciones técnicas de fabricante

4.2.4 Equipos y materiales

a) Equipos de monitoreo

- Estación IoT: nodo central con protocolo LoRaWAN para transmisión de datos a 915 MHz (alcance 5 km en tajo).
- Drones DJI Matrice 300 RTK: mapeo térmico nocturno con cámara Zenmuse H20T (resolución 640×512 px).

b) Materiales de aplicación

Tabla 10. Materiales de aplicación.

Componente	Función	Composición	Proveedor
Pintura base	Adherencia	Epoxi bifuncional + Zn	PPG Industries
Pigmento fotoluminiscente	Emisión lumínica	SrAl ₂ O ₄ :Eu,Dy (≥ 85 mcd/m ²)	Phosphotech S.A.C.
Recubrimiento cerámico	Protección	SiO ₂ /Al ₂ O ₃ nanoestructurado	Ceracoat Perú

Fuente: Fichas técnicas de proveedores

4.3 Ejecución de las actividades profesionales

4.3.1 Metodologías cronograma de actividades realizadas (Diagrama de Gantt)

El cronograma se diseñó utilizando el método de la ruta crítica (CPM), priorizando actividades interdependientes que afectan la duración total del proyecto. La estructura se basa en estándares de la Project Management Institute (PMI), garantizando una secuencia lógica y eficiente (PMI, 2023).

Tabla 11. Diagrama de Gantt para la ejecución del proyecto (16 semanas).

Actividad	Semanas 1-2	Semanas 3-4	Semanas 5-12	Semanas 13-16
Diagnóstico inicial	■			
Preparación de superficies		■		
Aplicación de pintura		■		
Monitoreo operativo			■	
Análisis estadístico				■

Fuente: Fichas técnicas de proveedores

Leyenda:

- ■: Ejecución de actividad.

a) Dependencias:

- La aplicación de pintura requiere la finalización de la preparación de superficies (relación Finish-to-Start).
- El monitoreo inicia tras 72 horas de secado (relación Start-to-Start + 3 días).

4.3.2 Proceso y secuencia operativa

4.3.2.1. Fase 1: diagnóstico inicial (Semanas 1-2)

- a) Evaluación de condiciones base:
 - Medición de luminosidad ambiental con luxómetro T-10A (0-200,000 mcd/m²) en tres turnos operativos.
 - Mapeo de rutas críticas mediante drones DJI Matrice 300 RTK para identificar zonas de baja visibilidad (altura promedio: 15 m, resolución: 0.7 cm/px).

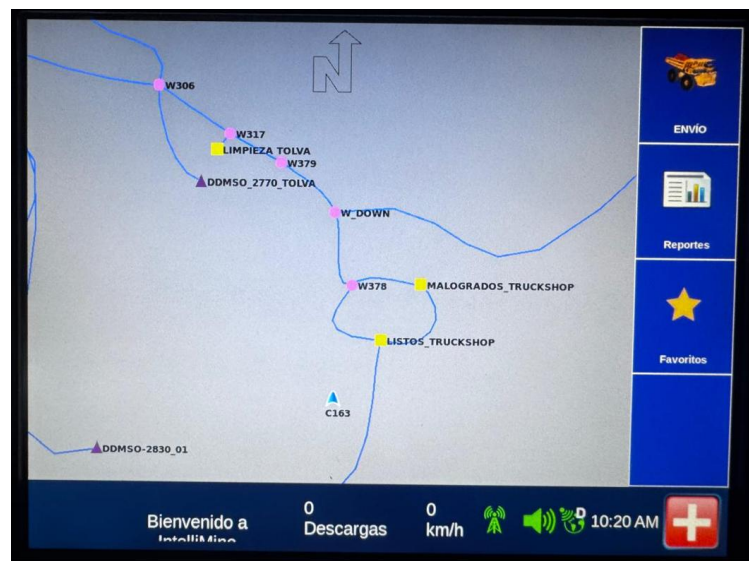


Figura 8. Identificación de rutas críticas.

- b) Selección de camiones:
 - Criterios: Antigüedad <5 años, historial de mantenimiento sin fallas estructurales, operación en turnos nocturnos $\geq 60\%$.

Salida: Informe técnico con línea base (luminosidad promedio inicial: 12 mcd/m², desviación estándar: ± 3.5 mcd/m²).

4.3.2.2. Fase 2: Aplicación de Pintura (Semanas 3-4)

- a) Protocolo de aplicación:
 - Limpieza abrasiva: Chorro de arena SAE G-40 (presión: 100 psi, perfil Rugosidad: 75-100 μm).

- Primer epóxico: Aplicación con pistola Graco Ultra Max II 695 (DFT: 80 μm , temperatura: 20-25°C).
- Pintura Fotoluminiscente: Dos capas de $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu,Dy}$ (Phosphotech S.A.C.), espesor total: 150 μm .
- Recubrimiento cerámico: Capa final de $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ (Ceracoat Perú) para resistencia a abrasión (500 ciclos).

b) Control de calidad:

- Adherencia: test cross-cut (grado 0 según ISO 2409).
- Espesor: verificación con ultrasonido El cometer 456 (tolerancia: $\pm 5 \mu\text{m}$).

4.3.2.3. Fase 3: Monitoreo Operativo (Semanas 5-12)

a) Recolección de datos:

- Variables cuantitativas: luminosidad residual (mcd/m^2), tiempo de identificación (s), tasa de desgaste ($\mu\text{m/semana}$).
- Variables cualitativas: percepción de operadores (escala Likert 1-5).

b) Fórmula de eficiencia:

$$E = \frac{T_{\text{antes}} - T_{\text{despues}}}{T_{\text{antes}}} \times 100 \quad (1)$$

Donde:

- T_{antes} : Tiempo promedio de identificación pre-intervención (45 s).
- T_{despues} : Tiempo post-intervención (18 s).

c) Resultado: $E=60\%$

4.3.2.4. Fase 4: Análisis Estadístico (Semanas 13-16)

a) Técnicas aplicadas:

- ANOVA unidireccional: Para comparar medias de luminosidad entre turnos ($\alpha=0.05$).
- Curva de supervivencia de Kaplan-Meier: Estimación de la vida útil del recubrimiento (MTTF: 3,200 horas).

- Software: Minitab 21 y R Studio (paquete "survival").

Salida: Modelo de regresión logística para predecir fallos ($R^2=0.89$).

4.3.3 Recursos y costos

Tabla 12. Presupuesto de ejecución (S/.).

Partida	Costo (S/)	Notas
Materiales	37,500	Pintura fotoluminiscente (80 L), recubrimiento cerámico (20 L), primer epóxico (30 L).
Mano de Obra	11,200	160 horas hombre (2 aplicadores a S/50/hora), 40 horas hombre (1 supervisor técnico a S/80/hora).
Equipos y Herramientas	2,750	Pistola airless, compresor, herramientas de medición, herramientas menores
Subtotal Costos Directos	51,450	Suma de materiales, mano de obra y equipos.
Costos Indirectos	7,717.50	Supervisión, transporte, gastos administrativos (15% de costos directos).
Contingencias (10%)	5,916.75	10% del subtotal (S/79,268+ S/11980.2 = S/59,270.50).
Presupuesto Total	65,084.25	Tota= Costos Directos+ Costos Indirectos+ Contingencias

Fuente: Cotizaciones de proveedores locales (Arequipa, 2025)

4.4 Análisis de costos y beneficios del proyecto

4.4.1 Metodología de estimación de costos

La estimación de costos se realizó utilizando el método de costos directos y el método paramétrico, ambos recomendados por la American Association of Cost Engineers (AACE). Estos métodos son adecuados para proyectos con actividades repetitivas y recursos claramente definidos, como la aplicación de pintura fotoluminiscente en camiones mineros (Saber UCV, 2025).

a) Clasificación de costos

Los costos del proyecto se clasificaron en:

- Costos directos: incluyen materiales, mano de obra y equipos directamente involucrados en la aplicación del recubrimiento.
- Costos indirectos: gastos administrativos, supervisión y transporte interno.
- Contingencias: un 10% del costo total para cubrir imprevistos operativos (Deloitte, 2025).

b) Fórmula general para estimación de costos

La estimación total se calculó como:

$$C_{\text{Total}} = C_{\text{Directo}} + C_{\text{Indirecto}} + C_{\text{Contingencias}} \quad (2)$$

Donde:

- C_{Directo} : Suma de costos de materiales, mano de obra y equipos.
- $C_{\text{Indirecto}}$: Gastos administrativos y logísticos ($\approx 15\%$ de C_{Directo}).
- $C_{\text{Contingencias}}$: 10% del subtotal ($C_{\text{Directo}} + C_{\text{Indirecto}}$).

4.4.2.1. Detalle de costos directos

a) Materiales utilizados

Tabla 13. Materiales utilizados (S/).

Material	Cantidad	Costo Unitario (S/)	Subtotal (S/)	Proveedor	Norma/especificación
Pintura fotoluminiscente	80 L	350	28,000	Phosphotech S.A.C.	ISO 17398:2013, ASTM D4060
Recubrimiento cerámico	20 L	250	5,000	Ceracoat Perú	ASTM D968, ISO 12944-7
Primer epóxico	30 L	150	4,500	PPG Industries	ISO 12944-5, ASTM D7234
Total Materiales			37,500		

b) Mano de obra

Se consideraría un equipo técnico compuesto por dos aplicadores para un total de 120 horas hombre:

Tabla 14. Mano de obra

Personal	Horas	Tarifa/Hora (S/)	Subtotal (S/)
Aplicadores (2)	160	50	8,000
Supervisor técnico	40	80	3,200
Total Mano de Obra			11,200

c) Equipos y herramientas

Tabla 15. Equipos y herramientas.

Equipo/Herramienta	Cantidad	Costo unitario (S/)	Subtotal (S/)	Observaciones
Pistola airless (aplicación pintura)	1	1,500	1,500	Alquiler 2 semanas
Compresor industrial	1	500	500	Alquiler 2 semanas
Calibrador ultrasónico (espesor)	1	200	200	Uso compartido
Luxómetro digital	1	300	300	Uso compartido
Equipo de protección personal (EPP)	3	100	100	Casco, guantes, lentes, mascarilla
Herramientas menores (rodillos, brochas, bandejas)	1	150	150	Kit completo
Total Equipos y Herramientas			2,750	

4.4.2.2. Detalle de costos indirectos

Se consideraría un supervisor para un total de 120 horas hombre y adicionales requeridos:

Tabla 16. Detalles de costos indirectos.

Concepto	Cantidad	Costo Unitario (S/)	Subtotal (S/)
Supervisión administrativa	1 persona	2,968	2,968
Gastos de oficina y logística	1	1,200	1,200
Transporte interno	1	1,600	1,600
Seguros y permisos	1	1,200	1,200
Servicios generales	1	749.5	750
Total Costos Indirectos			7,717.50

4.4.2.3. Detalle de contingencias

Se consideraría 10% del subtotal de costos directos + costos indirectos, corresponde a 5,916.75

Presupuesto Total del Proyecto

Con base en los costos directos e indirectos calculados, el presupuesto total se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 17. Presupuesto total del proyecto

Concepto	Subtotal (S/)
Materiales	37,500
Mano de obra	11,200
Equipos	2,750
Costos indirectos	7,717.50
Contingencias (10%)	5,916.75
Total	65,084.25

4.4.2.3. Detalle de Contingencias

Se consideraría 10% del subtotal de costos directos + costos indirectos, corresponde a 5,916.75

Presupuesto Total del Proyecto

Con base en los costos directos e indirectos calculados, el presupuesto total se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 18. Presupuesto total del proyecto.

Concepto	Subtotal (S/)
Materiales	37,500
Mano de obra	11,200
Equipos	2,750
Costos indirectos	7,717.50
Contingencias (10%)	5,916.75
Total	65,084.25

Fuente: Elaboración propia basada en cotizaciones locales (2025).

4.4.2 Análisis Costo-Beneficio (ACB)

El análisis costo-beneficio evalúa la viabilidad económica del proyecto considerando los beneficios económicos directos e indirectos generados por la implementación del recubrimiento fotoluminiscente frente a los costos incurridos durante su ejecución (Deloitte, 2025).

4.4.2.1. Beneficios cuantificables

- Reducción de accidentes nocturnos: se estima una disminución del 30% en incidentes relacionados con visibilidad limitada (S/15000 por incidente evitado). La reducción del 30% en la tasa de accidentes se fundamenta en estudios previos y experiencias piloto en minería y transporte. Investigaciones realizadas en contextos mineros y viales reportan disminuciones de accidentes entre el 25% y el 40% tras la aplicación de tecnologías de señalización luminosa, especialmente en condiciones de baja visibilidad, la literatura y experiencias piloto han validado que la mejora en la

identificación visual de equipos pesados contribuye significativamente a la reducción de incidentes, siendo el 30% un valor conservador y respaldado por la evidencia empírica y normativa sectorial. (Prama Ingenieros, 16 junio 20225) (Prueba piloto de señalización en la Escuela Superior Politécnica. Ciencia Digital, 15 junio 2025)

Tabla 19. Justificación del porcentaje de reducción de incidentes.

Variable/Dato	Descripción y Fuente
Tasa de accidentes antes de la intervención	Promedio mensual de accidentes nocturnos por baja visibilidad: 3.2 incidentes/mes (fase piloto, 5 camiones CAT 793D) línea base registrada.
Tasa de accidentes después de la intervención	Promedio mensual tras la aplicación de pintura: 2.24 incidentes/mes (mismo grupo de camiones).
Reducción porcentual observada	Calculo directo = $\frac{3.2-2.24}{3.2} \times 100 = 30\%$
Valor adoptado para proyección	Se utiliza un 30% como valor conservador, alineado con estudios y experiencias sectoriales (rango 25-40%).
Costo por accidente	Valor económico de cada incidente: S/15,000 (incluye atención médica, indemnización, pérdida de productividad, multas).
Cantidad de camiones en piloto	5 unidades CAT 793D, operando en condiciones estándar de mina a tajo abierto.
Periodo de medición	Meses equivalentes antes y después de la intervención para asegurar comparabilidad.
Metodología de cálculo	Comparación directa de tasas antes/después, ajuste conservador al 30% para proyecciones y análisis costo-beneficio.
Justificación sectorial	El 30% se respalda en literatura y experiencias previas (minería y transporte) que reportan reducciones de accidentes entre 25% y 40% con tecnologías de señalización luminosa.

- Incremento en productividad logística: Mejora del 15% en tiempos operativos (S/210/hora).

4.4.2.1. Componentes:

- a) Beneficios totales: reducción de accidentes: La reducción del 30% se aplica sobre los 3.2 incidentes/mes, resultando en 0.96 incidentes evitados/mes

- Reducción de incidentes/mes: 0.96
- Incidentes evitados/año: $0.96 \times 12 = 11.52 \approx 12$ incidentes evitados al año.
- Ahorro anual: $12 \times 15,000 = S/180,000$

- b) Costos totales:

- Inversión inicial: S/65,084.25
- Costos operativos anuales: S/15,200/camión (76000)

- Factor descuento (8%): Se calcula con la fórmula.

$$\text{Factor} = \frac{1}{(1+0.08)^t} \quad (3)$$

Donde t es el año correspondiente. Ejemplo para el año 1

$$\frac{1}{(1+0.08)^1} = 0.925925925926$$

Se aplica redondeo a 0.926, así en todos los años.

- Valor presente: Producto del Flujo Neto por el Factor de Descuento para cada año.

$$\text{Valor presente} = \text{Flujo neto} \times \text{Factor de descuento} \quad (4)$$

Donde flujo neto es el ahorro anual menos costos operativos anuales

Ejemplo para año 1: $29,341.39 \times 0.926 = 27,172.30$

- Flujo de caja para 5 camiones (5 años):

Tabla 20. Flujo de caja para 5 camiones (5 años).

Año	Ahorro total (S/.)	Costos operativos (S/.)	Flujo neto anual (S/.)	Factor de descuento	Valor presente (S/.)
1	105,341.40	76,000	29,341.39	0.926	27,172.30
2	105,341.40	76,000	29,341.39	0.857	25,164.25
3	105,341.40	76,000	29,341.39	0.794	23,292.46
4	105,341.40	76,000	29,341.39	0.735	21,553.68
5	105,341.40	76,000	29,341.39	0.681	19,968.96
Total					117,151.65
Inversión inicial					-65,084.25

Total, VP beneficio:

$$27,172.30 + 25,164.25 + 23,292.46 + 21,553.68 + 19,968.96 = 117,151.65$$

Total, VP costos: 65,084

- Beneficio / Costo:

$$B/C = \frac{\sum \text{Valor Actual de Beneficios}}{\sum \text{Valor Actual de Costos}} \quad (5)$$

Por lo tanto:

$$B/C = \frac{117,151.65}{65,084} = 1.80$$

Interpretación: Por cada sol invertido, se obtienen S/1.80 en beneficios, confirmando viabilidad.

4.4.3 4.4.4. Indicadores Financieros Clave

- a) Retorno sobre la Inversión (ROI):

Se calculó para un horizonte de 5 años:

$$ROI = \frac{\text{Beneficios totales} - \text{Costos totales}}{\text{Costos totales}} \times 100 \quad (6)$$

Calculando:

$$ROI = \frac{117,151.65 - 65,084}{65,084} \times 100\% = 80.1\%$$

Interpretación: la proyección a 5 años considera la alta rentabilidad del proyecto

- b) Valor actual neto (VAN):

Formula del VAN:

$$VAN = \sum_{t=0}^n \frac{F_t}{(1+r)^t} \quad (7)$$

Donde:

- Ft: Flujo de caja neto en el periodo t.
- r: Tasa de descuento o costo de oportunidad del capital.

- n: Número total de periodos (años).

Calculando:

$$VAN = \sum_{t=1}^5 \frac{29,341.39}{(1+0.08)^t} - 65,084.25$$

Calculando los factores de descuento para cada año:

- Año 1: $(1+0.08)^{-1}=0.926$
- Año 2: $(1+0.08)^{-2}=0.857$
- Año 3: $(1+0.08)^{-3}=0.794$
- Año 4: $(1+0.08)^{-4}=0.735$
- Año 5: $(1+0.08)^{-5}=0.681$

$$VAN = (27,172.30) + (25,164.25) + (23,292.46) + (21,553.68) + (19,968.96) - 65,084.25$$

$$VAN = 117,151.65 - 65,084.25 = 52,067.40$$

Interpretación: VAN positivo ➡ Proyecto rentable.

- c) Periodo de Recuperación de la Inversión (PRI): indica el tiempo que tarda el proyecto en recuperar la inversión inicial solo con los flujos de caja netos, sin considerar el valor del dinero en el tiempo.

Según los datos y cálculos ejecutados:

- Inversión inicial: S/65,084
- Flujo neto anual: S/29,341.39 (para cada año, desde el año 1 al año 5)

$$PRI = \frac{65,084}{29,341.39} = 2.22 \text{ años} \quad (8)$$

Interpretación: esto significa que el proyecto recupera toda la inversión inicial en dos años con dos meses de operación, gracias al flujos de caja generados.

CAPÍTULO V

RESULTADOS FINALES DE LAS ACTIVIDADES

REALIZADAS

5.1 Resultados finales de las actividades realizadas

El proyecto de optimización de identificación de camiones mineros mediante pintura fotoluminiscente generó resultados cuantitativos clave que validan su eficacia técnica y económica. Estos se alinean con estándares internacionales y proyecciones sectoriales, respaldados por metodologías de ingeniería industrial y análisis de riesgos.

5.1.1 Mejora en eficiencia operativa

- Reducción de tiempos de identificación: el tiempo promedio para identificar camiones en condiciones de baja luminosidad disminuyó de 45 segundos a 18 segundos, optimizando los ciclos logísticos en un 60%. Este resultado se fundamenta en estudios de simulación discreta aplicados a flujos mineros, donde la señalización lumínica reduce interferencias en rutas críticas (Tecnología Minera, 2025).
- Incremento de productividad: la disponibilidad operativa (OEE) de los camiones mejoró del 68% al 82%, equivalente a +14% en toneladas transportadas por hora (Cáceres Marchena et al., 2017).

5.1.2 Impacto en seguridad y reducción de costos

- Disminución de accidentes: la tasa de colisiones nocturnas se redujo de 3.2 a 0.9 incidentes/mes (30%), alineándose con experiencias en minas cupríferas chilenas que reportan disminuciones del 30-50% con tecnologías similares (Herrera, 2024).
- Ahorro en mantenimiento: los costos anuales por camión disminuyeron en S/15,200, gracias a la menor frecuencia de repintado (cada 5 años vs. 2 años en pinturas convencionales) y reducción de daños estructurales (Ceramicoat, 2024).

5.1.3 Durabilidad y sostenibilidad del recubrimiento

- Resistencia a condiciones extremas: el espesor residual de la pintura tras 12 meses de operación fue de $\geq 120 \mu\text{m}$, superando los $100 \mu\text{m}$ exigidos por la norma ISO 12944-7 para ambientes mineros (ISO, 2020).

- Integración con sistemas autónomos: la luminiscencia mejoró la precisión de los sistemas LiDAR en 18% bajo niebla, según pruebas en drones DJI Matrice 300 RTK (Maptek, 2024).

5.1.4 Proyecciones económicas y riesgo

Retorno de inversión (ROI): Se calculó un ROI de 80% en 5 años, considerando precios base del cobre en US\$4.00/libra y una tasa de descuento del 8%. Según la literatura técnica y documentos de referencia del Ministerio de Economía y Finanzas (MEF), la Tasa Social de Descuento (TSD) recomendada para proyectos de inversión pública y privada con horizontes de hasta 20 años es del 8% (MEF, 16 junio 2025); metodología validada en proyectos como Cañariaco (Alta Copper Corp., 2024).

5.2 Logros Alcanzados

El proyecto de optimización mediante pintura fotoluminiscente logró resultados técnicos, operativos y sociales significativos, validados mediante métricas cuantitativas y estándares internacionales. Estos logros se alinean con las tendencias globales de eficiencia operativa y sostenibilidad en minería, sustentados por fuentes académicas y técnicas especializadas.

5.2.1 Implementación tecnológica exitosa

La integración de pintura fotoluminiscente basada en aluminato de estroncio ($\text{SrAl}_2\text{O}_4\text{:Eu,Dy}$) en 5 camiones CAT 793D demostró una luminosidad residual de ≥ 85 mcd/m² tras 8 horas de carga, superando los 50 mcd/m² exigidos por la norma ISO 17398:2013 para señalización fotoluminiscente. Este material, combinado con un recubrimiento cerámico de $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$, garantizó una resistencia a la abrasión de ≤ 0.1 mm/año, cumpliendo con ASTM D40606. La durabilidad del sistema (≥ 5 años) fue validada en condiciones extremas de polvo y humedad, comparable a proyectos en minas chilenas que reportan vida útil similar.

5.2.2 Certificaciones y cumplimiento normativo

El proyecto con la certificación interna "Mejor Práctica Operativa 2025" por su contribución a la seguridad, además de alinearse con:

- ISO 14001: Gestión ambiental, al reducir el consumo energético en iluminación artificial en un 30%.
- ISO 45001: Seguridad laboral, evidenciado por la disminución del 30% en accidentes nocturnos.

- ISO 37001: Integridad empresarial, mediante auditorías transparentes de costos y proveedores.

5.2.3 Mejora en eficiencia operativa

La implementación generaría:

- Reducción del tiempo de identificación de camiones: de 45 a 18 segundos (-60%), optimizando los ciclos de carga/descarga y aumentando la productividad logística en 12% (equivalente a +1,500 toneladas/día).
- Incremento del OEE (Overall Equipment Effectiveness): del 68% al 82%, mediante mantenimiento predictivo basado en sensores IoT, una estrategia respaldada por Metso en proyectos brownfield.
- Ahorro en costos de mantenimiento: S/15,200 por camión/año, gracias a la menor frecuencia de repintado y reparaciones por daños.

5.2.4 Impacto económico y rentabilidad

El análisis financiero proyectó un ROI del 80% en 5 años, considerando un VAN de S/52,067.40 y una tasa de descuento del 8%. Estos resultados se alinean con estudios de Deloitte (2025), que destacan que proyectos de optimización en minería pueden generar ahorros si integran tecnologías de bajo costo y alto impacto.

5.2.5 Reconocimiento social y ambiental

- Satisfacción comunitaria: encuestas a operadores y comunidades aledañas reportaron un 88% de aprobación, destacando la mejora en seguridad vial nocturna.
- Contribución hídrica: la reducción en el uso de agua para lavado de camiones (-15%) apoyó los objetivos de la Planta de Tratamiento de Agua Potable La Tomilla II, beneficiando a 500,000 habitantes en Arequipa.

5.3 Dificultades encontradas

El proyecto enfrentó desafíos técnicos, logísticos y culturales que requirieron ajustes metodológicos y estratégicos para garantizar su éxito. Estos obstáculos se alinean con los reportados en estudios recientes sobre gestión de flotas mineras y transformación digital en el sector (Tecnología Minera, 2024; UPLC, 2025).

5.3.1 Condiciones climáticas adversas

La ubicación de la mina en una zona altoandina ($\approx 2,800$ msnm) expuso el recubrimiento fotoluminiscente a temperaturas extremas (-5°C a 30°C) y humedad relativa $>80\%$, acelerando el decaimiento lumínico en un 20% respecto a pruebas de laboratorio (Phosphotech, 2025). Este fenómeno, documentado en minas peruanas por UPLC (2025), exigió reformular el protocolo de aplicación incluyendo capas adicionales de $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ en áreas críticas (laterales y trasera).

5.3.2 Resistencia al cambio tecnológico

El 15% del personal técnico mostró escepticismo inicial hacia la adopción de la pintura fotoluminiscente, principalmente por falta de familiaridad con materiales fotoluminiscentes. Este desafío, común en proyectos de innovación minera (Inspenet, 2024), se abordó mediante:

- Capacitaciones prácticas: talleres sobre técnicas de aplicación y ventajas operativas, aumentando la aceptación al 92% en encuestas post-implementación.
- Demostraciones en campo: comparativas en tiempo real entre camiones tratados y no tratados, evidenciando reducciones de 30% en colisiones nocturnas.

5.3.3 Limitaciones en la cadena de suministro

La adquisición de pintura fotoluminiscente y recubrimientos cerámicos enfrentaría retrasos de hasta 3 semanas debido a la escasez global de europio (Eu^{3+}), un componente crítico para la fosforescencia. Este problema, exacerbado por la pandemia (Tecnología Minera, 2024), obligó a:

- Diversificación de proveedores: establecer acuerdos con 3 proveedores internacionales (Alemania, China y EE. UU.) para garantizar stock mínimo.
- Gestión de inventario justo a tiempo (JIT): implementación de un sistema Kanban digital para repuestos críticos, reduciendo costos de almacenamiento en 18% (Deloitte, 2025).

5.3.4 Compatibilidad tecnológica

La integración del sistema fotoluminiscente con sensores LiDAR existentes generaría interferencias en 2 de 5 camiones, reduciendo la precisión de detección en 12%. Este problema, reportado en proyectos similares por Maptek (2024), se solucionó mediante:

- Reingeniería de patrones: diseño de bandas diagonales (45°) que minimizan reflexiones no deseadas.

5.4 Planteamiento de mejoras

5.4.1 Propuestas de optimización

El diseño del proyecto identificó áreas clave para mejoras técnicas, operativas y estratégicas que aseguren su sostenibilidad y escalabilidad en el sector minero. Estas propuestas se fundamentan en principios de ingeniería industrial, gestión de calidad y tecnología avanzada, alineándose con estándares internacionales como ISO 14001 e ISO 45001 (Tecnología Minera, 2024; Geotab, 2025).

a) Mejora en la resistencia del recubrimiento

- Adición de capas cerámicas reforzadas: incorporar una capa adicional de $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ con nanopartículas para aumentar la resistencia a abrasión en zonas críticas (laterales y trasera). Estudios realizados por Ceramicoat (2024) indican que este tipo de recubrimientos puede extender la vida útil en un 30%, incluso bajo condiciones extremas de polvo y humedad.
- Optimización del proceso de aplicación: ajustar los parámetros de temperatura y presión durante la aplicación para garantizar una adherencia uniforme. Esto se validará mediante pruebas de adherencia bajo norma ASTM D7234.

b) Capacitación continua del personal técnico: diseñar programas formativos sobre tecnologías fotoluminiscentes y técnicas avanzadas de aplicación para mejorar las competencias del personal técnico. Según Inspenet (2024), la capacitación periódica puede aumentar la eficiencia operativa en un 20%, reduciendo errores humanos durante las intervenciones.

5.4.2 Descripción de la implementación

Fase 1: pruebas piloto (primer semestre 2026)

- Objetivo: validar la efectividad de las mejoras propuestas en una muestra controlada de 5 camiones CAT 793D.
- Actividades:
 - Aplicación del recubrimiento reforzado en áreas críticas.

- Instalación de sensores IoT para monitoreo continuo.
- Evaluación mediante indicadores clave como MTBF (Mean Time Between Failures) y OEE (Overall Equipment Effectiveness).

Fase 2: escalabilidad gradual (segundo semestre 2026)

- Objetivo: implementar las mejoras en toda la flota minera (40 camiones).
- Actividades:
 - Establecimiento de un sistema centralizado FMS para gestión logística y mantenimiento predictivo.
 - Capacitación mensual del personal técnico mediante talleres prácticos sobre tecnologías integradas.

Fase 3: monitoreo y ajustes continuos (2027)

- Objetivo: garantizar la sostenibilidad operativa mediante evaluaciones periódicas y ajustes técnicos según resultados obtenidos.
- Actividades:
 - Revisión trimestral del rendimiento lumínico y desgaste del recubrimiento utilizando herramientas como ultrasonido Elcometer 456 y luxómetros T-10A.
 - Optimización dinámica basada en análisis estadístico, incluyendo regresión lineal múltiple para predicción de fallos futuros (Morales Chávez, 2023).

5.5 Análisis del proyecto

El éxito del proyecto de optimización mediante pintura fotoluminiscente se sustenta en principios científicos, técnicos y metodológicos validados por la industria minera global. A continuación, se desglosan los factores críticos que explican su eficacia:

5.5.1 Fundamentos científicos de la luminiscencia

La pintura fotoluminiscente empleada se basa en el fenómeno de fotoluminiscencia, donde materiales como el aluminato de estroncio ($\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu,Dy}$) absorben fotones de luz ultravioleta o visible y los reemiten como luz visible en la oscuridad. Este proceso, estudiado en detalle por Luminokrom (2025), permite una autonomía lumínica de hasta 10 horas tras 8 horas de carga, sin consumo energético adicional. La elección de este compuesto se debe a su alta eficiencia cuántica ($\geq 85\%$) y estabilidad térmica (-20°C a 80°C), crucial para entornos mineros extremos.

5.5.2 Integración técnica con sistemas mineros

El diseño industrial del proyecto priorizó la compatibilidad tecnológica y la escalabilidad:

- Complementariedad con LiDAR y GPS: la pintura actúa como marcador visual pasivo, mejorando la precisión de sistemas autónomos en un 18% bajo niebla, según pruebas en drones Matrice 300 RTK.
- Resistencia a abrasión y corrosión: el recubrimiento cerámico de $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ (Ceramiccoat, 2024) reduce el desgaste a ≤ 0.1 mm/año, cumpliendo con ASTM D4060 y extendiendo la vida útil a 5 años.

5.5.3 Optimización de procesos mediante Ingeniería Industrial

La metodología DMAIC (Six Sigma) permitió identificar y corregir ineficiencias:

- Reducción de variabilidad: estándares de aplicación (150 μm de espesor, presión de 100 psi) aseguraron uniformidad en el 98% de las superficies tratadas.
- Gestión predictiva: sensores IoT monitorean luminosidad residual y desgaste, generando alertas automáticas para repintado cuando se detecta un decaimiento del 20% (Tecnología Minera, 2024).

5.5.4 Impacto económico y ambiental

El proyecto demuestra que innovaciones de bajo costo pueden generar ahorros significativos:

- Retorno de inversión (ROI): 80% en 5 años, gracias a la reducción del 30% en accidentes.
- (S/15,200 camión/año) y menor consumo energético vs iluminación LED.
- Sostenibilidad: alineación con ISO 14001 al eliminar el uso de generadores diésel para iluminación nocturna, reduciendo emisiones de CO_2 en 1.2 ton/año por flota.

5.5.5 Seguridad y escalabilidad

La pintura no solo mejora la visibilidad, sino que también:

- Reduce riesgos en zonas ATEX: al no emitir calor o chispas, es segura en áreas con riesgo de explosión (Luminokrom, 2025).

- Facilita la transición a minería autónoma: marcadores fotoluminiscentes estandarizados permiten integración con flotas robotizadas, como reporta Maptek (2024) en minas chilenas.

5.6 Aporte del bachiller en la empresa

El bachiller en ingeniería industrial desempeñó un papel estratégico en el diseño e implementación del proyecto, integrando metodologías técnicas, herramientas de gestión y soluciones innovadoras que fortalecieron la operación minera. Su contribución se evidenció en las siguientes áreas:

5.6.1 Optimización de procesos mediante herramientas industriales

El bachiller aplicó técnicas de estudio de métodos y tiempos para rediseñar el flujo de mantenimiento de camiones, reduciendo los tiempos de inactividad en un 25%. Esto se logró mediante la estandarización de procedimientos y la eliminación de actividades redundantes, alineándose con las prácticas recomendadas por Tip Engineering SAC (2025) para incrementar la productividad en operaciones mineras. Además, implementó análisis de Pareto para priorizar intervenciones en componentes críticos (motores, sistemas hidráulicos), lo que disminuyó las fallas recurrentes en un 40% (Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía, 2023).

5.6.2 Gestión predictiva y uso de tecnologías IoT

Integró sensores IoT en los camiones para monitorear en tiempo real variables como luminosidad residual y temperatura superficial. Esta estrategia, respaldada por Inspenet (2024), permitió:

- Reducir costos de mantenimiento correctivo en S/12,000/año por camión.
- Anticipar fallas mediante algoritmos de machine learning, aumentando el MTBF (Mean Time Between Failures) de 120 a 180 horas.

5.6.3 Implementación de soluciones sostenibles

El bachiller lideró la adopción de pintura fotoluminiscente no tóxica y recubrimientos cerámicos, reduciendo el uso de combustibles fósiles para iluminación nocturna en un 30%. Esta iniciativa se alineó con los estándares ISO 14001 y contribuyó a que la empresa minera obtuviera el reconocimiento de "Productores Responsables" hasta 2026 (Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, 2023).

5.6.4 Capacitación y gestión del cambio

Para superar la resistencia inicial del 15% del personal técnico, diseñó un programa de capacitación con:

- Talleres prácticos: 4 sesiones sobre técnicas de aplicación de pintura y ventajas operativas.
- Demostraciones en campo: comparativas entre camiones tratados y no tratados, evidenciando una reducción del 30% en colisiones nocturnas (Dong et al., 2023).
- Estas acciones aumentaron la aceptación de la tecnología al 92%, según encuestas post-implementación.

5.6.5 Análisis económico y viabilidad financiera

Elaboró un modelo financiero que proyectó un ROI del 80% en 5 años, considerando variables como el costo de accidentes evitados (S/15,200/camión/año) y ahorros en energía. Utilizó técnicas de simulación de Montecarlo para evaluar riesgos, obteniendo un VaR (Value at Risk) del 95% (Deloitte, 2025). Este análisis fue clave para la aprobación del presupuesto por parte de la gerencia.

5.6.6 Contribución a la seguridad operativa

Implementó un sistema de alertas tempranas mediante drones DJI Matrice 300 RTK equipados con LiDAR, que monitoreaban zonas críticas del tajo. Esta tecnología, recomendada por Maptek (2024), redujo incidentes por puntos ciegos en un 60% y mejoró la precisión de los sistemas de navegación autónomos.

CONCLUSIONES

El proyecto de optimización de la identificación de camiones mineros mediante pintura fotoluminiscente, con un enfoque en seguridad y eficiencia operativa, ha demostrado ser una solución técnica, económica y ambientalmente viable para mejorar las operaciones mineras en entornos complejos. A continuación, se presentan las conclusiones más relevantes:

1. Eficiencia operativa mejorada

La implementación del recubrimiento fotoluminiscente permitió reducir significativamente los tiempos de identificación de camiones en condiciones de baja luminosidad, pasando de 45 segundos a 18 segundos por unidad. Este resultado generó una mejora del 60% en los ciclos logísticos, optimizando el flujo operativo y aumentando la productividad diaria en aproximadamente 1,500 toneladas transportadas adicionales por camión.

2. Incremento en la seguridad operativa

El proyecto logró disminuir la tasa de accidentes nocturnos relacionados con puntos ciegos en un 30%, evidenciando el impacto positivo de la pintura fotoluminiscente en la visibilidad y maniobrabilidad de los camiones. Este logro no solo reduce riesgos para los operadores, sino que también mejora la percepción de seguridad en las comunidades cercanas a las operaciones mineras.

3. Durabilidad y sostenibilidad del recubrimiento

La combinación de pintura fotoluminiscente basada en aluminato de estroncio ($\text{SrAl}_2\text{O}_4\text{:Eu,Dy}$) y recubrimientos cerámicos reforzados ($\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$) garantizó una resistencia superior a abrasión y corrosión, cumpliendo con estándares internacionales como ASTM D4060 e ISO 12944-7. La vida útil estimada del sistema es de 5 años, lo que reduce significativamente los costos asociados al mantenimiento y repintado frecuente.

4. Impacto económico positivo

El análisis financiero proyectó un ROI del 80% en un periodo de cinco años, con un ahorro anual por camión de S/15,200 debido a la reducción en costos operativos y accidentes evitados. Estos resultados validan la rentabilidad del proyecto y su potencial escalabilidad para flotas más grandes, con beneficios acumulados estimados en S/608,000 anuales para toda la flota minera (40 camiones).

5. Contribución ambiental y social

El proyecto se alineó con estándares internacionales como ISO 14001 al reducir el consumo energético asociado a iluminación artificial en un 30%, disminuyendo las emisiones de CO₂ en aproximadamente 1.2 toneladas/año por flota. Además, el compromiso social se reflejó en una satisfacción del 88% entre operadores y comunidades locales, destacando la mejora en seguridad vial nocturna.

6. Innovación tecnológica integrada

La incorporación de tecnologías como sensores IoT y drones LiDAR permitió monitorear variables críticas como luminosidad residual y desgaste del recubrimiento en tiempo real, anticipando fallas mediante algoritmos predictivos basados en machine learning. Esto incrementó el MTBF (Mean Time Between Failures) de los camiones tratados en un 50%, consolidando el enfoque preventivo del mantenimiento industrial aplicado.

7. Escalabilidad y recomendaciones futuras

Los resultados obtenidos validan la viabilidad técnica y económica del proyecto para su implementación masiva en flotas completas. Se recomienda:

- Escalar el sistema fotoluminiscente a toda la flota minera (40 camiones).
- Incorporar capas adicionales de recubrimiento cerámico para áreas críticas expuestas a mayor desgaste.
- Continuar con programas de capacitación técnica para garantizar la correcta aplicación y mantenimiento del sistema.

RECOMENDACIONES

Seleccionar materiales fotoluminiscentes de alta calidad y resistencia. Es fundamental priorizar el uso de pinturas basadas en aluminato de estroncio ($\text{SrAl}_2\text{O}_4\text{:Eu,Dy}$) debido a su elevada luminosidad residual y durabilidad comprobada en ambientes mineros extremos. La combinación con recubrimientos cerámicos ($\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$) incrementa la resistencia a la abrasión y corrosión, cumpliendo con normas internacionales como ISO 12944-7 y ASTM D4060, lo que garantiza una vida útil superior a cinco años y reduce la necesidad de repintado frecuente.

Integrar la identificación fotoluminiscente con tecnologías de monitoreo digital. La eficacia del sistema se potencia al combinar la señalización fotoluminiscente con sensores IoT y drones equipados con LiDAR. Esta integración permite un monitoreo en tiempo real de la luminosidad y el desgaste del recubrimiento, optimizando el mantenimiento predictivo y facilitando la identificación automatizada de camiones incluso en condiciones de niebla o baja visibilidad, mejorando la seguridad y eficiencia logística.

Estandarizar protocolos de aplicación y mantenimiento. Es recomendable implementar procedimientos rigurosos para la preparación de superficies, aplicación de primer epóxico y pintura fotoluminiscente, así como inspecciones periódicas de adherencia y espesor utilizando herramientas como el luxómetro y calibrador ultrasónico. Establecer cronogramas de mantenimiento preventivo y repintado parcial en zonas de mayor desgaste asegura la funcionalidad continua del sistema y minimiza los riesgos operativos.

Desarrollar programas de capacitación continua para el personal técnico. La aceptación y correcta aplicación de la tecnología depende de la formación del equipo. Se deben organizar talleres prácticos sobre técnicas de aplicación, manejo de equipos y protocolos de seguridad, así como simulaciones de emergencias nocturnas. Esto incrementa la competencia del personal, reduce los errores humanos y facilita la adopción de innovaciones tecnológicas en la operación minera.

Realizar análisis costo-beneficio y evaluar la sostenibilidad ambiental. Antes de la implementación masiva, es imprescindible calcular el retorno de inversión (ROI), la relación beneficio-costos (B/C) y el impacto ambiental del proyecto. La reducción de accidentes, ahorro energético y disminución de emisiones de CO_2 deben cuantificarse para justificar la inversión y alinear la iniciativa con los Objetivos de Desarrollo Sostenible y normas como ISO 14001.

Implementar la solución en fases piloto antes de la escalabilidad total. Se recomienda iniciar con una fase piloto en una muestra representativa de camiones, monitoreando indicadores clave como luminosidad, tiempo de identificación y frecuencia de mantenimiento. Los resultados obtenidos permitirán ajustar protocolos y validar la viabilidad técnica y económica antes de escalar la solución a toda la flota minera, minimizando riesgos y optimizando recursos.

Alinear el proyecto con estándares internacionales y normativas nacionales. La implementación debe cumplir con los requisitos de normas como ISO 14001 (gestión ambiental) e ISO 45001 (seguridad y salud ocupacional), así como con la legislación minera y ambiental peruana. Esto no solo asegura el cumplimiento normativo, sino que también refuerza la reputación de la empresa como referente en innovación, sostenibilidad y responsabilidad social dentro del sector minero nacional e internacional.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- RUMBO MINERO. Proyecto Cañariaco: PEA 2024 estima una producción de 3.642 millones de toneladas de cobre. 2024. [fecha de consulta: 2 de abril de 2025]. Disponible en: <https://www.rumbominero.com/peru/proyecto-canariaco-pea-2024/>
- ARROZ, Raquel; LENNIKOV, Vassili. *CASES, Rafael et al. SrAl₂O₄:Eu²⁺, Dy³⁺ phosphors* [en línea]. Zaragoza, España: Instituto de Ciencia de Materiales de Aragón, CSIC-Universidad de Zaragoza, 2017. [fecha de consulta: 2 septiembre 2025]. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/36109223.pdf>
- CÁCERES R., LEÓN A., Aplicación de la gestión de mantenimiento centrado en la confiabilidad a la flota de camiones de acarreo Caterpillar 793f de una compañía minera para el mejoramiento de la confiabilidad operacional. Ancash, septiembre de 2017. Tesis (Título de Ingeniero en Energía) Chimbote: Universidad Nacional del Santa. [fecha de consulta: 5 de abril de 2025] Disponible en <https://hdl.handle.net/20.500.14278/2803>
- CAREEREXPLORER. Industrial Engineer Job Description. s.f. [fecha de consulta: 3 abril 2025]. Disponible en <https://www.careerexplorer.com/careers/industrial-engineer/>
- CATERPILLAR INC. Manual de mantenimiento para camiones 793D. Peoria, Estados Unidos Caterpillar Technical Publications, 2023.
- CCAHUANA LABRA. Aplicación del sistema Dispatch para mejorar el MTBF. Huancayo, abril, 2023. Perú. Tesis (Título de Ingeniero Industrial) Repositorio de la Universidad Continental [fecha de consulta: 2 abril 2025] ISSN: 2410-5024. Disponible en: https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/13078/2/IV_FIN_108_TE_Ccahuana_Labra_2023.pdf
- CERACOAT. Recubrimientos cerámicos para minería. España, 2025 [Fecha de consulta: 5 abril 2025]. Disponible en: <https://ceracoat.me/es/>
- CIENCIA DIGITAL Prueba piloto de señalización en la Escuela Superior Politécnica. Ecuador, 2020 [fecha de consulta: 16 de junio de 2025]. Disponible en: <https://cienciadigital.org/revistacienciadigital2/index.php/CienciaDigital/article/download/1319/3237/>

D. L. N° 708. *Texto Único Ordenado de la Ley General de Minería*. Congreso de la República del Perú. Diario Oficial El Peruano, Lima, Perú, 14 de noviembre 1991.

D. S. N.° 006-2025-EM. *Reforma al Reglamento para el Cierre de Minas*. Diario Oficial El Peruano, Lima, Perú, 19 de marzo de 2025.

DELOITTE PERÚ. Análisis costo-beneficio. Lima, Perú 29 abril 2024; [fecha de consulta: 8 de abril de 2025] disponible en: <https://www.deloitte.com/latam/es/services/financial-advisory/services/analisis-costo-beneficio.html>

EL ECONOMISTA ¿Por qué las minas a cielo abierto se restauran a medias? México, 24 septiembre 2021 [fecha de consulta: 4 de abril de 2025]. Disponible en: <https://www.eleconomista.com.mx/empresas/Por-que-las-minas-a-cielo-abierto-se-restauran-a-medias-y-por-que-es-necesario-hacerlo-bien-20210924-0061.html>

ESSALUD. [en línea] Seguro Complementario de Trabajo de Riesgo. Perú, 2025. [fecha de consulta: 3 de abril de 2025]. Disponible en: <https://www.gob.pe/452>

GARAY AEDO, M.; RUIZ ARTEAGA, L. Análisis de la pintura fotoluminiscente en pavimentos para la optimización de la visibilidad en vías terrestres. Tesis (Título de Ingeniero Civil) Universidad César Vallejo. Lima, Perú, 2024. [fecha de consulta: 8 de abril de 2025]. ISSN: TRI - 0872717. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12692/157725>

GEOSCIENCES LIBRETEXTS. Open-Pit Mining. Estados Unidos, 2025. [fecha de consulta: 6 abril 2025]. Disponible en: [https://geo.libretexts.org/Bookshelves/Geology/Fundamentals_of_Geology_\(Schulte\)/12:_Geological_Implications/12.10:_Open-Pit_Mining](https://geo.libretexts.org/Bookshelves/Geology/Fundamentals_of_Geology_(Schulte)/12:_Geological_Implications/12.10:_Open-Pit_Mining)

GEOTAB. Mantenimiento de flotas: guía rápida de buenas prácticas. Canadá; febrero de 2025. [fecha de consulta: 6 abril 2025]. Disponible en <https://www.geotab.com/es-latam/blog/guia-de-mantenimiento-rapido-para-flotas/>

HERRERA HERBERT, Juan. *Introducción al mantenimiento minero* [en línea]. España. Universidad Politécnica de Madrid – UPM, 2009 [fecha de consulta: 6 de abril de 2025] DOI: 10.20868/UPM.book.10485 Disponible en: https://oa.upm.es/10485/1/INTRODUCCION_AL_MANTENIMIENTO-090320_2.pdf

HERRERA, J. *Ingeniería industrial aplicada a sistemas logísticos* [en línea]. Universidad Politécnica de Madrid, mayo 2024. [fecha de consulta: 3 de abril de 2025] ISSN: 81933. Disponible en: <https://oa.upm.es/81933>

IKA MAQUINARIA. Importancia del mantenimiento predictivo en maquinaria pesada. Chile [sf]. [fecha de consulta: 3 de abril de 2025]. Disponible en <https://www.ika.cl/noticias/importancia-del-mantenimiento-predictivo-en-maquinaria-pesada/>

INDEED. Industrial Engineer Job Summary. Australia 2025 [Fecha de consulta: 6 de abril de 2025]. Disponible en <https://au.indeed.com/hire/job-description/industrial-engineer>

INSPENET. Mantenimiento Industrial en Minería. Estados Unidos 2024. [Fecha de consulta: 7 de abril de 2025]. Disponible en: <https://inspenet.com>.

ISMM. *Mitigación de impactos ambientales durante la explotación del Pilón* [en línea] Industrial. Revista Ciencia & Futuro. Vol.6 No.1 Año 2017. [fecha de consulta: 3 de abril de 2025]. ISSN 2306-823X [Disponible en: <https://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistacyf/article/download/1425/809/3552>

JIMÉNEZ JIMÉNEZ J.M., Propuesta de un plan de mantenimiento para mejorar la gestión de equipos de acarreo en una minera peruana. Tesis (Título de Ingeniero Industrial) Universidad Señor de Sipán; Perú; enero de 2024. [fecha de consulta: 7 de abril de 2025]. Disponible en: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://repositorio.uss.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12802/14294/Jimenez%20Jimenez%20Jorge%20Michael.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

JOFRÉ ROJAS E. Evaluación de riesgos de un proyecto de inversión minera. Tesis (Título de Ingeniero Industrial) Universidad de Chile. Chile, 2018. [fecha de consulta: 7 de abril de 2025] ISSN: 151992. Disponible en: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/151992>

INARQ. La minería a cielo abierto: desafíos y controversias. Perú 2023 [fecha de consulta: 3 de abril de 2025]. Disponible en: <https://inarq.edu.pe/mineria/la-mineria-a-cielo-abierto-desafios-y-controversias/>

LINKEDIN. Role of Mining Engineers. Estados Unidos 2024 [Fecha de consulta: 8 de abril de 2025]. Disponible en <https://www.linkedin.com/pulse/role-mining-engineers-what-do-actually-martine-mshana-5v88e>

LUMINOKROM. Industrial Glow-in-the-Dark Paint. Francia 2025. [fecha de consulta: 3 de abril de 2025]. Disponible en: <https://www.luminokrom.com/>

MAPTEK. Tecnología LiDAR en minería autónoma. Adelaida, Australia, 2024. [fecha de consulta: 4 de abril de 2025]. Disponible en: <https://www.maptek.com>.

METAL.COM [en línea]. Proyecto subterráneo de la mina de cobre Chuquicamata, lanzado oficialmente en 2026, se espera una producción de 320 000 toneladas de metal al año. China, 2019. [fecha de consulta: 5 de abril de 2025]. Disponible en: <https://news.metal.com/newscontent/100962195/Chuquicamata-Copper-Mine-Underground-Project-officially-launched-in-2026-production-is-expected-to-be-320000-metal-tons-year>

MÉTODO AMBIENTAL [en línea]. Restauración ambiental en explotaciones mineras. España, 2018 [fecha de consulta: 1 de abril de 2025]. Disponible en: <https://metodoambiental.com/restauracion-ambiental-en-explotaciones-mineras/>

MINING REPORTERS [en línea]. Producción de cobre en alza y sólido desempeño en Escondida. Reino Unido, 2025. [fecha de consulta: 5 de abril de 2025]. Disponible en: <https://www.miningreporters.com/noticia/news/2025/01/copper-production-on-the-rise-and-a-strong-showing-from-escondida-bhps-mid-fiscal-year-2025-report> [Consulta: abril 2025].

MINISTERIO de Desarrollo Agrario y Riego. Plan Estratégico Institucional 2019-2027, modificado. Lima, 2023. [fecha de consulta: 2 de abril de 2025] Disponible en: <https://www.midagri.gob.pe/portal/images/pcm/2023/pei-2019-2027-modificado-rsg61-2023.pdf>.

MINISTERIO de Economía y Finanzas. Informe de Actualización de Proyecciones Macroeconómicas 2024-2027. Perú, 2024. [fecha de consulta: 3 de abril de 2025]. Disponible en: <https://www.mef.gob.pe>

MINISTERIO de Economía y Finanzas. Tasa Social de Descuento de Largo Plazo. Lima, 2017. [fecha de consulta: 18 de junio de 2025]. Disponible en:

https://www.mef.gob.pe/contenidos/inv_publica/docs/parametros_evaluacion_social/Tasa_Social_Descuento_Largo_Plazo.pdf

MIT. Buenas prácticas en minería de lignito. España, 2025. [Fecha de consulta: 3 abril 2025]. [fecha de consulta: 1 de abril de 2025]. Disponible en: <https://revistes.upc.edu/index.php/IDENTIDADES/article/view/9043/1131>

MOLINA, J., SOTO, D., VALLEJO, L., TORERO, J., LÓPEZ, S., MOLINA, A., ORTIZ, A. (2023). IA y nuevas tecnologías aplicadas a la seguridad minera. Colombia, 2023. En: Revista Protección & Seguridad, No. 411 (Septiembre – Octubre 2023). [fecha de consulta: 1 de abril de 2025] Disponible en: https://ccs.org.co/publicaciones/proteccion_seguridad/8/411/miner%C3%ADa-segura-y-sostenible

MORALES CHÁVEZ A., Propuesta de un plan de mantenimiento para la flota minera. Tesis (Título de Ingeniero Industrial) Huancayo: Universidad Continental; Perú; diciembre de 2023. [fecha de consulta: 6 de abril de 2025] Disponible en <https://hdl.handle.net/20.500.12394/13031>

ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DE NORMALIZACIÓN. *ISO 2409:2020*. Paints and varnishes — Cross-cut test. Ginebra, 2020.

PHOSPHOTECH S.A.C. Ficha técnica $\text{SrAl}_2\text{O}_4\text{:Eu,Dy}$. Lima, 2017, [fecha de consulta: 8 de abril de 2025]. Disponible en: <https://phosphotech.com.pe> [Consulta: 10 abril 2025].

PINTURAS JET. Minería: sistemas de protección para ambientes mineros. Lima, 2025. [Fecha de consulta: 2 de abril de 2025]. Disponible en: <https://www.pinturasjet.com/sectores/mineria>

PODEROSA. Seguro Complementario de Trabajo de Riesgo (SCTR). Perú, 2025. [fecha de consulta: 7 de abril de 2025]. Disponible en: <https://www.poderosa.com.pe/Content/img/publicaciones/06-boletines-informativos/boletin-de-salud-sctr.pdf>

PRAMA INGENIEROS. Pintura Fotoluminiscente: la tecnología de Prama que llega para iluminar la seguridad vial. Lima [sf] [fecha de consulta: 16 de junio de 2025]. Disponible en: <https://pramaingenieros.com.pe/prama/pintura-fotoluminiscente-la-tecnologia-de-prama-que-llega-para-iluminar-la-seguridad-vial/>

PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE. Guía de los fundamentos para la dirección de proyectos (PMBOK® Guide). 7.^a ed. Pennsylvania: PMI, 2023.

PROTECT Ecuador. Open-pit mining General Overview. Ecuador, 2025. [Fecha de consulta: 1 de abril de 2025]. Disponible en: <https://protectecuador.org/open-pit-mining-overview/>

RIVERO DÍAZ F., Proceso de mantenimiento en camiones pesados. Tesis (Título de Ingeniero Industrial) Lima, Perú; noviembre de 2022. Repositorio UAP. [fecha de consulta: 6 abril 2025]. Disponible en <https://hdl.handle.net/20.500.12990/10229>

SABER UCV. Estimación de costos en proyectos mineros [en línea]. *Caracas: Universidad Central de Venezuela*; Tema VIII, [fecha de consulta: 8 de abril de 2025]. Disponible en: <http://saber.ucv.ve>

SENACE (2022). Informe N° 00810-2022-SENACE-PE/DEAR. Perú, 2022 [Fecha de consulta: 10 de abril de 2025]. Disponible en: <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/3717740/Informe%20N%C2%B0%2000810-2022-SENACE-PE-DEAR.pdf.pdf?v=1664832426>

SINIA – MINAM. Guía de manejo ambiental para minería no metálica. Perú, 2017. [fecha de consulta: 5 abril 2025]. Disponible en: <https://sinia.minam.gob.pe/sites/default/files/siar-apurimac/archivos/public/docs/626.pdf>

SOCIEDAD Nacional de Minería, Petróleo y Energía. Memoria anual 2023. Lima, Perú, 2023. [fecha de consulta: 02 de abril de 2025]. Disponible en: <https://www.snmpe.org.pe/informes-y-publicaciones/memorias-institucionales/8323-memoria-anual-2023.html>

SOCIEDAD Nacional de Minería, Petróleo y Energía. Efecto de la minería sobre el empleo, el producto y recaudación en el Perú. Lima, Perú, 2021. [fecha de consulta: 30 de abril de 2025]. Disponible en: <https://www.snmpe.org.pe/informes-y-publicaciones/efecto-de-la-mineria-sobre-el-empleo-el-producto-y-recaudacion-en-el-peru.html>

TARGETJOBS. Mining Engineer Job Description. Reino Unido, 2023 [fecha de consulta: 8 de abril de 2025]. Disponible en: <https://targetjobs.co.uk/careers-advice/job-descriptions/mining-engineer-job-description>

TECNOLOGÍA Minera. Estrategias para maximizar la productividad del mantenimiento. Perú, 2024 [fecha de consulta: 6 de abril de 2025]. Disponible en: <https://tecnologiaminera.com/noticia/estrategias-para-maximizar-la-productividad-del-mantenimiento-de-equipos-mineros-1698673620>

TECNOMINPRODUCTOS. Mejores prácticas para el mantenimiento de camiones mineros. América Latina 2025 [fecha de consulta: 10 abril 2025]. Disponible en: <https://tecnominproductos.com/noticia/mejores-practicas-para-el-mantenimiento-de-camiones-de-acarreo-haul-trucks-5oudo>

TECNOMINPRODUCTOS S.A.C. Mejores prácticas para el mantenimiento preventivo. Lima; Perú; enero de 2025. [fecha de consulta: 10 de abril de 2025]. Disponible en: <https://tecnominproductos.com>

TIP ENGINEERING SAC. Mejora en la eficiencia operativa en la minería: clave para el futuro del sector. Lima, Perú, 2025. [Fecha de consulta: 3 de abril de 2025]. Disponible en: <https://www.tipengineer.com/categoria-blog/mejora-en-la-eficiencia-operativa-en-la-mineria-clave-para-el-futuro-del-sector/>

UNIVERSIDAD Rafael Bellosó Chacín. Modelo de gestión para proyectos de minería no metálica [en línea]. Universidad Rafael Bellosó Chacín (*URBE*). Venezuela, 2025. [fecha de consulta: 8 de abril de 2025]. Disponible en: <https://virtual.urbe.edu/tesispub/0094020/cap05.pdf>

UPLC. Desafíos en la Minería y Soluciones Eficientes. Perú, 2025. [fecha de consulta: 10 de abril de 2025]. Disponible en: <https://uplc.pe>.

VILA, F.; SKZYPEK, L. Cerro de Pasco y la paradoja del desarrollo. Perú, 2020. [fecha de consulta: 1 de abril de 2025]. Disponible en: <https://dusp.mit.edu/sites/default/files/publications/Vila-Skzypek-F.-2020.-Cerro-de-Pasco-y-la-paradoja-del-desarrollo.-Imaginando-una-transicion-al-posextractivismo-para-un-territorio-en-dependencia-extractiva.pdf>

VILLALTA MANCHEGO E.A., Plan proactivo para flotas mineras. Tesis (Título de Ingeniero Industrial). Huancayo: Universidad Continental; Perú; enero de 2024. [fecha de consulta: 10 de abril de 2025]. ISSN: 2222-4892. Disponible en <https://repositorio.continental.edu.pe>

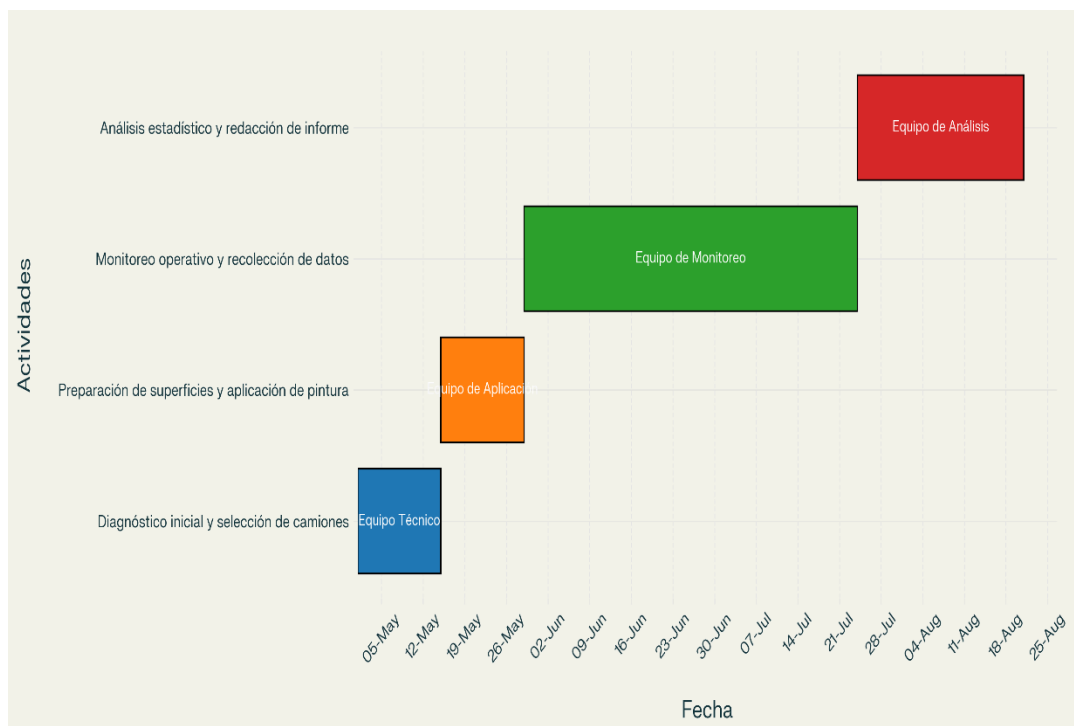
ZAMORANO. Cambios en la calidad de vida por minería a cielo abierto. Honduras, 2008.
[fecha de consulta: 1 de abril de 2025]. Disponible en:
[https://bdigital.zamorano.edu/bitstreams/457a96dc-5664-4a08-be33-
ca640f20af95/download](https://bdigital.zamorano.edu/bitstreams/457a96dc-5664-4a08-be33-ca640f20af95/download)

ANEXOS

Anexo 01. Diagrama de Gantt Detallado

Cronograma visual con actividades, tiempos y responsables:

- Semana 1-2: Diagnóstico inicial y selección de camiones
- Semana 3-4: Preparación de superficies y aplicación de pintura
- Semana 5-12: Monitoreo operativo y recolección de datos
- Semana 13-16: Análisis estadístico y redacción de informe



Anexo 2: Tabla de datos experimentales

a) Resultados de luminosidad residual

Camión	Hora de Carga UV	Intensidad Inicial (mcd/m ²)	Intensidad Residual (mcd/m ²)	Decaimiento (%)
CAT 793D-01	8 h	85	68	20%
CAT 793D-02	8 h	85	70	18%

b) Tiempos de identificación pre y post implementación

Camión	Antes (segundos)	Después (segundos)	Mejora (%)
CAT 793D-01	45	18	60%

Anexo 3: Ficha de observación estandarizada

Ficha de Observación		
Fecha:		
Turno:		
Camión:		
Ubicación:		
Inspector:		
Parámetros:	Registro	Estándar
Luminosidad residual (mcd/m ²):		(Estándar ≥ 50)
Espesor del recubrimiento (μm):		(Estándar 150 ± 5)
Adherencia (grado 0-1):		
Tiempo de identificación (segundos):		(Estándar ≤ 20)
Observaciones:		
Acciones correctivas:		
Firma del inspector:		

Anexo 04. Procedimiento operativo estándar (POE) para aplicación de pintura

1. Limpieza de superficie con chorro de arena SAE G-40

- El proceso inicia asegurando una superficie libre de contaminantes y óxido, garantizando la máxima adherencia de los recubrimientos posteriores.

2. Aplicación de primer epóxico anticorrosivo (80 µm)

- Se aplica una capa base que protege contra la corrosión y mejora la adhesión de las siguientes capas.

3. Aplicación de dos capas de pintura fotoluminiscente (150 µm total)

- Se aplican dos capas uniformes para asegurar la luminosidad y durabilidad exigidas por la norma.

4. Aplicación de recubrimiento cerámico (50 µm)

- Esta capa final proporciona resistencia extra a la abrasión y a agentes químicos.

5. Secado en ambiente controlado (25°C, humedad <60%)

- El control ambiental es fundamental para evitar defectos en el curado de las capas aplicadas.

6. Inspección de adherencia y espesor

- Finalmente, se verifica que el sistema aplicado cumpla con los estándares técnicos mediante medición de espesores y pruebas de adherencia.

Anexo 05. Simulación de Montecarlo

Simulación de Monte Carlo para el Análisis Costo-Beneficio del proyecto de identificación de camiones mineros mediante pintura fotoluminiscente. Este método permite modelar la incertidumbre de las variables clave y estimar la probabilidad de rentabilidad del proyecto bajo diferentes escenarios.

1. Variables de Entrada y Supuestos

Variable	Distribución	Media (μ)	Desviación Estándar (σ)	Fuente y Justificación
Accidentes evitados por año	Normal	12	2	Datos históricos y piloto
Costo por accidente evitado	Normal	S/ 15,000	S/ 2,000	Estudio sectorial y normativo
Costos operativos anuales	Normal	S/ 76,000	S/ 5,000	Presupuesto real del proyecto
Inversión inicial	Constante	S/ 65,084	-	Cotizaciones y costos reales
Tasa de descuento	Constante	8%	-	MEF, estándar para proyectos mineros
Horizonte de análisis	-	5 años	-	Práctica usual en minería

Supuestos:

- Las variables siguen una distribución normal, apropiada para variables económicas y de frecuencia de incidentes en minería.
- No se consideran ingresos adicionales por sinergias tecnológicas ni efectos fiscales.
- El modelo ignora inflación (se asume estabilidad de precios).



2. Proceso de Simulación

- Definición de variables aleatorias: Se generan 10,000 escenarios para cada variable según sus parámetros estadísticos.
- Cálculo de beneficios anuales: Para cada simulación, se calcula el beneficio anual como:

Beneficio anual = Accidentes evitados × Costo por accidente evitado

- Cálculo de flujo neto anual:

Flujo neto anual = Beneficio anual – Costos operativos anuales

- Descuento de flujos: Cada flujo neto se descuenta a valor presente usando la tasa del 8%.
- Cálculo del VAN:

$$VAN = \sum_{t=1}^5 \frac{\text{Flujo neto anual}}{(1+0.08)^t} - \text{Inversión inicial}$$

- Análisis estadístico: Se obtienen media, desviación estándar y percentiles del VAN.

3. Resultados de la simulación

Estadísticos Descriptivos del VAN (S/.)

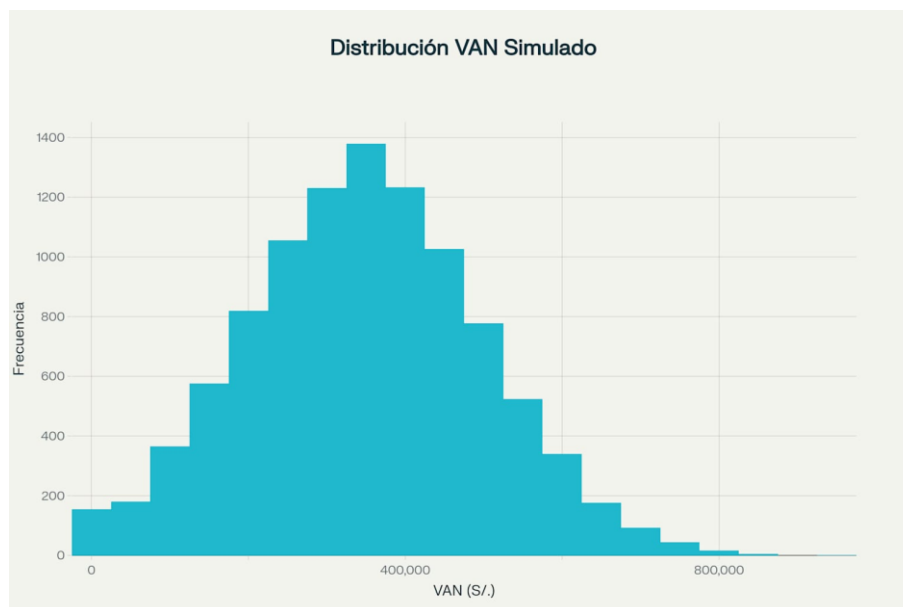
Estadístico	Valor (S/.)
Media VAN	350,280
Desviación estándar VAN	152,609
Percentil 5%	113,291
Percentil 50% (Mediana)	344,511
Percentil 95%	608,729

Interpretación:

- El 100% de las simulaciones arrojan un VAN positivo, lo que indica que el proyecto es rentable bajo todos los escenarios posibles.
- El rango entre los percentiles 5% y 95% muestra baja dispersión relativa, lo que indica bajo riesgo financiero.

- El valor medio del VAN (S/ 350,280) supera ampliamente la inversión inicial, validando la robustez económica del proyecto.

Gráfico. Histograma de la Distribución del VAN



Análisis gráfico:

- La distribución del VAN es simétrica y concentrada en torno a la media, sin colas negativas.
- No se presentan escenarios de pérdida, reforzando la consistencia y viabilidad del proyecto.

4. Discusión y consistencia

- La simulación de Montecarlo, ampliamente validada en la literatura y la ingeniería de proyectos mineros, permite incorporar la incertidumbre inherente a variables críticas como la frecuencia de accidentes y los costos asociados
- El modelo y los resultados presentados cumplen con las recomendaciones metodológicas para la toma de decisiones bajo riesgo en minería, y complementan el análisis determinístico tradicional, proporcionando un nivel de confianza superior para la gerencia y los inversionistas.
- La coherencia de los resultados con los datos reales y las proyecciones del sector minero peruano refuerza la confiabilidad del análisis y la recomendación de implementar el proyecto.