

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**



TESIS

**GESTIÓN DEL DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y MANTENIMIENTO
DE VÍAS DE ACARREO EN LA UNIDAD MINERA CONSTANCIA –
HUDBAY PERÚ S.A.C.**

PRESENTADO POR:

Br. EDSON MIGUEL VILLANUEVA CARPIO

PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL

DE INGENIERO DE MINAS

ASESOR:

DR. MIGUEL VERA MIRANDA

CUSCO – PERÚ

2026



Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

INFORME DE SIMILITUD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-321-2025-UNSAAC)

El que suscribe, el Asesor Dr. MIGUEL VERA MIRANDA
..... quien aplica el software de detección de similitud al
trabajo de investigación/tesis titulada: GESTIÓN DEL DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y
MANTENIMIENTO DE VÍAS DE ACARREO EN LA UNIDAD MINERA
CONSTANCIA - HUSBAY PERÚ S.A.C

Presentado por: EDSON MIGUEL VILLANUEVA CARPIO DNI N° 72575501;
presentado por: DNI N°:
Para optar el título Profesional/Grado Académico de INGENIERO DE MINAS

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 02 veces, mediante el
Software de Similitud, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso del Sistema Detección de**
Similitud en la UNSAAC y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 09.....%.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No sobrepasa el porcentaje aceptado de similitud.	☒
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las subsanaciones.	☐
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, conforme al reglamento, quien a su vez eleva el informe al Vicerrectorado de Investigación para que tome las acciones correspondientes; Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	☐

Por tanto, en mi condición de Asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y adjunto las primeras páginas del reporte del Sistema de Detección de Similitud.

Cusco, 26 de AGOSTO de 2026.....

Firma

Post firma.....Dr. MIGUEL VERA MIRANDA

Nro. de DNI.....23876027

ORCID del Asesor.....0000 - 0002 - 9349 - 8463

Se adjunta:

- Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
- Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: oid: 27259:617357044

Edson Miguel Villanueva Carpio

GESTIÓN DEL DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y MANTENIMIENTO DE VÍAS DE ACARREO EN LA UNIDAD MINERA CONSTANCIA ...

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:617357014

Fecha de entrega

26 ago 2026, 8:18 a.m. GMT-5

Fecha de descarga

26 ago 2026, 8:34 a.m. GMT-5

Nombre del archivo

GESTIÓN DEL DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y MANTENIMIENTO DE VÍAS DE ACARREO EN LA UNIDADpdf

Tamaño del archivo

5.1 MB

130 páginas

24.191 palabras

143.500 caracteres

9% Similitud general

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

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 15 palabras)

Exclusiones

- N.º de fuentes excluidas
- N.º de coincidencias excluidas

Fuentes principales

- 8%  Fuentes de Internet
- 1%  Publicaciones
- 5%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

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

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

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres:

Yrma Carpio Maldonado y Felix Villanueva Cabrera, por su sacrificio y amor infinito. Este logro es el reflejo de su compromiso. Gracias por ser mi pilar y mi mayor motivación.

Emperatriz Nina Pacsi, cuyo acompañamiento, apoyo y amor durante toda esta etapa académica fue fundamental para iniciar y culminar esta investigación.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, cuya guía y sabiduría han sido la luz que me ha iluminado a lo largo de este viaje académico.

A la prestigiosa universidad nacional de San Antonio Abad del Cusco, por otorgarme el conocimiento necesario para lograr adquirir el título profesional de Ingeniero de Minas.

A mi asesor de tesis, Dr. Miguel Vera Miranda, por su valioso apoyo. Su compromiso ha sido fundamental para la ejecución de este trabajo.

A la Unidad Minera Constancia – HUDBAY PERU S.A.C, por proporcionar los recursos y el ambiente necesario para llevar a cabo esta investigación.

Finalmente, a todas las personas que han contribuido a la culminación de esta tesis. Su apoyo y aliento han sido una fuente constante de inspiración y motivación.

INTRODUCCIÓN

La Unidad Minera Constancia, operada por Hudbay Perú S.A.C., requiere fortalecer la gestión de sus vías de acarreo mediante un enfoque técnico integral que abarque el diseño, la construcción y el mantenimiento. El objetivo principal de esta tesis es gestionar estos procesos de manera estandarizada, con el fin de reducir costos y garantizar la seguridad en las operaciones mineras.

Para alcanzar este propósito, primero se analiza la situación actual de las vías de acarreo en la Unidad Minera Constancia, identificando las áreas que requieren intervención. Posteriormente, se propone la gestión del diseño aplicando factores geotécnicos adecuados a las condiciones particulares de la mina. El siguiente objetivo es mejorar la construcción de las vías, incorporando tecnologías de monitoreo que aseguren la correcta ejecución del diseño. Finalmente, se plantea el mantenimiento, mediante planes preventivos que reduzcan interrupciones operativas y prolonguen la vida útil de las vías.

La tesis se estructura en cuatro capítulos:

- **Capítulo I:** Presenta el planteamiento del problema, la justificación y los objetivos de la investigación.
- **Capítulo II:** Desarrolla el marco teórico y los antecedentes nacionales e internacionales.
- **Capítulo III:** Describe la metodología aplicada y expone el procedimiento técnico de la gestión del diseño, construcción y mantenimiento de vías de acarreo en la U.M. Constancia.
- **El Capítulo IV:** Incluye los resultados y discusiones derivadas del estudio.

Esta estructura permite abordar integralmente la problemática, desde el diagnóstico inicial hasta una adecuada gestión de las vías de acarreo en la Unidad Minera Constancia.

RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo gestionar un adecuado diseño, construcción y mantenimiento de las vías de acarreo en la Unidad Minera Constancia – Hudbay Perú S.A.C. Estas vías constituyen un elemento crítico para el transporte de material, pues su desempeño influye directamente en la productividad, la seguridad y los costos operativos.

La metodología empleada corresponde a un tipo de investigación aplicada y a un nivel explicativo o causal, integrando el levantamiento de información de campo y el uso de herramientas de analítica de datos para el control del diseño. Además, se incorporó tecnología de drones y procesamiento digital con inteligencia artificial (Strayos), que permitió generar indicadores de conformidad y tableros de control con tendencias operativas.

Los resultados obtenidos demuestran que una adecuada gestión permite alcanzar el objetivo principal de la investigación: gestionar adecuadamente el diseño, construcción y mantenimiento de las vías de acarreo, logrando una reducción del consumo de combustible entre el 8 y el 12 %.

Asimismo, se comprobó que la integración de tecnologías digitales y analítica de datos mejora el control geométrico y estructural de las vías, consolidando un modelo de gestión preventiva aplicable a otras operaciones mineras de gran escala.

Palabras clave: Vías de acarreo, Gestión, Mantenimiento preventivo, Analítica de datos, Minería a tajo abierto.

ABSTRACT

The present research aims to manage the proper design, construction, and maintenance of haul roads at the Constancia Mining Unit – Hudbay Peru S.A.C. These roads constitute a critical element for material transportation, as their performance directly impacts productivity, safety, and operating costs.

The methodology employed corresponds to applied research at an explanatory or causal level, integrating field data collection and the use of data analytics tools for design control. In addition, drone technology and digital processing with artificial intelligence (Strayos) were incorporated, enabling the generation of compliance indicators and dashboards with operational trends.

The results obtained demonstrate that proper management achieves the main objective of the research: to adequately manage the design, construction, and maintenance of haul roads, resulting in a fuel consumption reduction of 8 to 12%.

Furthermore, it was proven that integrating digital technologies and data analytics enhances the geometric and structural control of the roads, consolidating a preventive management model applicable to other large-scale mining operations.

Keywords: haul roads, management, preventive maintenance, data analytics, open-pit mining.

ÍNDICE

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
INTRODUCCIÓN	iv
RESUMEN	v
ABSTRACT.....	vi
ÍNDICE	vii
ÍNDICE DE TABLAS	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiv
CAPÍTULO I: PROBLEMÁTICA DE LA INVESTIGACIÓN	17
1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	17
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	18
1.2.1. PROBLEMA GENERAL	18
1.2.2. PROBLEMAS ESPECÍFICOS	18
1.3. JUSTIFICACIÓN	18
1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	19
1.4.1. OBJETIVO GENERAL	19
1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
1.5. DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	20
1.5.1. DELIMITACIÓN GEOGRÁFICA:.....	20
1.5.2. DELIMITACIÓN TEMPORAL:.....	20

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN	21
2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	21
2.1.1. ANTECEDENTES INTERNACIONALES	21
2.1.2. ANTECEDENTES NACIONALES	22
2.1.3. ANTECEDENTES REGIONALES	23
2.2. BASES TEÓRICAS	24
2.2.1. DISEÑO DE VÍAS DE ACARREO (TRAZOS, PERALTE, PENDIENTES, RADIOS Y ANCHOS).....	24
2.2.2. CONSTRUCCIÓN DE VÍAS DE ACARREO (MOVIMIENTO DE MATERIALES, CUNETAS, BERMAS Y CONTROL CONSTRUCTIVO)	25
2.2.3. MANTENIMIENTO DE VÍAS DE ACARREO (RIEGO POR ASPERSIÓN, LASTRADO, PERFILADO Y CONSERVACIÓN DE DRENAJES)	27
2.2.4. EFICIENCIA EN VÍAS DE ACARREO (ENFOQUE SISTÉMICO Y DETERMINANTES OPERATIVOS).....	28
2.2.5. PRODUCTIVIDAD DEL ACARREO ASOCIADA A LA CONDICIÓN DE LAS VÍAS	29
2.2.6. SEGURIDAD EN VÍAS DE ACARREO (CONTROL DE RIESGO VIAL MINERO)	30
2.2.7. REDUCCIÓN DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLE POR MEJORA GEOMÉTRICA	31
2.2.8. CARGUÍO Y ACARREO	34

2.2.9.	PRODUCTIVIDAD OPTIMA DE CARGUÍO.....	34
2.2.10.	PRODUCTIVIDAD OPTIMA DE ACARREO	35
2.2.11.	EQUIPOS DE ACARREO	35
2.2.12.	CÁLCULO DE LA PRODUCTIVIDAD DE EQUIPOS DE TRANSPORTE	35
2.2.12.1.	PRODUCTIVIDAD TEÓRICA	36
2.2.12.2.	PRODUCTIVIDAD PROMEDIO.....	36
2.2.12.3.	PRODUCTIVIDAD MÁXIMA.....	37
2.2.12.4.	TIEMPO DE TRANSPORTE.....	37
2.2.12.6.	FACTORES DEL TIEMPO	39
2.2.12.7.	CÁLCULO DE PRODUCTIVIDAD DE EQUIPOS MIXTOS MÓVILES O AUXILIARES.....	40
2.2.12.8.	FACTORES QUE AFECTAN EL PROCESO DE CARGUÍO Y ACARREO	41
2.3.	TECNOLOGÍAS DE MONITOREO Y DIGITALIZACIÓN EN VÍAS DE ACARREO	43
2.3.1.	FOTOGRAMETRÍA Y USO DE DRONES (UAV).....	43
2.3.2.	TELEMETRÍA VEHICULAR Y SISTEMAS DE DESPACHO.....	44
2.3.3.	ANALÍTICA DE DATOS E INTELIGENCIA ARTIFICIAL (IA).....	44
2.4.	HIPÓTESIS	45
2.4.1.	HIPÓTESIS GENERAL	45

2.4.2.	HIPÓTESIS ESPECÍFICAS	45
2.5.	OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES	47
CAPÍTULO III: METODOLOGIA DE LA INVESTIGACIÓN		48
3.1.	TIPO DE INVESTIGACIÓN	48
3.2.	NIVEL DE INVESTIGACIÓN	48
3.3.	POBLACIÓN	48
3.4.	MUESTRA	49
3.5.	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE CAPTURA DE INFORMACIÓN	49
3.5.1.	TÉCNICAS	49
3.5.2.	INSTRUMENTOS	50
3.6.	TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO DE DATOS	50
3.7.	GESTIÓN DEL DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y MANTENIMIENTO DE LAS VÍAS DE ACARREO EN LA UNIDAD MINERA CONSTANCIA – HUDBAY PERÚ S.A.C.	51
3.7.1.	CONTEXTO OPERATIVO Y DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN ACTUAL	52
3.7.1.1.	CONTEXTO OPERATIVO DE LA UNIDAD MINERA	52
3.7.1.2.	PROPÓSITOS DEL DESARROLLO TÉCNICO	54
3.7.1.3.	CONDICIONALES ACTUALES Y PROBLEMÁTICA EN LAS VIAS DE ACARREO	55

3.7.1.4. LIMITACIONES EN EL CONTROL DE TRANSPORTE Y MONITOREO.....	66
3.7.1.5. IMPLEMENTACIÓN DEL ESTÁNDAR EN LA UNIDAD MINERA CONSTANCIA.....	67
3.7.2. GESTIÓN DEL DISEÑO DE VIAS DE ACARREO.....	68
3.7.2.1. ADAPTACIÓN DE PARÁMETROS GEOMÉTRICOS AL CONTEXTO OPERATIVO.....	68
3.7.2.2. INDICADORES DE CONFORMIDAD GEOMÉTRICA Y ESTRUCTURAL.....	71
3.7.2.3. SEGURIDAD VIAL EN EL DISEÑO: INTERSECCIONES Y CONTROL DE EXPOSICIÓN	77
3.7.3. GESTIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN.....	88
3.7.3.1. PROCESO DE CONFORMACIÓN DE CAPAS ESTRUCTURALES .	88
3.7.3.2. PROCEDIMIENTOS DE LIBERACIÓN DE ÁREAS Y MITIGACIÓN DE RIESGOS.....	91
3.7.3.3. LEVANTAMIENTOS TOPOGRÁFICOS, USO DE DRONES Y ANALÍTICA DE DATOS	92
3.7.4. GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO.....	93
3.7.4.1. PLAN ESTACIONAL DE PREPARACIÓN PARA LLUVIAS	93
3.7.4.2. MONITOREO DE TENDENCIAS OPERATIVAS MEDIANTE TABLEROS DE CONTROL.....	95

3.7.4.3. ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO.....	95
3.7.5. IMPACTO OPERATIVO Y ECONÓMICO DE LA GESTIÓN INTEGRAL	
98	
3.7.5.1. IMPACTO ECONÓMICO DE LA OPTIMIZACIÓN DE VÍAS	98
3.7.5.2. REDUCCIÓN DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLE Y AUMENTO DE	
VELOCIDADES POR MEJORA GEOMÉTRICA.....	98
3.7.5.3. EVALUACIÓN COSTO-BENEFICIO DE LA IMPLEMENTACIÓN	
DEL ESTÁNDAR	98
3.7.5.4. SÍNTESIS DEL PROCEDIMIENTO Y RESULTADOS	99
CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	100
4.1. RESULTADOS	100
4.2. DISCUSIÓN	111
CONCLUSIONES	115
RECOMENDACIONES.....	116
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	117
ANEXOS	120

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Operacionalización de las variables	47
Tabla 2: Rango de velocidades en condiciones normales	70
Tabla 3: Rango de velocidades en condiciones críticas	70
Tabla 4: Peralte empleado en U.M. Constancia.....	75
Tabla 5: Velocidad vs Radio de curvatura.....	76
Tabla 6: Pendiente vs Velocidad vs Longitud de desplazamiento	77
Tabla 7: Velocidad vs Distancia de visión.....	85
Tabla 8 Comparación de consumo de combustible antes y después de las intervenciones	101
Tabla 9 Comparación de velocidades antes y después de las intervenciones	103
Tabla 10 Ahorro total de combustible por intervención	105
Tabla 11 Eficiencia del ahorro según distancia intervenida	107
Tabla 12 Reservas de mineral de Constancia y Pampacancha.	127

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 : Principales vías de acarreo de la U.M. Constanca	53
Figura 2: Tramos con anchos por remediar del Tajo Constanca.....	56
Figura 3: Tramos con anchos por remediar de las vías de acarreo hacia el TMF	57
Figura 4: Tramos con anchos por remediar del Tajo Pampacanca	57
Figura 5: Tramos con anchos por remediar de las vías de acarreo hacia Chancadora .	58
Figura 6: Tramos con anchos por remediar de las vías de acarreo hacia el WRF	58
Figura 7: Tramos con pendiente por remediar del Tajo Constanca	59
Figura 8: Tramos con pendiente por remediar del Tajo Pampacanca.....	60
Figura 9: Tramos con pendiente por remediar de las vías de acarreo hacia el TMF	60
Figura 10: Tramos con pendiente por remediar de las vías hacia Chancadora	61
Figura 11: Tramos con peralte por remediar de las vías de acarreo hacia el TMF	61
Figura 12: Tramos con peralte por remediar del Tajo Constanca.....	62
Figura 13: Tramos con peralte por remediar de las vías de acarreo hacia Chancadora	62
Figura 14: Tramos con peralte por remediar del Tajo Pampacanca	63
Figura 15: Tramos con bermas por remediar de las vías hacia Chancadora	63
Figura 16: Tramos con bermas por remediar de las vías de acarreo hacia el TMF	64
Figura 17: Tramos con bermas por remediar del Tajo Pampacanca.....	64
Figura 18: Tramos con bermas por remediar del Tajo Constanca	65
Figura 19: Estructura del ancho de la vía con dos carriles	71
Figura 20: Estructura del ancho de la vía con un carril	72
Figura 21: Radio mínimo externo en curva	72
Figura 22: Perfil de curva en pendiente	73

Figura 23: <i>Peralte en curva</i>	73
Figura 24: <i>Alineación de Haul Road</i>	74
Figura 25: <i>Pendiente de una vía de acarreo</i>	74
Figura 26: <i>Longitud de desplazamiento</i>	76
Figura 27: <i>Ancho de HR considerando vías auxiliares</i>	78
Figura 28: <i>Vía auxiliar de ingreso al stock 40</i>	79
Figura 29: <i>Rampa de alivio en la U.M. Constanica</i>	81
Figura 30: <i>Diseño de intersecciones en "T"</i>	84
Figura 31: <i>Diseño de intersecciones en "+"</i>	84
Figura 32: <i>Distancia de visión segura en la intersección (SISD)</i>	85
Figura 33: <i>Control de tráfico</i>	86
Figura 34: <i>Señalética en cruces en "+"</i>	87
Figura 35: <i>Perfil típico de las vías</i>	88
Figura 36: <i>Construcción de las vías</i>	90
Figura 37: <i>Consumo de combustible antes y después por tramo</i>	102
Figura 38: <i>Reducción porcentual del consumo de combustible</i>	102
Figura 39: <i>Velocidad promedio antes y después por tramo</i>	104
Figura 40: <i>Incremento porcentual de velocidad promedio</i>	104
Figura 41: <i>Ahorro total de combustible por intervención</i>	106
Figura 42: <i>Ahorro acumulado por secuencia de intervención</i>	106
Figura 43: <i>Volumen de tránsitos evaluados por tramo</i>	108
Figura 44: <i>Galones ahorrados por metro intervenido</i>	108
Figura 45: <i>Relación entre distancia intervenida, ahorro y tránsito</i>	109

Figura 46: <i>Distribución de tránsitos por equipo en evaluación acumulada</i>	110
Figura 47: <i>Plano de ubicación de la Unidad Minera Constancia.....</i>	121
Figura 48: <i>Vista en 3D de litología de la unidad minera Constancia.</i>	123
Figura 49: <i>Fallas Principales en 3D, tajo Constancia.</i>	125
Figura 50 : <i>Recursos minerales de mina Constancia.</i>	126
Figura 51: <i>Flujo orígenes y destinos</i>	129
Figura 53: <i>Movimiento de materiales por destino.....</i>	129
Figura 54. <i>Movimiento de materiales por fase de minado</i>	130
Figura 55. <i>Material movido ore por fases.....</i>	130

CAPÍTULO I:

PROBLEMÁTICA DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La Unidad Minera Constancia, operada por Hudbay Perú S.A.C., enfrenta una problemática relacionada con la gestión del diseño, construcción y mantenimiento de sus vías de acarreo. Estas vías, fundamentales para el transporte de material en toda la operación minera, influyen directamente en el consumo de combustible. Actualmente, no existe una adecuada gestión que estandarice el diseño, construcción y mantenimiento de estas vías, lo que genera inconsistencias en su construcción, incrementa los tiempos de mantenimiento y aumenta el consumo de combustible.

Un análisis preliminar muestra deficiencias en el diseño, construcción y mantenimiento de las vías de acarreo, originándose la necesidad de implementar un estándar basado en criterios técnicos. En el diseño, la ausencia de análisis geotécnicos adecuados ha derivado en la construcción de vías con anchos variables, radio de curvatura y peraltes inadecuados. Esta variabilidad impacta la eficiencia operativa, ocasionando costos adicionales debido a la necesidad de realizar intervenciones correctivas. Asimismo, el control durante la construcción de las vías carece de un sistema de monitoreo en tiempo real, lo cual limita garantizar que las especificaciones técnicas del diseño se cumplan de manera rigurosa.

Otro aspecto crítico es el mantenimiento de las vías de acarreo, que en muchos casos es reactivo en lugar de preventivo. La falta de un plan de mantenimiento ha resultado en consumos excesivos de combustible, afectando negativamente el presupuestado de la mina.

Esta investigación tiene como objetivo principal abordar la situación actual, establecer un estándar claro para gestionar el diseño, la construcción y el mantenimiento de las vías de acarreo

proporcionando así un enfoque integral para asegurar la sostenibilidad de las operaciones en la Unidad Minera Constancia.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1. PROBLEMA GENERAL

- ¿En qué medida la implementación de un estándar para la gestión del diseño, construcción y mantenimiento de las vías de acarreo impacta en las velocidades y consumo de combustible de los camiones en la Unidad Minera Constancia – Hudbay Perú S.A.C.?

1.2.2. PROBLEMAS ESPECÍFICOS

- ¿Cuál es la situación actual del diseño, construcción y mantenimiento de las vías de acarreo en la Unidad Minera Constancia – Hudbay Perú S.A.C.?
- ¿De qué manera la gestión de un estándar del diseño y construcción influye en las velocidades de los camiones en la Unidad Minera Constancia – Hudbay Perú S.A.C.?
- ¿Cómo influye la gestión estandarizada del mantenimiento de las vías de acarreo en el consumo de combustible de los camiones en la Unidad Minera Constancia – Hudbay Perú S.A.C.?

1.3. JUSTIFICACIÓN

La investigación propuesta sobre la gestión del diseño, construcción y mantenimiento de vías de acarreo en la Unidad Minera Constancia de Hudbay Perú S.A.C. es de suma relevancia en el contexto de la minería, dado el impacto directo de estas vías en la eficiencia operativa y la productividad de la mina. La ausencia de estándares claros en estos procesos puede generar

ineficiencias significativas, afectando no solo la calidad de las infraestructuras, sino también el rendimiento general de la operación minera.

En el aspecto del diseño, la correcta planificación de las vías de acarreo es esencial para maximizar la circulación de vehículos y maquinaria. La carencia de criterios estandarizados en el diseño puede llevar a ineficiencias, tales como cuellos de botella y rutas poco optimizadas, lo que repercute en el tiempo y el costo del transporte de materiales. Al estandarizar el diseño, se busca no solo mejorar la funcionalidad de las vías, sino también asegurar un aprovechamiento óptimo de los recursos disponibles, contribuyendo a la reducción de costos y tiempos operativos.

Respecto a la construcción, la gestión de un enfoque estandarizado es crítica para minimizar las variaciones en la calidad de las vías. La falta de monitoreo y control en tiempo real pueden incrementar los costos con posibles remediaciones para cumplir el diseño. Estandarizar el seguimiento durante el proceso constructivo permitirá reducir errores y, en última instancia, mejorar los tiempos y recursos durante la ejecución de las obras.

En cuanto al mantenimiento, la falta de un estándar claro puede traducirse en prácticas reactivas, en lugar de planificadas, lo que incrementa el desgaste prematuro de las vías y el consumo de combustible. Gestionar un plan de mantenimiento estandarizado garantizará que las vías de acarreo mantengan un nivel óptimo de operatividad, prolongando su vida útil.

1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1. OBJETIVO GENERAL

- Implementar un estándar para gestionar el diseño, construcción y mantenimiento de las vías de acarreo, con el fin de optimizar las velocidades y el consumo de combustible en la Unidad Minera Constancia – Hudbay Perú S.A.C.

1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar la situación actual del diseño, construcción y mantenimiento de las vías de acarreo en la Unidad Minera Constancia – Hudbay Perú S.A.C.
- Determinar el impacto en las velocidades de los camiones al gestionar un estándar del diseño y construcción de las vías de acarreo en la Unidad Minera Constancia – Hudbay Perú S.A.C.
- Determinar la influencia en el consumo de combustible de los camiones al gestionar un estándar de mantenimiento de las vías de acarreo en la Unidad Minera Constancia – Hudbay Perú S.A.C.

1.5. DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

1.5.1. DELIMITACIÓN GEOGRÁFICA:

La investigación se realizó exclusivamente en las vías de acarreo de la Unidad Minera Constancia, ubicada en la provincia de Chumbivilcas, región del Cusco, Perú, lo que permitirá realizar un análisis específico basado en sus características geotécnicas y operativas particulares.

1.5.2. DELIMITACIÓN TEMPORAL:

El estudio abarca un período comprendido entre enero y diciembre del año 2025, lo que facilitará la recopilación de datos necesarios para evaluar la situación actual, proponer mejoras y verificar la efectividad de los cambios implementados.

CAPÍTULO II:

MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

2.1.1. ANTECEDENTES INTERNACIONALES

- Visser & Thompson (2015) **“Haul Road Design and Management”**

Investigación de la University of Pretoria – Sudáfrica.

Investigación con el objetivo de analizar la influencia del diseño geométrico y el mantenimiento de las vías de acarreo en la eficiencia operativa y el costo del transporte minero.

Donde al finalizar la investigación se concluye que la calidad de la superficie y la disciplina de mantenimiento son tan importantes como la geometría del diseño, ya que reducen el consumo de combustible, el desgaste de neumáticos y los riesgos operativos, demostrando que una vía bien gestionada mejora directamente la rentabilidad minera.

- Department of Natural Resources and Mines (2019) **“Recognised Standard 19: Design and Construction of Mine Roads”**

Investigación de la University of Queensland Government – Australia.

Investigación con el objetivo de establecer parámetros técnicos para el diseño, construcción y control de carreteras mineras, con el fin de reducir incidentes y costos operativos.

Donde se concluye que el estándar define criterios verificables de pendientes, peraltes y radios de curvatura, promoviendo auditorías de conformidad geométrica y mantenimiento preventivo. Su aplicación mejora la seguridad vial minera y la eficiencia del transporte en operaciones a tajo abierto.

2.1.2. ANTECEDENTES NACIONALES

- Valenzuela Barreto, J. (2022) **“Gestión del ciclo de acarreo para optimizar la productividad operacional del tajo Ferrobamba del proyecto minero Las Bambas”**

Tesis para optar el título de Ingeniero de Minas en la Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac - Perú

Tesis con el objetivo de identificar cuellos de botella en el ciclo de acarreo y aplicar mejoras geométricas y de control de tráfico.

Donde se concluye que las correcciones en rampas e intersecciones redujeron la variabilidad del tiempo de ciclo y aumentaron la productividad, confirmando la relación directa entre diseño vial y eficiencia operativa.

- Arrascue Fuentes, C. A. (2021) **“Viabilidad del uso de drones en la detección de fallas/deterioros en caminos mineros de acarreo de mineral/material”**
Investigación para optar el grado académico de Magíster en Regulación, gestión y economía minera en la Pontificia Universidad Católica del Perú.

Investigación con el objetivo de implementar el uso de cámaras en combinación con drones para la identificación temprana de fallas superficiales en las vías, analizando su impacto en parámetros como el ciclo de producción, la velocidad, el consumo de combustible y la disponibilidad mecánica de los equipos.

Donde se concluye que la detección oportuna de irregularidades geométricas y superficiales mediante tecnología de drones permite una gestión vial más eficiente y puede originar un ahorro de hasta el 10 % en los costos totales de transporte. Esto valida el uso de herramientas tecnológicas para optimizar el mantenimiento de las vías de acarreo.

- Ancalla Gómez, Y. F. (2018) **“Gestión de vías de acarreo para el incremento de producción en el Tajo San Gerardo - Atacocha – Pasco”**

Tesis para optar el título de Ingeniero de Minas en la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco - Perú

Tesis con el objetivo de evaluar el impacto de la estandarización del diseño y el mantenimiento preventivo en la productividad minera.

Donde se concluye que la aplicación de criterios geométricos y planes de mantenimiento programado redujo el consumo de combustible y los incidentes, demostrando que la gestión integral de vías mejora simultáneamente seguridad y eficiencia.

2.1.3. ANTECEDENTES REGIONALES

- Ágreda Ajén, J. A. (2018) **“Optimización del carguío y acarreo aplicando ControlSense en la Mina Constancia”**

Tesis para optar el título de Ingeniero de Minas en la Universidad Alas Peruanas Cajamarca – Perú

Tesis con el objetivo de implementar un sistema de monitoreo operativo para mejorar el ciclo de carguío–acarreo mediante telemetría y análisis de tiempos.

Donde al finalizar la investigación se logró reducir los tiempos de acarreo y mejorar la disponibilidad de equipos, demostrando que la estabilidad y homogeneidad de las vías son esenciales para mantener velocidades óptimas y evitar sobreconsumos.

2.2. BASES TEÓRICAS

2.2.1.DISEÑO DE VÍAS DE ACARREO (TRAZOS, PERALTE, PENDIENTES, RADIOS Y ANCHOS)

El diseño de una vía de acarreo parte del entendimiento de la mina como un sistema dinámico donde el trazado debe responder a la geología, a la topografía y al plan de explotación, pero también al comportamiento real de la flota y a las condiciones climáticas (Visser & Thompson, 2015).

Un buen trazo evita quiebres innecesarios, minimiza cambios bruscos de pendiente y reduce la cantidad de contracurvas que obligan a los camiones a acelerar y frenar con mayor frecuencia. En la práctica, la rasante se busca continua y predecible para el operador, con transiciones suaves entre segmentos y con una jerarquía clara de vías principales, secundarias y accesos.

La definición del ancho considera al equipo crítico, no solo por su dimensión estática sino por su envolvente de giro y por el espacio que demanda la interacción con otros vehículos, los muros de seguridad y las cunetas; el objetivo es asegurar un tránsito seguro, márgenes laterales operativos y holguras suficientes para maniobras de recuperación ante contingencias (Department of Natural Resources and Mines, 2019).

En curvas, el radio se elige para que la trayectoria del camión no lo exponga a invadir carriles contrarios ni a desestabilizarse por fuerzas laterales; por ello, el peralte se vuelve un elemento de diseño esencial que compensa la acción centrífuga y mejora la adherencia, siempre dentro de un rango que favorezca el drenaje transversal sin producir deslizamientos del material de rodadura (Visser & Thompson, 2015).

Respecto a la pendiente, su definición responde a un equilibrio entre movimiento de tierras y desempeño del transporte: rampas excesivamente inclinadas elevan la resistencia total al avance, incrementan el esfuerzo térmico de frenos en descenso y penalizan el consumo de combustible, mientras que pendientes muy bajas pueden demandar cortes o rellenos poco viables. En intersecciones, la premisa es la simplicidad geométrica, la visibilidad en aproximación y la coherencia con los patrones de prioridad, de manera que el operador siempre encuentre un entorno legible (Valenzuela Barreto, 2022).

El diseño incorpora, además, la altura y geometría de bermas, la segregación física de flujos cuando corresponde, las longitudes de transición de peralte y los tramos planos de recuperación al pie o en la cresta de rampas para permitir frenados seguros. Todo el conjunto se valida con controles topográficos y, cada vez con mayor frecuencia, con modelos digitales generados por fotogrametría y análisis con inteligencia artificial que comparan el “as built” frente a los parámetros de proyecto, cerrando el ciclo de mejora continua del diseño.

2.2.2. CONSTRUCCIÓN DE VÍAS DE ACARREO (MOVIMIENTO DE MATERIALES, CUNETAS, BERMAS Y CONTROL CONSTRUCTIVO)

La construcción materializa el diseño y su calidad condiciona la vida útil de la vía desde el primer día. El proceso comienza por la preparación de la subrasante, asegurando una capacidad portante compatible con las cargas de los camiones y con el tránsito repetitivo; cuando los suelos nativos no alcanzan la rigidez requerida, se recurre a estabilización mecánica, reemplazo selectivo, uso de geosintéticos o elevación de nivel para evitar zonas saturadas (Department of Natural Resources and Mines, 2019).

Sobre esta base se coloca la subbase como primer elemento estructural, con materiales gruesos, limpios y drenantes que distribuyen esfuerzos y limitan deformaciones. La capa base, de

granulometría controlada y alta calidad pétreo, actúa como refuerzo adicional y plataforma para la rodadura, mientras que la capa de desgaste o afirmado final se selecciona con una combinación de gruesos y finos que permita compactación, cohesión con humedad de trabajo y resistencia al desprendimiento bajo carga.

La compactación se ejecuta por capas con control de espesores, humedad y número de pasadas, pues la falta de homogeneidad genera baches, corrugaciones y deformaciones plásticas que luego se traducen en vibración, pérdidas de velocidad y cortes de neumáticos (Visser & Thompson, 2015).

En paralelo se construyen las cunetas laterales y los dispositivos de cruce de agua que evitan empozamientos y erosión de la calzada; su trazo acompaña la rasante con pendientes de servicio continuas y descargas hacia pozas o drenajes naturales protegidos. Las bermas de seguridad se levantan con materiales competentes y geometría estable, buscando continuidad y altura efectiva frente al diámetro de las llantas de los equipos de mayor tamaño; su función no es decorativa, sino la de contener vehículos ante pérdidas de control y aportar una referencia visual constante (Department of Natural Resources and Mines, 2019).

Durante la ejecución, el control topográfico es permanente para garantizar que anchos, pendientes y peraltes correspondan a lo diseñado; las desviaciones detectadas se corrigen de inmediato para evitar retrabajos mayores. Finalmente, la señalización temporal y el ordenamiento del tránsito durante la obra reducen la exposición del personal y de la flota a interferencias, manteniendo la operación con estándares de seguridad.

2.2.3. MANTENIMIENTO DE VÍAS DE ACARREO (RIEGO POR ASPERSIÓN, LASTRADO, PERFILADO Y CONSERVACIÓN DE DRENAJES)

El mantenimiento es el mecanismo que preserva la funcionalidad y la seguridad de la vía frente al desgaste natural por tráfico y clima. En minas de alta altitud y régimen de lluvias marcadas, la estrategia combina rutinas diarias, semanales y estacionales (Ancalla Gómez, 2018).

El perfilado con motoniveladora mantiene la regularidad superficial, corta corrugaciones y elimina cuñas de material que inducen vibraciones; su oportunidad es clave porque intervenciones tardías requieren mayores volúmenes de reposición y afectan más días de operación. El riego por aspersión controla el polvo para mejorar la visibilidad, proteger la salud de los trabajadores y sostener la cohesión superficial del afirmado; su dosificación debe evitar tanto la sobre humectación que ablanda la calzada, como el déficit que permite la formación de finos sueltos.

La reposición de material —lastrado— recupera espesores de la capa de desgaste en sectores críticos como aproximaciones a chancadora, curvas y rampas prolongadas; el material de reposición se elige por su granulometría estable y compatibilidad con el afirmado existente, y siempre se compacta para integrarlo al sistema. El mantenimiento de drenajes incluye la limpieza sistemática de cunetas, alcantarillas y accesos a pozas, así como la reconstrucción de bajantes o disipadores de energía que previenen erosión; en temporada de lluvias se refuerza con patrullajes adicionales y stock de materiales para reparaciones rápidas (Visser & Thompson, 2015).

Complementariamente, la verificación de bermas, delineadores y señalización garantiza que los elementos de seguridad conserven su integridad y legibilidad. La organización moderna del mantenimiento se apoya en inspecciones estructuradas, registros fotográficos georreferenciados y tableros de control que priorizan frentes de trabajo según criticidad, tráfico y

riesgo operativo, migrando de esquemas reactivos a un enfoque preventivo y predictivo (Arrascue Fuentes, 2021).

2.2.4. EFICIENCIA EN VÍAS DE ACARREO (ENFOQUE SISTÉMICO Y DETERMINANTES OPERATIVOS)

La eficiencia se entiende como la capacidad del sistema vial para permitir el movimiento de material con el menor consumo posible de recursos y sin comprometer la seguridad. Una vía eficiente reduce la resistencia al avance gracias a una superficie regular, afirmados con textura adecuada y pendientes dentro de rangos compatibles con la flota; esto se traduce en menores esfuerzos del tren de potencia, temperaturas de freno controladas y velocidades más estables (Visser & Thompson, 2015).

La eficiencia también depende de la coherencia entre el diseño geométrico y el patrón de tránsito: anchos consistentes, radios que evitan invasiones de carril y peraltes que mantienen la trayectoria reducen maniobras correctivas y pérdidas de tiempo en curvas.

El drenaje efectivo aporta al mantener la calzada seca y firme, evitando cierres o restricciones por empozamientos o por ablandamiento del material. Desde la gestión, la eficiencia se potencia con una programación de mantenimientos sincronizada con los picos de producción, con segregación de flujos livianos y pesados cuando el contexto lo exige, y con la coordinación estrecha entre planeamiento, operaciones, geotecnia y topografía. En la actualidad, la analítica de datos y las plataformas de monitoreo vehicular permiten correlacionar el comportamiento de la flota con el estado de las vías, de modo que variaciones en velocidades, vibración o consumo sirvan como señales tempranas para intervenir antes de que el deterioro se traduzca en costos mayores o incidentes (Ágreda Ajén, 2018).

En síntesis, la eficiencia vial no es solo un atributo geométrico o constructivo; es el resultado de una cadena integrada de decisiones que alinean diseño, construcción, conservación y operación.

2.2.5. PRODUCTIVIDAD DEL ACARREO ASOCIADA A LA CONDICIÓN DE LAS VÍAS

La productividad, expresada en la cantidad de material movilizado por unidad de tiempo, está íntimamente ligada a la condición de las vías. Cuando la superficie de rodadura es uniforme y los parámetros geométricos se respetan, los camiones sostienen velocidades objetivo con menor variabilidad entre viajes, lo que reduce la dispersión del tiempo de ciclo y permite una planificación más precisa del despacho (Valenzuela Barreto, 2022).

En accesos a frentes y zonas de descarga, un buen “cuadrado” y radios adecuados disminuyen tiempos de maniobra, mientras que intersecciones simples y bien señalizadas reducen esperas innecesarias por indecisión del operador.

La estabilidad del afirmado evita pérdidas por rescates en lodo o por llantas cortadas, y prolonga la disponibilidad efectiva de los equipos; menos fallas y menos eventos de mantenimiento correctivo se traducen en más horas productivas. En rampas, la combinación de pendiente adecuada y tramos de recuperación alivia los frenos y el motor, permitiendo descensos controlados y ascensos consistentes que suavizan la curva de consumo. La productividad también se beneficia del ordenamiento del tránsito: carriles claramente delimitados, control de velocidad por contexto y segregación de livianos disminuyen conflictos y reducen tiempos muertos en convoyes. Todo ello se complementa con la disciplina en el mantenimiento, pues cada intervención oportuna evita degradaciones que, de otra forma, se amplifican y afectan varios puntos del circuito de acarreo (Ancalla Gómez, 2018).

Así, la vía de acarreo deja de ser un pasivo que “se aguanta” y se convierte en un activo productivo que habilita más viajes por turno con el mismo número de camiones.

2.2.6. SEGURIDAD EN VÍAS DE ACARREO (CONTROL DE RIESGO VIAL MINERO)

La seguridad vial minera es un eje transversal que guía decisiones de diseño, construcción y operación. La vía debe ofrecer defensas físicas efectivas —bermas continuas, muros en bordes expuestos y rampas de escape en descensos largos— y una lectura clara del entorno mediante señalización, delineadores y balizamiento que acompañen al operador en condiciones de baja visibilidad (Department of Natural Resources and Mines, 2019).

La geometría segura reduce situaciones de pérdida de control: radios compatibles con la velocidad, peraltes que contrarrestan fuerza lateral y pendientes que no sobre exigen frenos o generen patinaje en superficies húmedas.

La segregación de rutas para vehículos livianos y equipos de gran tonelaje, cuando la configuración lo demanda, disminuye la probabilidad de colisiones por diferencias de tamaño y aceleración; cuando el cruce es inevitable, intersecciones en ángulo recto, visibilidad garantizada y prioridades explícitas reducen el riesgo (Visser & Thompson, 2015).

La gestión del clima añade capas de control: planes estacionales de lluvias con refuerzo de drenajes, protocolos ante tormentas eléctricas y neblina, y dosificación de riego para evitar “vías jabonosas” o nubes de polvo que oculten peligros. La cultura de seguridad se fortalece con inspecciones conjuntas, listas de verificación y liberaciones formales de tramos antes de su uso, asegurando que ninguna vía entre en operación sin cumplir condiciones mínimas. La tecnología aporta sistemas de detección de proximidad, cámaras perimetrales y telemetría que entregan alertas tempranas por exceso de velocidad, vibraciones anómalas o patrones de conducción inseguros.

Finalmente, la capacitación permanente de operadores, la comunicación radial disciplinada y la investigación rigurosa de incidentes completan un enfoque preventivo donde la vía de acarreo se administra como un riesgo crítico de la operación y no como un simple camino de tránsito.

2.2.7. REDUCCIÓN DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLE POR MEJORA GEOMÉTRICA

El consumo de combustible constituye uno de los indicadores económicos más sensibles en la operación minera a tajo abierto, representando entre el 35 % y el 50 % de los costos totales de acarreo. Su comportamiento depende de una compleja interacción entre factores geométricos, operativos y mecánicos que inciden en la resistencia total al movimiento de los camiones (Arrascue Fuentes, 2021).

Dentro de estos factores, la geometría de la vía —particularmente la pendiente, el peralte, la regularidad superficial y la compactación del afirmado— ejerce un papel determinante en la eficiencia energética del transporte. Cuando las rampas son uniformes, las curvas presentan radios amplios y la superficie de rodadura mantiene una textura controlada, el tren motriz del camión trabaja dentro de su rango óptimo de torque y consumo, reduciendo la carga del motor y, con ello, la tasa de uso de diésel por hora. En cambio, la presencia de irregularidades, baches, sobre pendientes o tramos saturados incrementa la resistencia a la rodadura y obliga al operador a realizar aceleraciones y frenadas más frecuentes, traduciéndose en un sobreconsumo de combustible que puede oscilar entre un 8 % y 15 % respecto a las condiciones ideales de diseño (Ancalla Gómez, 2018).

El diseño geométrico de las vías de acarreo debe concebirse, por tanto, como una herramienta de control energético. Los estudios de Visser y Thompson (2015) demuestran que la resistencia a la rodadura —definida como la fuerza que se opone al avance del neumático sobre la

superficie— se incrementa exponencialmente con la rugosidad del camino y con la pérdida de compactación del afirmado. En vías con granulometría heterogénea, exceso de finos o contenido de humedad inadecuado, el coeficiente de fricción puede duplicarse respecto a una vía correctamente perfilada. Este incremento, aparentemente pequeño, representa un mayor esfuerzo del motor diésel, que debe compensar la pérdida de tracción aumentando la inyección de combustible. De igual manera, las pendientes fuera del rango óptimo (8 %–10 %) generan un aumento lineal en la demanda de potencia, lo que no solo eleva el consumo horario, sino también el desgaste de componentes como los sistemas de freno, embrague y transmisión. Cada punto porcentual adicional de pendiente puede elevar el consumo en más de 2 % en camiones de más de 300 toneladas de capacidad, lo que a escala anual representa miles de galones de diésel adicionales y un incremento directo en los costos operativos (Visser & Thompson, 2015).

La optimización geométrica permite reducir estas pérdidas mediante la aplicación estricta de parámetros de diseño estandarizados. En el caso de la Unidad Minera Constancia, el cumplimiento del estándar STD-OM-108, que define pendientes máximas de 10 %, peraltes de 3 % a 5 %, radios mínimos de 33 metros y anchos de vía de 32 metros, ha permitido lograr trayectorias más estables y una distribución uniforme de las cargas en el tren de rodadura. Estas condiciones reducen la variabilidad en las velocidades promedio y permiten a los operadores mantener un régimen constante de operación, evitando aceleraciones bruscas. A nivel operativo, esto se traduce en una disminución del consumo específico de combustible (litros por tonelada-kilómetro) y en una reducción del tiempo de ciclo total de acarreo (Valenzuela Barreto, 2022).

A su vez, la compactación y el control de humedad del afirmado contribuyen de forma significativa a la eficiencia energética. Un camino bien compactado reduce la deformación superficial y, por ende, la energía disipada en cada paso de llanta. Cuando la superficie presenta

ondulaciones o sectores blandos, la llanta se hunde levemente, generando una micro deformación que absorbe parte de la energía mecánica que debería transformarse en desplazamiento. Esta pérdida acumulada a lo largo del ciclo completo del camión equivale a un aumento del esfuerzo del motor, generando un mayor consumo de combustible y emisiones. Por ello, el mantenimiento de la regularidad superficial mediante motonivelado periódico y el riego controlado son medidas que impactan directamente en el balance energético del acarreo. A nivel ambiental, esta optimización también contribuye a reducir la huella de carbono de la operación, dado que cada litro de diésel no quemado representa una disminución de aproximadamente 2.68 kg de CO₂ emitido a la atmósfera (Department of Natural Resources and Mines, 2019).

Desde una perspectiva sistémica, la eficiencia del combustible no depende únicamente del diseño geométrico, sino de la interacción entre la vía, el vehículo y el operador. La estandarización de pendientes y radios permite que el camión mantenga una relación más constante entre torque y velocidad, reduciendo la necesidad de cambios de marcha y evitando zonas de alto consumo. De igual forma, la incorporación de tecnologías de monitoreo como SmartRView permite registrar patrones de consumo por tramo, identificando sectores donde el gasto energético se eleva debido a deficiencias geométricas o condiciones superficiales desfavorables. Con esta información, es posible priorizar intervenciones correctivas en tramos críticos y cuantificar el retorno económico derivado de la mejora. La correlación entre datos de velocidad, revoluciones del motor y consumo de combustible constituye hoy un indicador fundamental en la gestión moderna de vías mineras, alineando la ingeniería civil con la analítica operativa (Ágreda Ajén, 2018).

Finalmente, la reducción del consumo de combustible por mejora geométrica no solo representa un beneficio económico directo, sino que también fortalece la sostenibilidad integral de la mina. Menos combustible implica menor frecuencia de abastecimiento, menor tráfico de

cisternas, menor riesgo de derrames y una disminución en los costos logísticos asociados al transporte de diésel. Asimismo, prolonga la vida útil de los componentes del motor al reducir las exigencias térmicas y mecánicas. En conjunto, estos factores consolidan la importancia de la vía como un elemento estratégico dentro del ciclo productivo minero: una infraestructura diseñada y mantenida correctamente puede ahorrar miles de galones de combustible al año, mejorar la seguridad de los operadores y reforzar el compromiso ambiental de la operación. La evidencia técnica demuestra que invertir en la calidad geométrica de las vías de acarreo es, al mismo tiempo, una inversión en eficiencia energética, seguridad y sostenibilidad operacional (Arrascue Fuentes, 2021).

2.2.8. CARGUÍO Y ACARREO

Dentro de los procesos productivos de mayor costo se encuentra el carguío y acarreo de material, debido a que es el proceso con mayor cantidad de equipos involucrados, alto grado de mecanización, menor rendimiento productivo por equipo y constituye un proceso de operación prácticamente continuo y lento (Marca, 2014).

El carguío tiene como objetivo retirar el material tronado desde una pila dispuesta de forma tal que facilite la extracción de material hacia la planta y/o botaderos, como a puntos intermedios. Por su parte, el transporte consiste en el movimiento de materiales desde los puntos de extracción (carguío) hacia los diferentes destinos (Marca, 2014).

2.2.9. PRODUCTIVIDAD OPTIMA DE CARGUÍO

En el área de carguío es necesario conocer las consideraciones para mejorar la productividad las cuales son: (Marca, 2014).

- A mejor carga útil o Payload, mayor productividad (depende del tipo de camión).
- A mejor uso del equipo (menos demoras) mayor productividad.

- A menor tiempo de carguío, mayor productividad (depende del tipo de camión)
- Con mejores condiciones para el cuadrado de camiones (menor tiempo de cuadrado o spot), mayor productividad.

2.2.10. PRODUCTIVIDAD OPTIMA DE ACARREO

Simultáneamente en el área de acarreo se deben tomar en cuenta las siguientes consideraciones (Mauricio G., 2015):

- A mejor carga útil o Payload, mayor productividad.
- A mayor distancia y velocidad, mayor productividad.
- A mejor uso del equipo (menos demoras) mayor productividad.

2.2.11. EQUIPOS DE ACARREO

El camión corresponde a la unidad de transporte utilizada en explotación de minas a tajo abierto. Los camiones mineros están especialmente diseñados para acarrear tonelajes mayores, hasta 260 Ton. Los equipos de transporte trasladan el material a su destino final, ya sea a botaderos, planta o pad (Ríos, 2013).

2.2.12. CÁLCULO DE LA PRODUCTIVIDAD DE EQUIPOS DE TRANSPORTE

Según el artículo en Minería de Educar Chile, sobre la Productividad de Los Equipos de Carguío. La productividad de estos equipos depende de la capacidad de la tolva y del número de viajes que pueden realizar en una hora. La capacidad de la tolva está definida por construcción y por las características del material a transportar (densidad, tamaño de material fragmentado, esponjamiento, etc.). El número de viajes por hora dependerá del peso del vehículo, la potencia del motor, la distancia de transporte y condiciones del camino tales como pendiente, resistencia a la rodadura (Ríos, 2013).

Se pueden distinguir tres valores diferentes para la productividad, cada uno de los cuales tiene un significado y uso diferente.

2.2.12.1. PRODUCTIVIDAD TEÓRICA

Corresponde al peso o volumen por hora producido por una unidad en operación si no ocurren retrasos o pausas en la producción. Indica el potencial máximo productivo de un equipo, lo que muy raramente ocurre en la práctica (Ríos, 2013).

$$Productividad = \frac{60 \times C}{t}$$

$$Tasa\ de\ remoción = \frac{60 \times C}{t \times F_e \times D}$$

Donde:

- **C:** Capacidad nominal del equipo (ton).
- **t:** Tiempo de ciclo de transporte (min).
- **Fe:** Factor de esponjamiento (fracción).
- **D:** Densidad del material esponjado (ton/m³).

2.2.12.2. PRODUCTIVIDAD PROMEDIO

Corresponde al peso o volumen por hora producido por una unidad en operación, considerando retrasos fijos y variables. Esta tasa de producción debe aplicarse al periodo de tiempo deseado (día, turno) para estimar la producción total (Ríos, 2013).

$$Productividad = \frac{60 \times (T - R_f) \times E \times C}{T \times t}$$

Donde:

- **T:** Duración del período de tiempo (hr).

- **Rf:** Retrasos fijos (hr).
- **E:** Eficiencia de trabajo o retrasos variables (fracción).
- **C:** Capacidad nominal del equipo (ton).
- **t:** Tiempo de ciclo de transporte (min).

2.2.12.3. PRODUCTIVIDAD MÁXIMA

Corresponde al peso o volumen por hora producido por una unidad en operación, considerando sólo retrasos variables. Esta tasa de producción debe aplicarse para determinar el número de unidades de transporte asignadas a una pala, para lograr cierta producción requerida (Ríos, 2013).

$$Productividad = \frac{60 \times E \times C}{t}$$

$$Tasa\ de\ remoción = \frac{60 \times E \times C}{t \times F_e \times D_{insitu}}$$

Donde:

- **E:** Eficiencia de trabajo o retrasos variables (fracción).
- **C:** Capacidad nominal del equipo (ton).
- **t:** Tiempo de ciclo de transporte (min).
- **Fe:** Factor de esponjamiento (fracción).
- **D_insitu:** Densidad del material in situ (ton/m³).

2.2.12.4. TIEMPO DE TRANSPORTE

El tiempo de transporte está determinado por el peso del equipo y las condiciones de la vía. Si no hay restricciones por razones de seguridad o por condiciones laborales, la velocidad de transporte dependerá de la calidad, pendiente del camino, del peso del equipo de transporte y su carga. Una característica

importante en la operación de estos vehículos es que deben moderar la velocidad de manera de que los frenos funcionen sin superar la capacidad de enfriamiento del sistema. (Olazabal, 2014)

$$t = \frac{d}{v}$$

Donde:

- **t:** Tiempo de transporte (min).
- **d:** Distancia de la vía de acarreo (m o km).
- **v:** Velocidad real del equipo de transporte (m/min o km/hr).

2.2.12.5. RESISTENCIA POR PENDIENTE

Se define la resistencia por pendiente como el esfuerzo de tracción necesario para sobreponerse a la gravedad y permitir el ascenso del vehículo en una vía con pendiente positiva (es decir, una vía que asciende). Corresponde a 1% del peso del vehículo por cada 1% de pendiente. Por ejemplo, un camino con 5% de pendiente tiene una resistencia por pendiente de un 5% del peso total movilizado (peso del camión más el peso de la carga). Además de la resistencia por pendiente, se tiene la resistencia a rodar de los neumáticos del vehículo, que corresponde al esfuerzo de tracción necesario para sobreponerse al efecto retardatorio entre los neumáticos y la vía. (Olazabal, 2014)

A modo de ejemplo, para un camino bien mantenido y seco de tierra y grava, la resistencia es de 2% del peso movilizado. Para el cálculo de la velocidad a la que el vehículo, cargado o descargado, puede enfrentar los distintos tramos del recorrido de transporte que debe salvar, se utilizan los gráficos de rendimiento que los proveedores de los vehículos de transporte entregan (Olazabal, 2014).

$$RT = RP + RR$$

Donde:

- **RT:** Resistencia total.
- **RP:** Resistencia por pendiente.
- **RR:** Resistencia a rodar.

Los factores para considerar son (Olazabal, 2014):

- Pendiente
- Condiciones de la vía
- Resistencia total = resistencia por pendiente + resistencia a rodar
- Peso del equipo
- Peso de la carga
- Curva de rendimiento del equipo para las distintas marchas del motor.

2.2.12.6. FACTORES DEL TIEMPO

Tiempo operativo: corresponde al tiempo en que el equipo está entregado a su operador y en condiciones de realizar la labor programada.

Este tiempo se divide en (Mauricio G., 2015):

$$TO = TE + TPO + TR$$

Donde:

- **TO:** Tiempo operativo.
- **TE:** Tiempo efectivo (corresponde al tiempo en que el equipo está desarrollando sin inconvenientes la labor programada).

- **TPO:** Tiempo de pérdidas operacionales (corresponde al tiempo en que el equipo, estando operativo, realiza otras labores, tales como traslados, esperas de equipo complementario, etc.).
- **TR:** Tiempo de reserva (corresponde al tiempo en que el equipo, estando en condiciones de realizar la labor productiva, no es utilizado, ya sea porque no hay un operador disponible, o bien, simplemente porque no se ha considerado su operación) (Olazabal, 2014).

2.2.12.7. CÁLCULO DE PRODUCTIVIDAD DE EQUIPOS MIXTOS MÓVILES O AUXILIARES

El cálculo de la productividad de un equipo depende por cierto del tipo de equipo, pero en general, puede enfrentarse mediante el cálculo de los siguientes ítems (Marca, 2014).

$$C = C_n \times F_{ll}$$

Donde:

- **C:** Capacidad del equipo (corresponde a la carga por ciclo que el equipo puede manejar).
- **Cn:** Capacidad nominal especificada para el equipo.
- **Fu:** Factor de llenado. Depende del tamaño del lampón del equipo de empuje (Mauricio, 2015).

Al igual que en los casos anteriores, el tiempo de ciclo consta de cuatro componentes (Marca, 2014):

$$T_c = t_c + t_t + t_d + t_r$$

Donde:

- **Tc:** Tiempo de ciclo total.
- **tc:** Tiempo de carga (generalmente depende de las condiciones de trabajo).
- **tt:** Tiempo de transporte (depende del peso transportado, potencia del equipo, esfuerzos de tracción, pendiente y distancia).
- **td:** Tiempo de descarga (incluye maniobra y descarga).
- **tr:** Tiempo de retorno (difiere del tiempo de transporte en que el equipo vuelve descargado y con pendiente contraria).

2.2.12.8. FACTORES QUE AFECTAN EL PROCESO DE CARGUÍO Y ACARREO

Lluvias

Las lluvias en la sierra caen de noviembre a abril con fuerte precipitación y al caer en la mina produce que las vías se vuelvan inestables y “jabonosas” ya que el material por el cual está compuesto las vías es en su mayoría arcilloso, y en el tajo de gravas tiene alto contenido de arcillas, provocando que los camiones resbalen y queden enfangados provocando demoras por rescate (Mauricio G., 2015).

Visibilidad

Los empozamientos de agua en las vías de acarreo son producto de dejar de lado el nivelado de las vías en su debido momento para cuando empiezan las lluvias, un mal lastrado con material que en vez de lograr una vía compactada solo logra tapar un desnivel momentáneamente. Son un riesgo potencial para el daño de

llantas ya que el operador al no poder apreciar lo que se encuentra por debajo de esa “laguna” (Mauricio G., 2015).

Tormentas

Las tormentas eléctricas son consideradas como un peligro de alto potencial y que muchas veces no están acompañadas con precipitaciones de lluvia, son los meses de octubre a abril de cada año alta probabilidad de presencia de tormentas eléctricas. Las tormentas eléctricas son condiciones atmosféricas adversas, producidas por descargas eléctricas de gran intensidad, conocidas como rayos (Mauricio G., 2015).

Neblina

La neblina afecta al normal desarrollo del proceso de carguío y acarreo, haciendo que los camiones transiten más lento de lo estándar y llegando a detener las operaciones por horas o por turnos casi completos si la visibilidad es menor a 40 m. Si la visibilidad es mayor a 40 metros, se reduce la velocidad, manteniendo una distancia mínima de equipo a equipo de 60 m. (se calcula por las balizas de señalización que están colocados en la berma, una tras otra a 20 m. de distancia) (Mauricio G., 2015).

Temperatura:

La temperatura puede llegar hasta 28°C en un día soleado y hasta 5° en las madrugadas, a pesar de que todas las cabinas de los equipos tienen un sistema de aire acondicionado y calefacción el operador no está trabajando concentrado en su tarea, esto genera que el operador tenga un bajo rendimiento laboral.

Las temperaturas altas ocasionan levantamiento de polvo de las vías por donde transitan los camiones generando la disminución de velocidades conforme a procedimientos de operación, afectando por lo tanto a la productividad (Olazabal, 2014).

2.3. TECNOLOGÍAS DE MONITOREO Y DIGITALIZACIÓN EN VÍAS DE ACARREO

La gestión moderna de la infraestructura minera ha evolucionado de un enfoque netamente correctivo y visual a uno predictivo, impulsado por la digitalización. La integración de plataformas de captura de datos y sistemas de procesamiento analítico permite evaluar el desempeño de las vías de acarreo con una precisión y frecuencia que los métodos topográficos tradicionales no pueden igualar. A continuación, se describen las principales herramientas tecnológicas aplicadas a este fin.

2.3.1. FOTOGRAMETRÍA Y USO DE DRONES (UAV)

Los Vehículos Aéreos No Tripulados (UAV o drones) han revolucionado el control geométrico en la minería a tajo abierto. Mediante el uso de fotogrametría digital, estos equipos capturan imágenes superpuestas que, tras ser procesadas, generan Modelos Digitales de Terreno (MDT) y nubes de puntos de alta resolución. Esta tecnología permite medir parámetros críticos como el ancho operativo de la calzada, los radios de curvatura, las pendientes y la altura de las bermas de seguridad de manera casi instantánea (Arrascue Fuentes, 2021).

La principal ventaja del uso de drones radica en la seguridad y la frecuencia: permite levantar información topográfica de rutas activas sin necesidad de detener el tráfico ni exponer al personal a la línea de fuego de los equipos pesados. Además, la superposición temporal de estos vuelos facilita la detección temprana de deformaciones superficiales, baches o pérdida de peralte antes de que impacten negativamente en el ciclo de acarreo.

2.3.2. TELEMETRÍA VEHICULAR Y SISTEMAS DE DESPACHO

La telemetría consiste en la medición, transmisión y registro de datos a distancia. En el contexto del acarreo minero, los camiones modernos están equipados con múltiples sensores que monitorean el comportamiento de sus componentes en tiempo real. Plataformas de gestión de flotas y telemetría avanzada (como SmartRView o similares) capturan variables cinemáticas y mecánicas como la velocidad de desplazamiento, las aceleraciones, los eventos de frenado brusco, las RPM del motor y el consumo instantáneo de combustible (Ágreda Ajén, 2018).

- **SmartRView:** herramienta que permite registrar y procesar variables operativas en tiempo real, tales como velocidad, temperatura, presión de neumáticos, entre otras. Este insumo tecnológico proporciona un sustento cuantitativo a las decisiones de rediseño o mantenimiento vial, alineando el desempeño de los equipos con las condiciones reales de la infraestructura vial minera.

Al cruzar esta data algorítmica con el posicionamiento GPS del equipo, es posible georreferenciar el desempeño del camión. Esto significa que la mina puede identificar exactamente en qué coordenada geométrica de la vía los equipos están consumiendo más diésel, perdiendo velocidad o sufriendo mayor impacto por vibración, convirtiendo al propio camión en un "sensor rodante" que evalúa el estado del camino.

2.3.3. ANALÍTICA DE DATOS E INTELIGENCIA ARTIFICIAL (IA)

La consolidación de los grandes volúmenes de información (Big Data) provenientes tanto de los drones como de la telemetría vehicular requiere herramientas informáticas avanzadas para su interpretación. El uso de Inteligencia Artificial (IA) y plataformas analíticas (como Strayos) permite procesar estos registros para generar tableros de control y mapas de calor (Heatmaps).

Estos mapas visualizan gráficamente las zonas de mayor fricción, demoras o ineficiencia energética dentro de la mina, utilizando escalas de colores sobre el plano real de la operación.

Asimismo, la aplicación de modelos algorítmicos permite calcular valores de impacto (como los valores SHAP de la teoría de juegos) para cuantificar cómo cada variable independiente —sea la dirección del tránsito, el tipo de camión o la condición de carga— afecta el rendimiento general del ciclo. Gracias a esta analítica de datos, el mantenimiento de vías deja de basarse en la intuición o en rutinas estáticas para convertirse en una gestión predictiva y focalizada, garantizando que los recursos (como las motoniveladoras y cisternas) se dirijan a los tramos críticos que mayor retorno económico y operativo generarán (Arrascue Fuentes, 2021).

2.4. HIPÓTESIS

2.4.1. HIPÓTESIS GENERAL

- La implementación de un estándar para gestionar el diseño, construcción y mantenimiento de las vías de acarreo incrementa la velocidad y reduce el consumo de combustible en la Unidad Minera Constancia – Hudbay Perú S.A.C.

2.4.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICAS

- El diagnóstico actual nos permite identificar deficiencias en el diseño, construcción y mantenimiento de las vías de acarreo en la Unidad Minera Constancia – Hudbay Perú S.A.C.
- La gestión estandarizada del diseño y construcción de las vías de acarreo incrementa de manera significativa la velocidad de los camiones en la Unidad Minera Constancia – Hudbay Perú S.A.C.

- Se identifica una reducción en el consumo de combustible de los camiones al gestionar un estándar de mantenimiento de las vías de acarreo en la Unidad Minera Constancia – Hudbay Perú S.A.C.

2.5. OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES

Tabla 1

Operacionalización de las variables

Variable	Dimensiones	Indicadores	Unidad de Medida
Independiente: Gestión del diseño, construcción y mantenimiento de vías de acarreo	Diseño geométrico y estructural	Cumplimiento de estándares técnicos STD-OM-108	% de conformidad al diseño
	Control constructivo y tecnológico	Calidad del afirmado y compactación	% de densidad alcanzada
		Monitoreo de vías mediante tecnología	Nº de inspecciones digitales / mes
	Mantenimiento preventivo	Frecuencia de mantenimiento programado	Nº de intervenciones/mes
Dependiente: Eficiencia operativa en la Unidad Minera Constancia	Productividad y desempeño de equipos	Velocidad promedio de los camiones de acarreo	km/h
		Consumo de combustible por ciclo	galones/tránsito y % de reducción
	Gestión de costos operativos	Incremento de la vida útil de los neumáticos	horas de operación (h)
		Tiempos de inactividad de equipos por mantenimiento vial	Horas/mes
	Seguridad vial minera	Tasa de incidentes en pendientes y curvas	Nº de incidentes / mes

Fuente: Elaboración Propia

CAPÍTULO III:

METODOLOGIA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

Por su finalidad, la presente investigación es de tipo aplicada. Según Hernández-Sampieri, Fernández-Collado y Baptista (2021), la investigación aplicada se centra en la resolución de problemas prácticos y en la utilización de los resultados para mejorar una situación específica. En este caso, se busca resolver un problema operativo en la industria minera mediante la utilización de conocimientos teóricos y tecnológicos (estándares de diseño vial y analítica de datos) para optimizar el transporte de material en la Unidad Minera Constancia.

3.2. NIVEL DE INVESTIGACIÓN

El nivel de investigación es explicativo o causal. Según Bernal (2016), este nivel de investigación no solo busca describir un fenómeno, sino que está dirigido a responder por las causas de los eventos y comprender las relaciones de causa-efecto entre variables. En este estudio, se busca comprobar la relación causal directa entre la variable independiente (implementación de la gestión del diseño, construcción y mantenimiento de vías) y la variable dependiente (eficiencia operativa, medida en reducción de consumo de combustible e incremento de velocidades).

3.3. POBLACIÓN

Según Hernández-Sampieri et al. (2021), la población es el conjunto de todos los casos que concuerdan con determinadas especificaciones y sobre los cuales se busca generalizar los resultados. Bajo esta premisa, la población de estudio está conformada por la red total de vías de acarreo (Haul Roads) operativas dentro de la Unidad Minera Constancia - Hudbay Perú S.A.C., así como por la flota completa de camiones de acarreo de gran tonelaje (CAT 793-F y Hitachi EH-4000 AC-3) que transitan por dichas rutas durante el periodo de estudio.

3.4. MUESTRA

La muestra es de tipo no probabilística e intencional (o dirigida). Hernández-Sampieri et al. (2021) señalan que en las muestras no probabilísticas la elección de los elementos no depende de la probabilidad, sino de las características de la investigación y del juicio crítico del investigador. Por ello, la muestra fue seleccionada de manera específica por su criticidad operativa y potencial de optimización, estando constituida por los siguientes tramos intervenidos y evaluados mediante la plataforma SmartRView/Cascadia:

- Tramo 1: Constancia F7.
- Tramo 2: Constancia F3.
- Tramo 3: Pampacancha.
- Tramo 4: Constancia F7 (Segunda intervención).

3.5. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE CAPTURA DE INFORMACIÓN

3.5.1. TÉCNICAS

Bernal (2016) indica que las técnicas son los medios metodológicos empleados para recolectar información objetiva. Dado el enfoque cuantitativo y aplicativo de la investigación, se emplearon técnicas de captura de datos operativos y tecnológicos en campo:

- **Monitoreo Telemétrico:** Recopilación de parámetros cinemáticos e indicadores de los camiones en tiempo real (consumo de combustible y velocidades).
- **Levantamiento Fotogramétrico y Topográfico:** Uso de drones (UAV) para la captura del estado geométrico de las vías de acarreo.
- **Análisis Documental:** Revisión de normativas y estándares internos (como el STD-OM-108) y reportes operativos (Dispatch).

3.5.2. INSTRUMENTOS

Los instrumentos representan las herramientas materiales o digitales mediante las cuales se registran los datos (Hernández-Sampieri et al., 2021). Se utilizaron:

- **Plataformas de Analítica de Datos:** Software SmartRView / Cascadia para el registro exacto de tránsitos, consumo de galones de combustible y velocidades; y software Strayos para la generación de gemelos digitales y mapas de conformidad geométrica.
- **Fichas de Control y Reportes Operativos:** Matrices de registro estructurado para comparar las condiciones iniciales (línea base) frente a los resultados post-intervención.

3.6. TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO DE DATOS

Para analizar la información empírica recopilada se utilizaron técnicas de análisis cuantitativo, tal como recomiendan Hernández-Sampieri et al. (2021) para investigaciones con datos numéricos:

- **Análisis Estadístico Descriptivo:** Uso de promedios, variaciones porcentuales y frecuencias para procesar y estructurar los datos de consumo (gal/tránsito) y velocidades (km/h).
- **Análisis Comparativo (Antes/Después):** Contrastación de los datos operativos de los tramos de la muestra en tres escenarios temporales: Línea base (antes), semana 1 post-intervención, y periodo acumulado.
- **Representación Gráfica:** Generación de gráficos de barras, gráficos de dispersión y líneas de tendencia para visualizar el volumen de tránsitos evaluados,

el ahorro total acumulado de combustible y la eficiencia operativa de las intervenciones.

3.7. GESTIÓN DEL DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y MANTENIMIENTO DE LAS VÍAS DE ACARREO EN LA UNIDAD MINERA CONSTANCIA – HUDBAY PERÚ S.A.C.

Se orienta a la implementación de un estándar para mejorar en la gestión del diseño, construcción y mantenimiento de vías de acarreo, como componente clave en la sostenibilidad de la Unidad Minera Constancia – Hudbay Perú S.A.C. En él se abordan, de manera sistemática y rigurosa, los distintos elementos que permiten vincular la teoría con la práctica operativa, incorporando herramientas de análisis técnico y tecnologías emergentes.

En el contexto actual del sector minero, las vías de acarreo no solo constituyen una infraestructura logística, sino que representan uno de los pilares más sensibles de la eficiencia operativa y del control de costos. Un diseño inadecuado, un mantenimiento deficiente o la ausencia de un monitoreo dinámico durante su construcción puede traducirse en sobrecostos de combustible y disminución de velocidades de la flota de camiones. Estas consecuencias, además de comprometer la continuidad de las operaciones, afectan directamente en los indicadores clave de desempeño (KPI's) que las empresas utilizan para evaluar su rentabilidad y sostenibilidad operativa.

La propuesta que se desarrolla busca atacar frontalmente estas deficiencias mediante la integración de un estándar técnico actualizado, que incluya herramientas digitales de monitoreo en tiempo real. Para ello, se parte de una caracterización detallada de la situación actual en la mina, basada en datos reales y el análisis de la plataforma SmartRView de Cascadia Scientific. Asimismo, se incorporan los lineamientos del procedimiento interno de diseño, construcción y

mantenimiento de vías elaborado por Hudbay Perú S.A.C, integrando criterios multidisciplinarios desde la geotecnia, topografía, ingeniería vial y planificación minera.

De igual forma, el uso de plataformas como STRAYOS ha permitido capturar datos relevantes sobre el estado actual de las vías, validando su eficacia en operaciones mineras de gran escala (Valverde Huamán, 2023).

Asimismo, se propone una estructura escalonada que facilita el análisis progresivo del problema y la construcción de una solución sólida. Esta inicia con una revisión crítica del estado actual de las vías y los desafíos que enfrenta la operación en cuanto a transporte y monitoreo. Luego, se detallan los parámetros técnicos del diseño vial, el seguimiento constructivo y los mecanismos de mantenimiento. Posteriormente, se explora la integración tecnológica mediante el uso de plataformas como SmartRView y su impacto en la toma de decisiones estratégicas, finalizando con el análisis de KPI's (velocidad y consumo de combustible).

Este enfoque metodológico no solo busca responder a una necesidad operativa puntual, sino también proponer una metodología replicable en otras operaciones mineras a nivel nacional, brindando una alternativa moderna y eficiente para la gestión integral de vías de acarreo. En suma, esta tesis pretende demostrar cómo la ingeniería, la tecnología y la gestión pueden integrarse de forma sinérgica para optimizar procesos mineros complejos, como lo es el transporte interno de material.

3.7.1. CONTEXTO OPERATIVO Y DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN ACTUAL

3.7.1.1. CONTEXTO OPERATIVO DE LA UNIDAD MINERA

Comprender el entorno donde se desarrollará la solución técnica es fundamental para garantizar su pertinencia y aplicabilidad. La Unidad Minera Constancia, operada por Hudbay Perú S.A.C., representa una operación de gran escala donde la eficiencia en el transporte interno de

mineral y desmonte es un factor decisivo en la continuidad y rentabilidad del negocio. Esta sección describe las características físicas, geográficas, productivas y logísticas del entorno minero, así como la tipología del parque vehicular, los perfiles de tránsito, la topografía predominante y los requerimientos normativos internos. Con esta información de base, se puede contextualizar con precisión el marco operativo que condiciona el diseño y uso de las vías de acarreo.

La Unidad Minera Constancia se ubica en la región Cusco, en un entorno geográfico y climático desafiante, caracterizado por topografía irregular, altitud elevada y condiciones meteorológicas variables. La operación de esta unidad implica el transporte continuo de grandes volúmenes de material desde los tajos Constancia y Pampacancha hacia los distintos puntos de procesamiento, almacenaje o descarga, a través de una red de vías de acarreo tanto “in pit” como “ex pit”.

Figura 1 : *Principales vías de acarreo de la U.M. Constancia*



Fuente: Elaboración propia

Esta red vial constituye una infraestructura dinámica que debe adaptarse a los cambios en la planificación minera, la expansión de fases y el uso intensivo de equipos de acarreo como los camiones CAT 793-F y los Hitachi EH-4000 AC-3. Estos vehículos requieren condiciones viales estrictamente controladas, dado su tamaño, capacidad de carga y sensibilidad a parámetros como pendiente, peralte y ancho de vía.

En este contexto, se ha identificado una necesidad crítica de estandarizar el diseño, construcción y mantenimiento de las vías de acarreo para garantizar su funcionalidad continua. El uso de plataformas como STRAYOS ha permitido capturar datos relevantes sobre el estado actual de las vías, facilitando la detección de tramos fuera de especificación y el planteamiento de acciones correctivas en parámetros como pendiente, ancho, altura de bermas y peralte.

La mina debe entenderse como un conjunto integrado de procesos en el cual el transporte adquiere un papel central, no solo por ser el de mayor costo dentro de la operación, sino también por su impacto directo en la seguridad y la salud ocupacional. En este sentido, disponer de un diseño adecuado, un mantenimiento oportuno y un control riguroso en la construcción de las vías es de vital importancia.

3.7.1.2. PROPÓSITOS DEL DESARROLLO TÉCNICO

Toda solución técnica debe responder a objetivos concretos, medibles y alineados a los desafíos que enfrenta la operación. En esta sección se define el propósito que guiará el desarrollo del proyecto el cual es la toma de decisiones mediante el uso de tecnología digital. Este objetivo permitirá orientar las acciones y evaluar, al finalizar el proceso, si se ha alcanzado un impacto tangible en la operación minera.

Los objetivos del desarrollo técnico en este capítulo son los siguientes:

- Diagnosticar el estado actual de las vías de acarreo mediante imágenes aéreas y análisis mediante IA.
- Estandarizar los parámetros de diseño geométrico de las vías, incluyendo subrasante, subbase, base, superficie de rodadura, pendientes, peraltes, anchos, bermas de seguridad y drenaje.
- Realizar un seguimiento con alta precisión durante la construcción de las para evitar desviaciones en el diseño.
- Implementar un plan de mantenimiento orientada a la prevención y respuesta rápida, con intervenciones programadas.
- Optimizar la seguridad vial mediante señalización adecuada, muros de contención, rampas de alivio y control de velocidad.
- Integrar soluciones tecnológicas como SmartRView para identificar mejoras viales en el rendimiento del acarreo.

El alcance de este lineamiento está orientado al personal de operaciones mina, al equipo de servicios técnicos y a todos los colaboradores que participan de forma directa o indirecta en el proceso de diseño, construcción y mantenimiento de las vías dentro de las operaciones mineras, estableciendo una guía clara y uniforme para quienes intervienen en esta labor.

3.7.1.3. CONDICIONALES ACTUALES Y PROBLEMÁTICA EN LAS VIAS DE ACARREO

El diagnóstico inicial de la infraestructura vial minera permite establecer el punto de partida para cualquier proceso de mejora. En esta sección se realiza un análisis crítico del estado actual de las vías de acarreo en la Unidad Minera Constancia considerando aspectos técnicos del diseño. A través de este análisis se revelan brechas importantes que afectan la eficiencia del acarreo, la

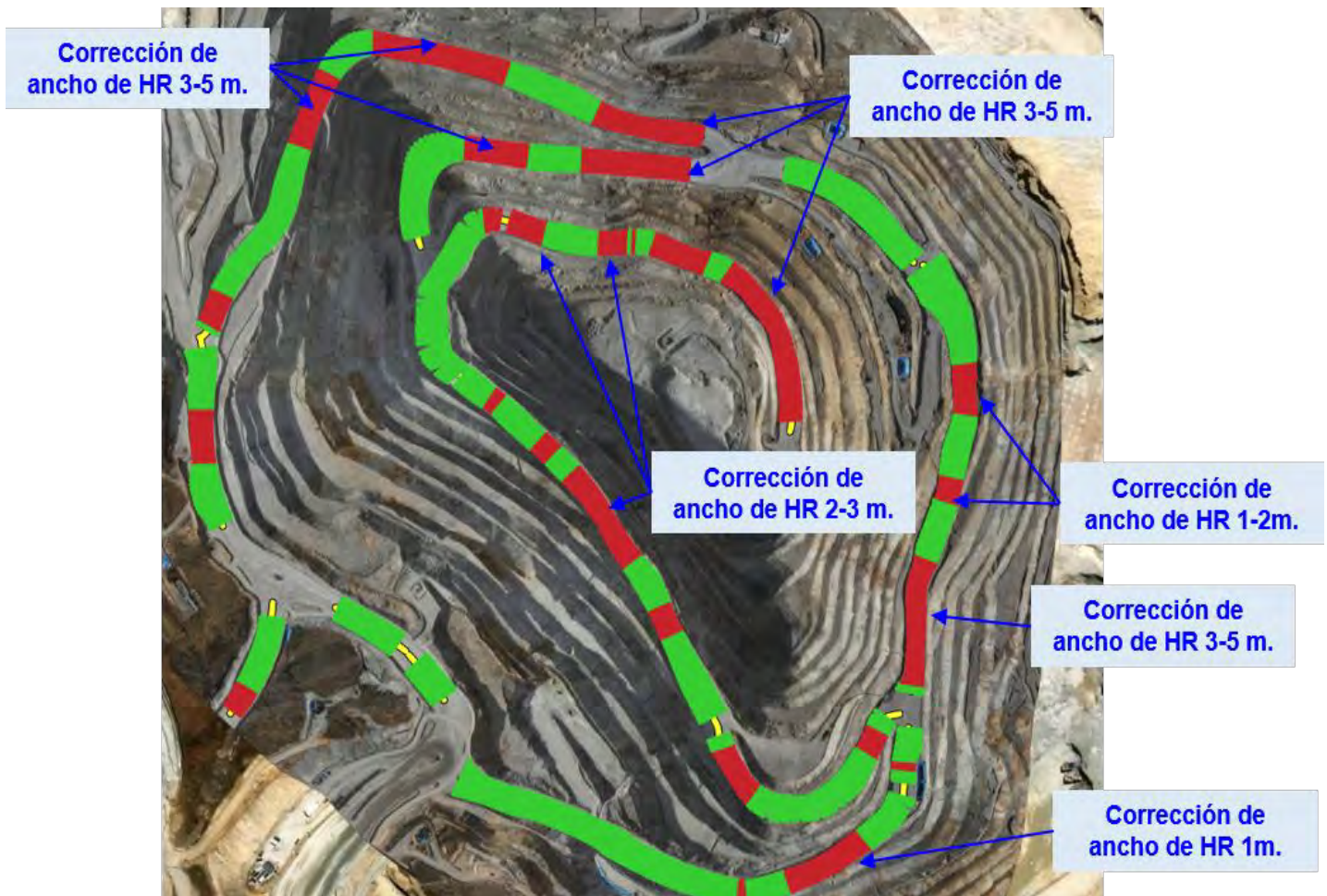
seguridad vial interna y la sostenibilidad del sistema de transporte minero. Este punto es clave para justificar la necesidad de estandarización.

- **EVALUACIÓN ANCHO DE VIAS DE ACARREO (HAUL ROAD):**

A continuación, se presenta los anchos actuales de las principales vías de acarreo de la Unidad Minera Constancia donde se considera la siguiente configuración de parámetros para el cálculo con el software STRAYOS del ancho del HR (Haul Road).

- ✓ **Color rojo:** ancho menor a 25.5 m.
- ✓ **Color verde:** ancho mayor a 25.5 m.

Figura 2: *Tramos con anchos por remediar del Tajo Constancia*



Fuente: Elaboración propia – Software Strayos

Figura 4: *Tramos con anchos por remediar del Tajo Pampacancha*



Fuente: Elaboración propia – Software Strayos

Figura 3: *Tramos con anchos por remediar de las vías de acarreo hacia el TMF*



Fuente: Elaboración propia – Software Strayos

Figura 6: *Tramos con anchos por remediar de las vías de acarreo hacia el WRF*



Fuente: Elaboración propia – Software Strayos

Figura 5: *Tramos con anchos por remediar de las vías de acarreo hacia Chancadora*



Fuente: Elaboración propia – Software Strayos

- **EVALUACIÓN DE PENDIENTE DE VIAS DE ACARREO (HAUL ROAD):**

A continuación, se presenta las pendientes actuales de las principales vías de acarreo de la Unidad Minera Constancia donde se considera la siguiente configuración de parámetros para el cálculo con el software STRAYOS de la pendiente del HR (Haul Road).

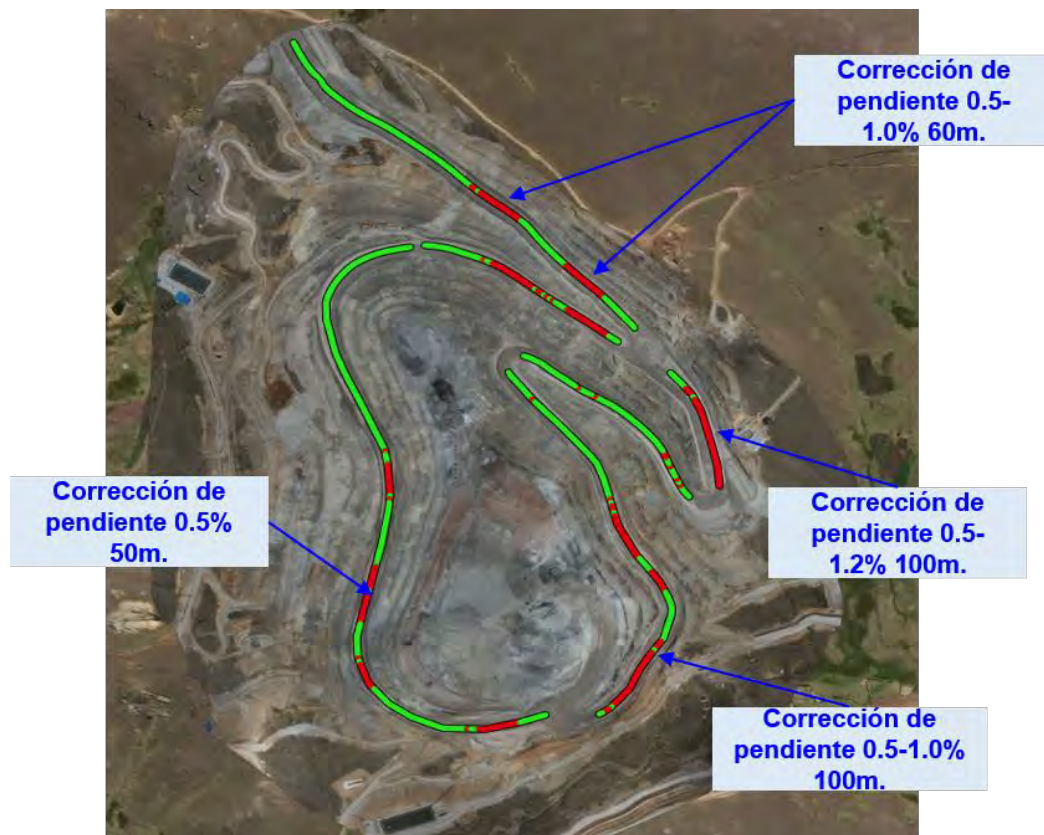
- ✓ **Color verde:** pendiente menor a 10%.
- ✓ **Color rojo:** pendiente mayores a 10%.

Figura 7: *Tramos con pendiente por remediar del Tajo Constancia*



Fuente: Elaboración propia – Software Strayos

Figura 8: *Tramos con pendiente por remediar del Tajo Pampacancha*



Fuente: Elaboración propia – Software Strayos

Figura 9: *Tramos con pendiente por remediar de las vías de acarreo hacia el TMF*



Fuente: Elaboración propia – Software Strayos

Figura 10: *Tramos con pendiente por remediar de las vías hacia Canchadora*



Fuente: Elaboración propia – Software Strayos

- **EVALUACIÓN DE PERALTE DE VIAS DE ACARREO (HAUL ROAD):**

A continuación, se presenta los peraltes actuales de las principales vías de acarreo de la Unidad Minera Constancia donde se considera la siguiente configuración de parámetros para el cálculo con el software STRAYOS del peralte del HR (Haul Road).

- ✓ **Color verde:** peralte menor a 4%.
- ✓ **Color rojo:** peraltes mayores a 4%.

Figura 11: *Tramos con peralte por remediar de las vías de acarreo hacia el TMF*



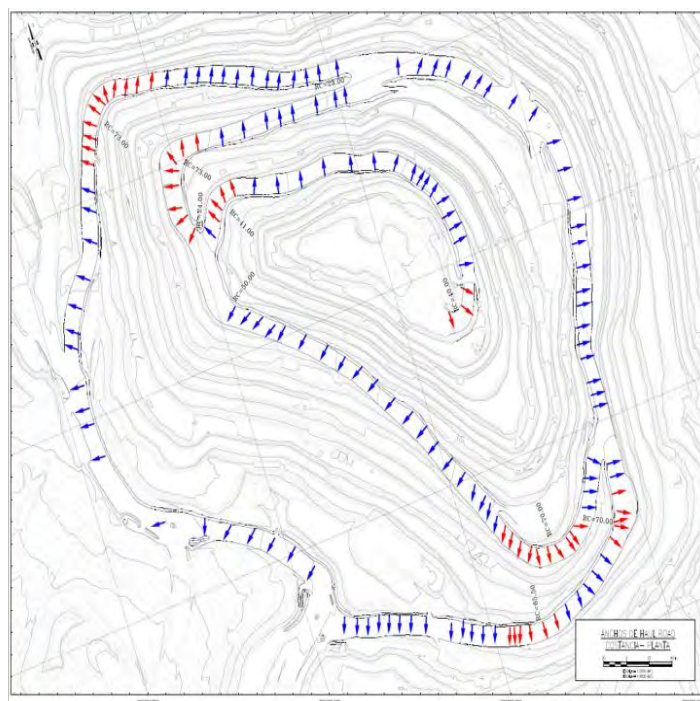
Fuente: Elaboración propia – Software Strayos

Figura 13: *Tramos con peralte por remediar de las vías de acarreo hacia Chancadora*



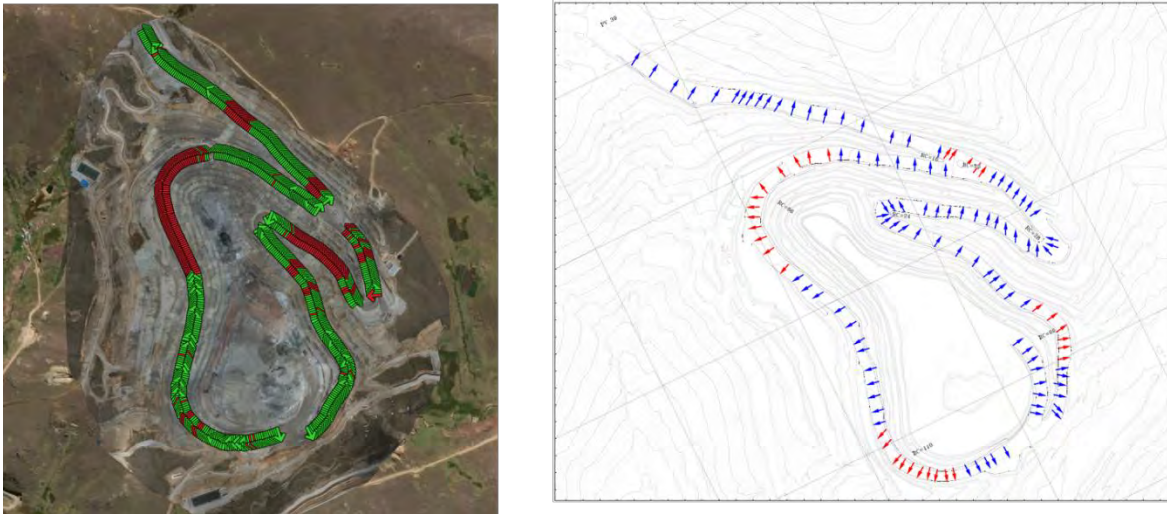
Fuente: Elaboración propia – Software Strayos

Figura 12: *Tramos con peralte por remediar del Tajo Constancia*



Fuente: Elaboración propia – Software Strayos

Figura 14: *Tramos con peralte por remediar del Tajo Pampacancha*



Fuente: Elaboración propia – Software Strayos

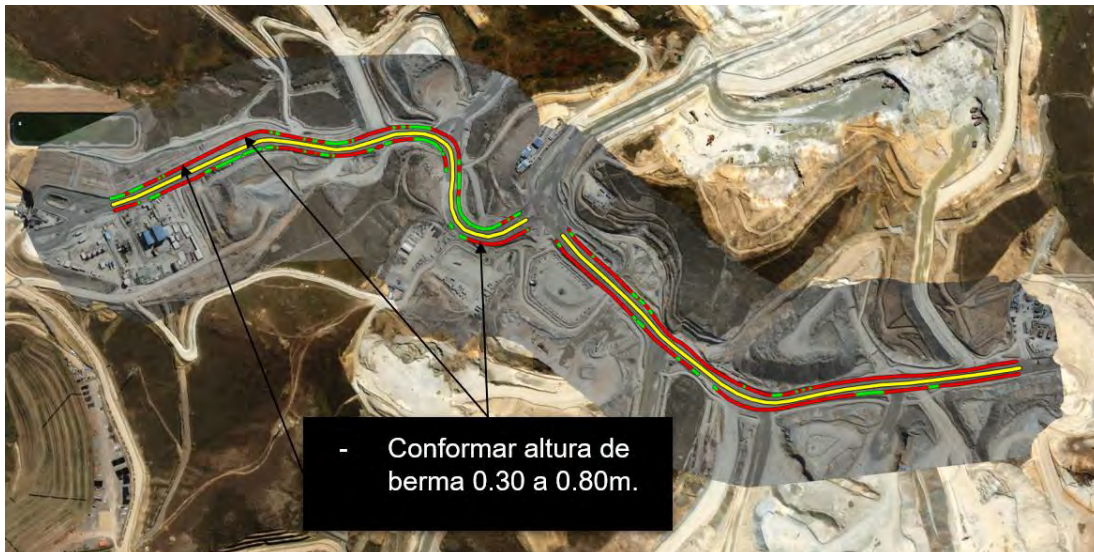
- **EVALUACIÓN ALTURA DE BERMAS (HAUL ROAD):**

A continuación, se presenta las alturas de berma actuales de las principales vías de acarreo de la Unidad Minera Constancia donde se considera la siguiente configuración de parámetros para el cálculo con el software STRAYOS de la altura de berma del HR (Haul Road).

- ✓ **Color rojo:** bermas menores de 2.8 m.

- ✓ **Color verde:** bermas mayores a 2.8 m.

Figura 15: *Tramos con bermas por remediar de las vías hacia Chancadora*



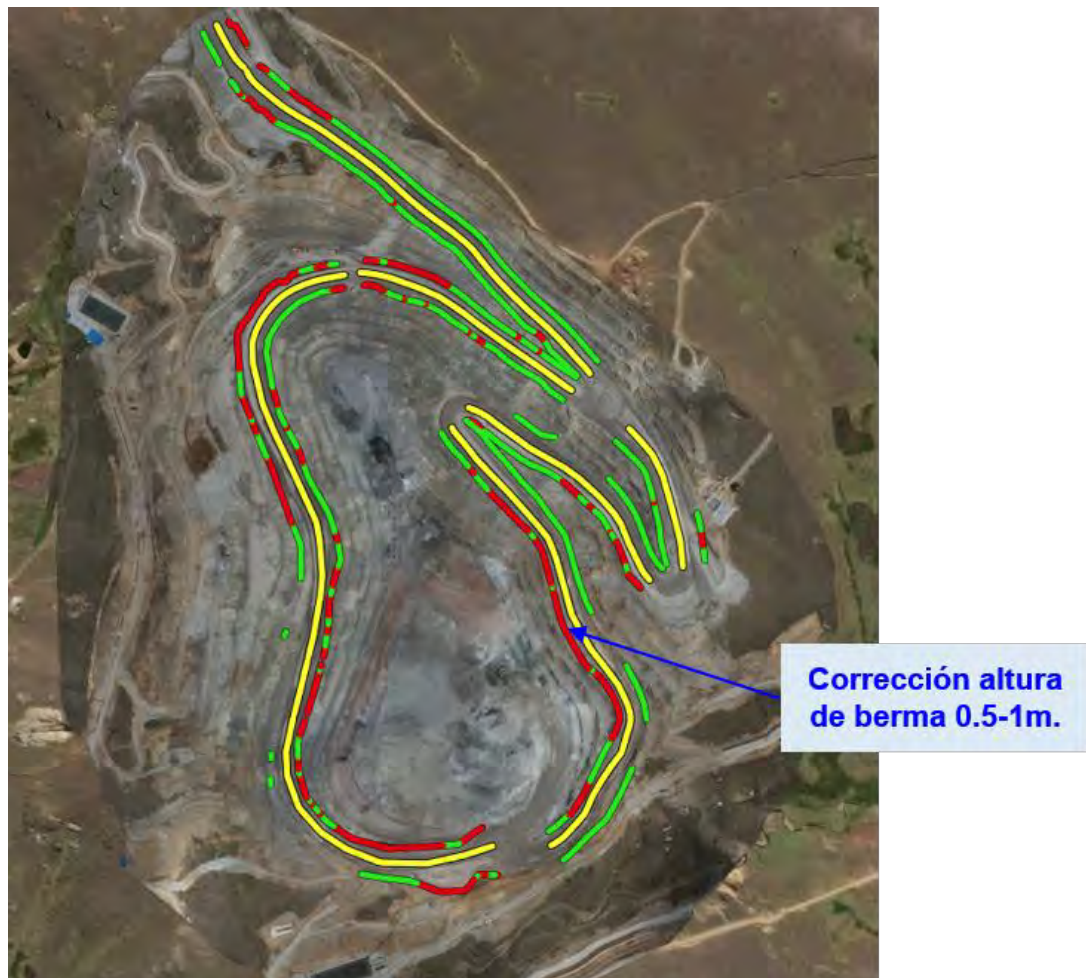
Fuente: Elaboración propia – Software Strayos

Figura 16: *Tramos con bermas por remediar de las vías de acarreo hacia el TMF*



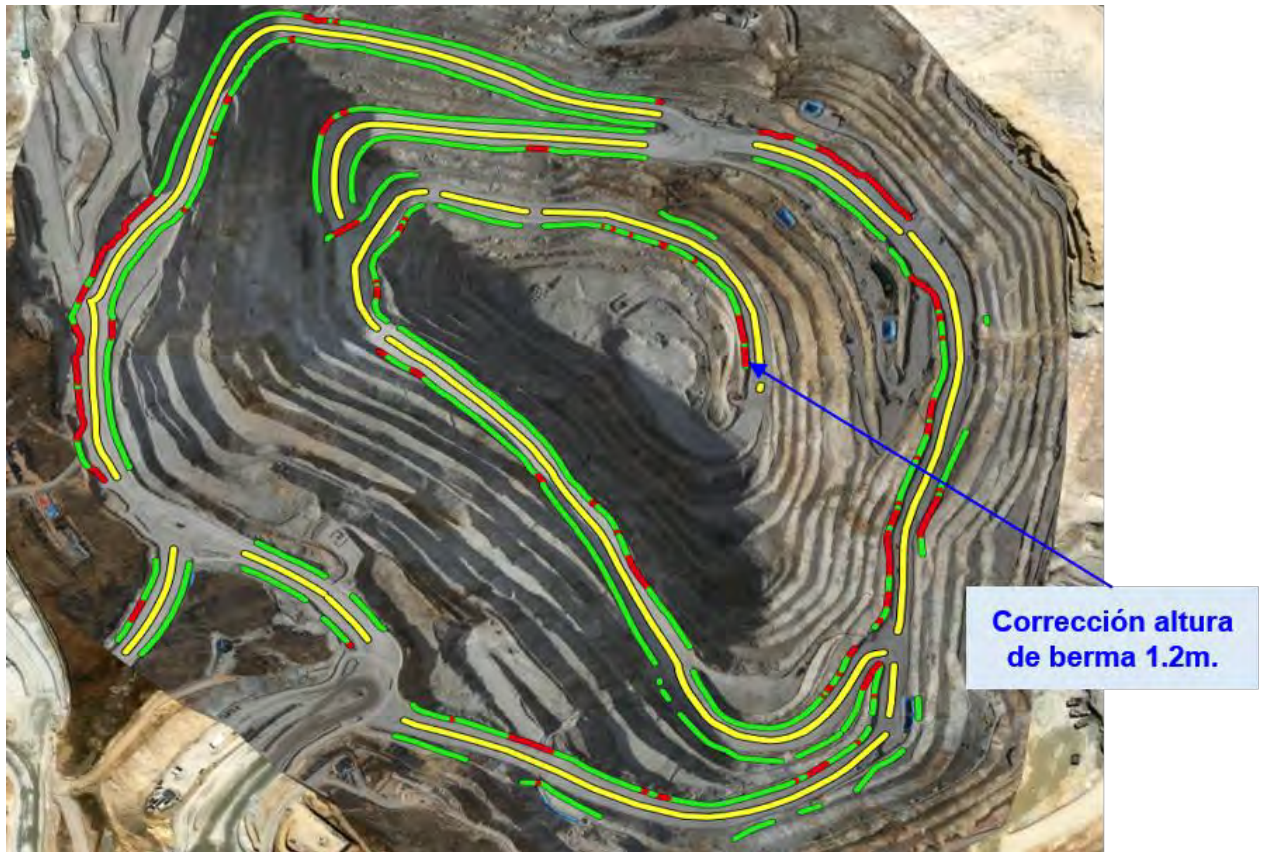
Figura 17: *Tramos con bermas por remediar del Tajo Pampacancha*

Fuente: Elaboración propia – Software Strayos



Fuente: Elaboración propia – Software Strayos

Figura 18: *Tramos con bermas por remediar del Tajo Constancia*



Corrección altura
de berma 1.2m.

Fuente: Elaboración propia – Software Strayos

Las vías de acarreo en la Unidad Minera Constancia muestran actualmente una diversidad de condiciones geométricas y estructurales, muchas de las cuales no cumplen con los estándares establecidos por la empresa. Los análisis realizados con la herramienta de inteligencia artificial STRAYOS han revelado múltiples tramos con pendientes superiores al 10%, anchos insuficientes (<25.5 m), peraltes fuera de especificación (>4%) y altura de bermas menores a 2.8m.

A pesar de contar con procedimientos internos y experiencia operativa, existen inconsistencias en el diseño, construcción y mantenimiento vial, generando sobrecostos, pérdida de eficiencia, e incluso riesgos operacionales.

Entre los principales problemas identificados en el diseño y mantenimiento de las vías de acarreo se destacan:

- Diseños empíricos no estandarizados, que han sido modificados operativamente sin sustento técnico formal, afectando la continuidad estructural de las rutas.
- Falta de integración entre planificación y ejecución, lo que ha derivado en sobrecostos por retrabajos.
- Ausencia de un estándar donde se ha desarrollado procedimientos específicos con participación multidisciplinaria.
- Mantenimiento reactivo, orientado más a la corrección que a la prevención, con limitaciones en planificación adecuada para épocas de lluvia o alta demanda operativa.

Estos aspectos impactan directamente en el rendimiento de los equipos, disminuyendo su velocidad y aumentando el consumo de combustible.

3.7.1.4. LIMITACIONES EN EL CONTROL DE TRANSPORTE Y MONITOREO

El transporte minero es una operación dinámica y compleja, que requiere herramientas precisas de seguimiento. En este apartado se exponen las limitaciones del sistema actual de monitoreo, desde la ausencia de retroalimentación operativa en tiempo real, hasta la falta de correlación entre el comportamiento de los vehículos y las condiciones de la vía. Se evidencia la necesidad de implementar soluciones tecnológicas que permitan monitorear variables clave, procesarlas y generar alertas o recomendaciones útiles para la gestión de infraestructura vial minera.

La gestión del transporte de material se ve actualmente limitada por una infraestructura tecnológica insuficiente para monitorear en tiempo real variables críticas del acarreo, tales como velocidades, condiciones del camino y consumo de combustible.

Recientemente se han dado pasos importantes con la integración de la plataforma SmartRView y Strayos, los cuales están disminuyendo la brecha significativa que todavía existe.

3.7.1.5. IMPLEMENTACIÓN DEL ESTÁNDAR EN LA UNIDAD MINERA CONSTANCIA

La implementación del estándar de diseño, construcción y mantenimiento de vías de acarreo en la Unidad Minera Constancia representa un proceso estratégico que articula parámetros técnicos normativos con la realidad operativa del tajo. Este estándar, contenido en el documento STD-OM-108, establece lineamientos claros sobre geometría, estructura, drenaje, señalización, seguridad y monitoreo de las vías, siendo la base para optimizar el transporte de materiales y garantizar condiciones seguras y sostenibles.

La traducción de estos lineamientos a la práctica minera implica adecuar los anchos de vías, peraltes, pendientes, intersecciones y muros de seguridad al contexto geomecánico y climático de la operación. En este sentido, el procedimiento de implementación no solo asegura la uniformidad de criterios técnicos, sino que también busca reducir el riesgo de accidentes, mejorar la eficiencia en el acarreo aumentando las velocidades y disminuyendo el consumo excesivo de combustible.

Los documentos de referencia que sustentan el presente estándar incluyen un conjunto de normas y directivas nacionales e internas que regulan el transporte, el tránsito y la seguridad en las operaciones. Entre ellos se encuentra el Decreto Supremo N.º 058-2003-MTC, que corresponde al Reglamento Nacional de Vehículos y sus modificatorias, así como la Directiva N.º 002-2006-MTC/15, referida a la clasificación vehicular y a la estandarización de las características registrables. También se consideran el D.S. N.º 021-2008-MTC, que regula el transporte terrestre de materiales y residuos peligrosos, el D.S. N.º 040-2008-MTC sobre licencias de conducir, y el

D.S. N.º 016-2009-MTC, que corresponde al Reglamento Nacional de Tránsito. Asimismo, se incluye el D.S. N.º 017-2009-MTC, relativo a la administración del transporte, y la Ley N.º 28256, que regula específicamente el transporte de materiales y residuos peligrosos.

En materia de seguridad laboral, se incorpora el D.S. N.º 024-2016-EM, Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería, junto con su modificatoria el D.S. N.º 023-2017-EM, como base para la gestión de riesgos en vías de acarreo. También se hace referencia a la Ley N.º 27181, Ley General de Transporte y Tránsito Terrestre, y a la Directiva N.º 008-2008-MTC, que establece normas y procedimientos para el otorgamiento de autorizaciones especiales en vehículos destinados al transporte de mercancías especiales o de características particulares.

Finalmente, se consideran instructivos internos de la propia operación minera, tales como el INS-ST-213 sobre diseño de rampas, y el INS-OM-114 referido al mantenimiento de vías en condiciones adversas, los cuales complementan la normativa nacional y aseguran que el diseño y mantenimiento de las vías de acarreo se realicen bajo parámetros técnicos consistentes con la normativa vigente y las buenas prácticas operativas.

3.7.2. GESTIÓN DEL DISEÑO DE VIAS DE ACARREO

3.7.2.1. ADAPTACIÓN DE PARÁMETROS GEOMÉTRICOS AL CONTEXTO OPERATIVO

La adaptación de parámetros implica tomar los criterios definidos en el estándar –como anchos mínimos de 32,0 m en vías de dos carriles, radios mínimos de 33 m en curvas, pendientes máximas de 10 % y peraltes entre 3 % y 5 %. Este proceso reconoce que cada mina posee particularidades relacionadas con su geometría, disponibilidad de materiales de afirmado, condiciones de drenaje y régimen de lluvias. En Constancia, la adaptación también incluye la segregación de vías auxiliares para vehículos livianos, la ubicación de rampas de alivio en zonas

críticas y la implementación de bermas con altura mínima equivalente a $\frac{3}{4}$ de la llanta de mayor diámetro de los equipos. Esta adaptación garantiza que la operación no solo cumpla con los criterios internacionales y corporativos, sino que además responda a las necesidades locales de seguridad y productividad.

El diseño del trazado de cada vía de acarreo responde a la necesidad de movilizar distintos tipos de materiales desde su punto de origen hasta el destino final, considerando siempre las condiciones propias de la operación. Factores como la geometría del tajo, la topografía del terreno, los límites establecidos por los permisos y las restricciones operativas determinan la configuración final de la vía tanto en planta como en pendiente.

Dentro de lo posible, se debe procurar reducir al mínimo la presencia de curvas pronunciadas o contracurvas, así como mantener una pendiente uniforme, de manera que la vía resulte más predecible y cómoda para el operador. Esto contribuye directamente a mejorar la seguridad, reducir el desgaste de los equipos y optimizar la productividad del transporte.

La velocidad de diseño está condicionada por diversos aspectos, entre los que destacan el tipo de equipo de acarreo utilizado, la pendiente proyectada, la resistencia a la rodadura y las condiciones climáticas que afectan la operación.

En este sentido, para equipos circulando cargados en plano o en rampas con inclinación ascendente o descendente, la pendiente máxima recomendada no debe superar el 10%. El mismo criterio aplica para los equipos que transitan vacíos, ya sea en tramos planos o en rampas, donde igualmente la pendiente de diseño debe mantenerse en un límite igual o inferior al 10%. Estos parámetros permiten garantizar un balance entre eficiencia operativa, durabilidad de la infraestructura vial y seguridad en la operación minera.

Tabla 2: Rango de velocidades en condiciones normales

Rango de Velocidades en Condiciones Normales			
Equipo	Pendientes	Vacio	Cargado
CAMIÓN 793-F	-8%	45 - 50 km/h	24 - 43 km/h
	-10%	40 - 45 km/h	21 - 32 km/h
	8%	40 - 45 km/h	16 - 18 km/h
	10%	33 - 38 km/h	13 - 15 km/h
	Vía Recta mayor a 100 m	49 - 55 km/h	50 - 55 km/h
	Curva Abierta	35 - 45 km/h	28 - 35 km/h
	Curva Cerrada	25 - 35 km/h	25 - 32 km/h
CAMIÓN HITACHI EH- 4000-AC-3	-8%	40 - 45 km/h	24 - 43 km/h
	-10%	30 - 35 km/h	21 - 32 km/h
	8%	38 - 43 km/h	16 - 18 km/h
	10%	34 - 38 km/h	13 - 15 km/h
	Vía Recta mayor a 100 m	45 - 50 km/h	50 - 55 km/h
	Curva Abierta	30 - 40 km/h	28 - 35 km/h
	Curva Cerrada	15 - 25 km/h	25 - 32 km/h

Fuente: Área de Entrenamiento - Unidad Minera Constanca

Tabla 3: Rango de velocidades en condiciones críticas

Velocidades de Camiones Mineros en Zona Críticas (VÍAS RESBALADIZAS)				
Zonas Críticas	Equipo	Condiciones	Vacío	Cargado
1. La bajada del PV 39 hacia el tajo Pampacancha por ambas rampas ingreso donde los camiones mineros bajan vacíos	CAMION MINERO CAT 793-F	Condiciones Normales	De 23 a 32 km/h	De 17 a 23 km/h
		Condiciones Críticas inicio de Lluvia	De 15 a 23 km/h	De 13 a 17 km/h
2. La bajada del PV 39 hacia el dique Cunahuri donde los camiones bajan cargados	CAMIÓN HITACHI EH-4000-AC-3	Condiciones Normales	De 20 a 32 km/h	De 18 a 22 km/h
3. Los primeros 500 metros de la vía al TMF donde los camiones mineros bajan cargados		Condiciones Críticas inicio de Lluvia	De 14 a 18 km/h	De 12 a 16 km/h
4. Tramo de vía de camión cargado hacia chancadora desde la segunda curva hasta la garza				
5. Primer tramo de rampa por el momento de bajada de Fase 05.				

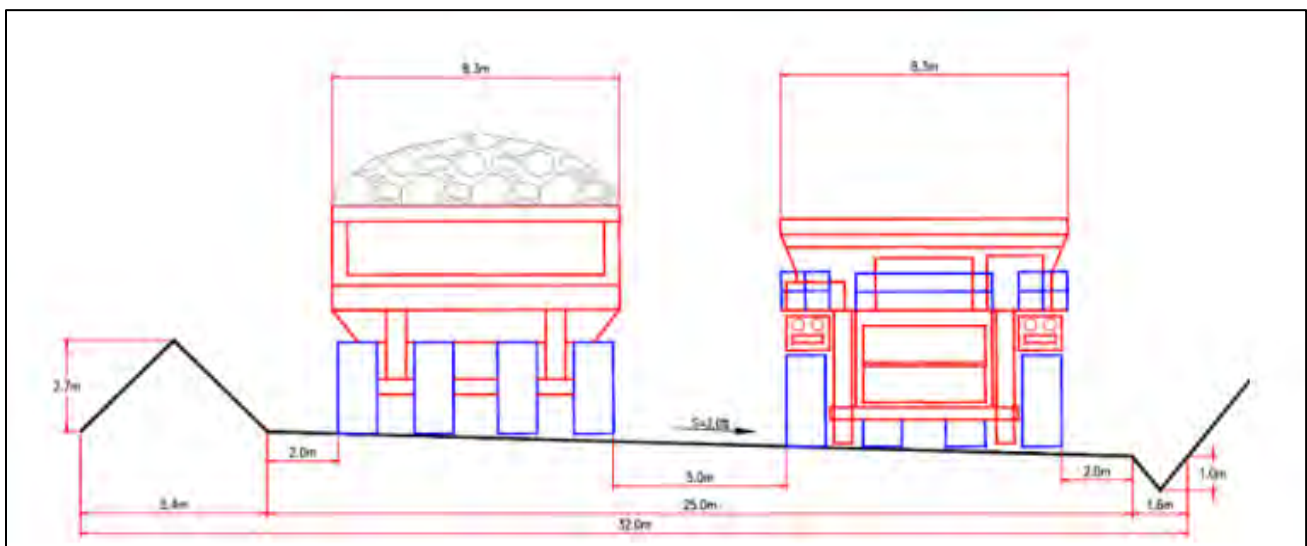
Fuente: Área de Entrenamiento - Unidad Minera Constanca

3.7.2.2. INDICADORES DE CONFORMIDAD GEOMÉTRICA Y ESTRUCTURAL

Para medir la eficacia del control, se definen indicadores como el % de Conformidad de Ancho, % de Conformidad de Pendiente, Índice de Riesgo en Curvas y Brecha de Bermas Seguras. Estos KPI reflejan en qué medida las vías cumplen con los parámetros de diseño y permiten priorizar las zonas críticas. Su evaluación periódica no solo contribuye a la seguridad, sino que también tiene impacto económico al reducir el desgaste de neumáticos y el consumo de combustible.

El diseño del ancho de las vías de acarreo se establece en función de las dimensiones del equipo de mayor tamaño que se utilice en la operación, lo que garantiza condiciones de tránsito seguras y eficientes. En el caso de Hudbay, se toma como referencia el camión de acarreo modelo 793F, cuyo ancho total entre neumáticos alcanza los 8,3 metros. Para los haul roads de dos carriles en secciones rectas, el cálculo incluye el espacio destinado al tránsito de los vehículos, al muro de seguridad, a las cunetas laterales y a la berma central cuando es requerida, resultando en un ancho total de 32,0 metros.

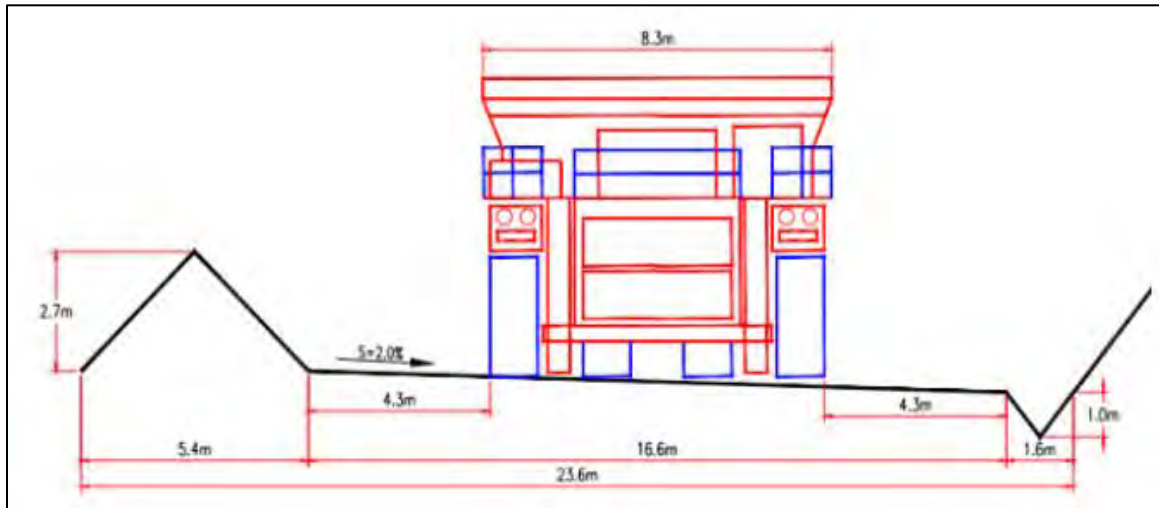
Figura 19: Estructura del ancho de la vía con dos carriles



Fuente: Área de Planeamiento Mina - Unidad Minera Constancia

En el caso de vías de un solo carril, se utiliza un criterio similar, aunque con distancias de 4,3 metros hacia la berma y la cuneta, obteniéndose un ancho de vía de 23,6 metros.

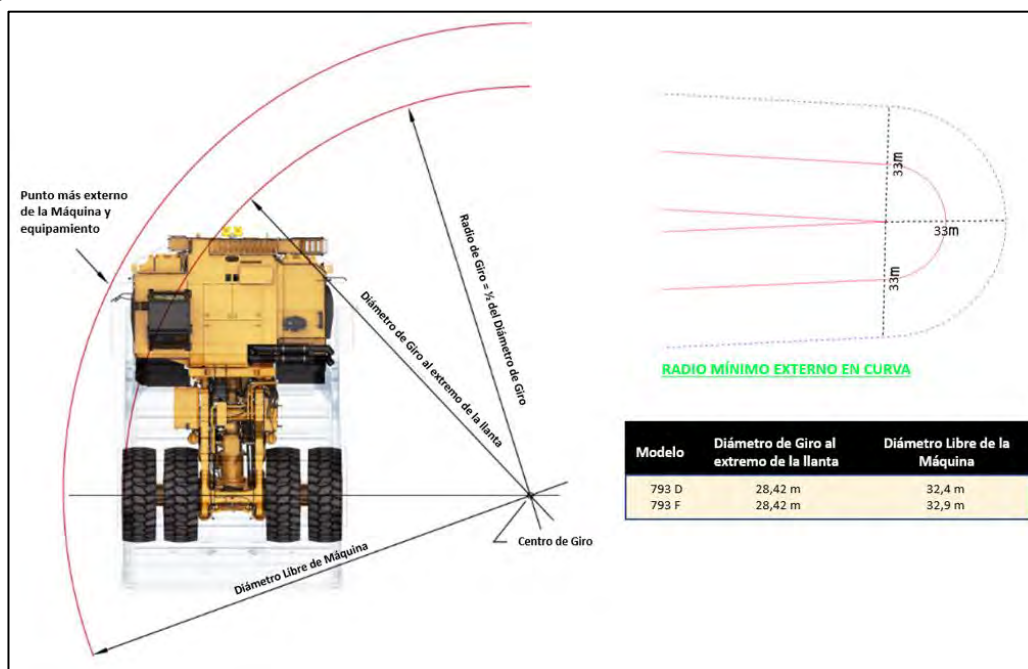
Figura 20: Estructura del ancho de la vía con un carril



Fuente: Área de Planeamiento Mina - Unidad Minera Constanca

En los tramos de contra pendiente o “switchback”, el diseño geométrico considera parámetros específicos. El radio mínimo externo de las curvas está definido en 33 metros, lo que asegura que los equipos puedan maniobrar de manera segura en secciones críticas.

Figura 21: Radio mínimo externo en curva



Fuente: Área de Planeamiento Mina - Unidad Minera Constanca

Para estos tramos, la pendiente de diseño debe ser horizontal, es decir, de 0%, con el fin de evitar esfuerzos adicionales al tránsito de los camiones.

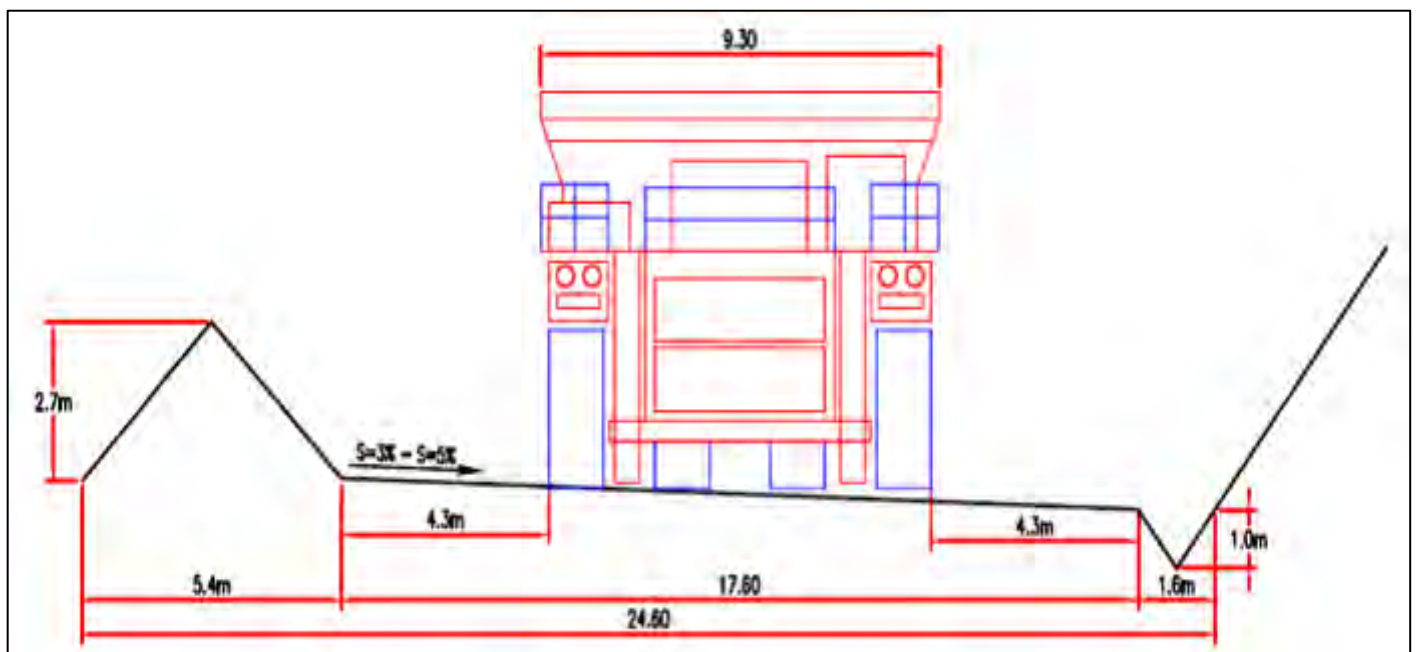
Figura 22: Perfil de curva en pendiente



Fuente: Área de Planeamiento Mina - Unidad Minera Constancia

Asimismo, se establece la aplicación de un peralte de entre 3% y 5% para contrarrestar la acción de la fuerza centrífuga que tiende a desplazar los equipos hacia el exterior de la curva. En tramos de switchback, donde las velocidades no superan los 10 km/h, el peralte adoptado alcanza un valor de 5%.

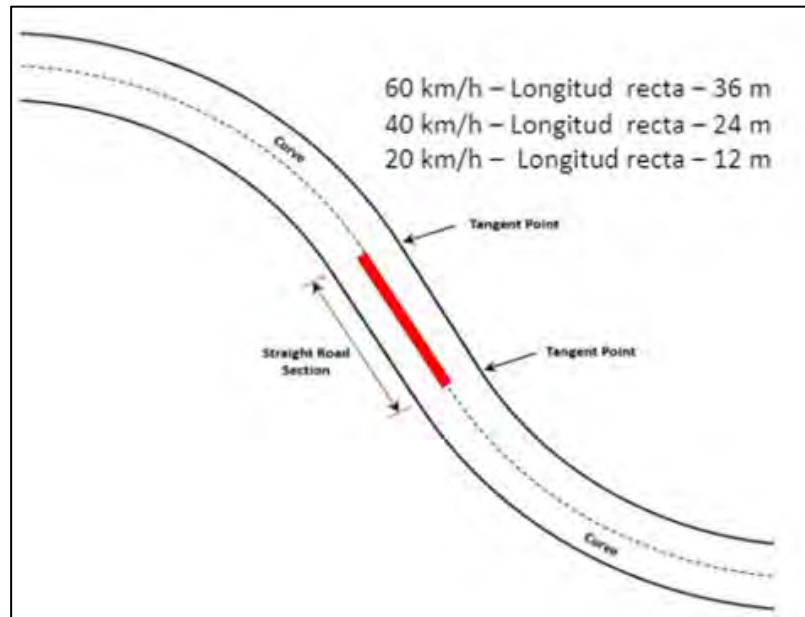
Figura 23: Peralte en curva



Fuente: Área de Planeamiento Mina - Unidad Minera Constancia

Asimismo, en el caso de las curvas horizontales inversas (también conocidas como contracurvas), estas deben estar separadas obligatoriamente por una sección recta de longitud mínima.

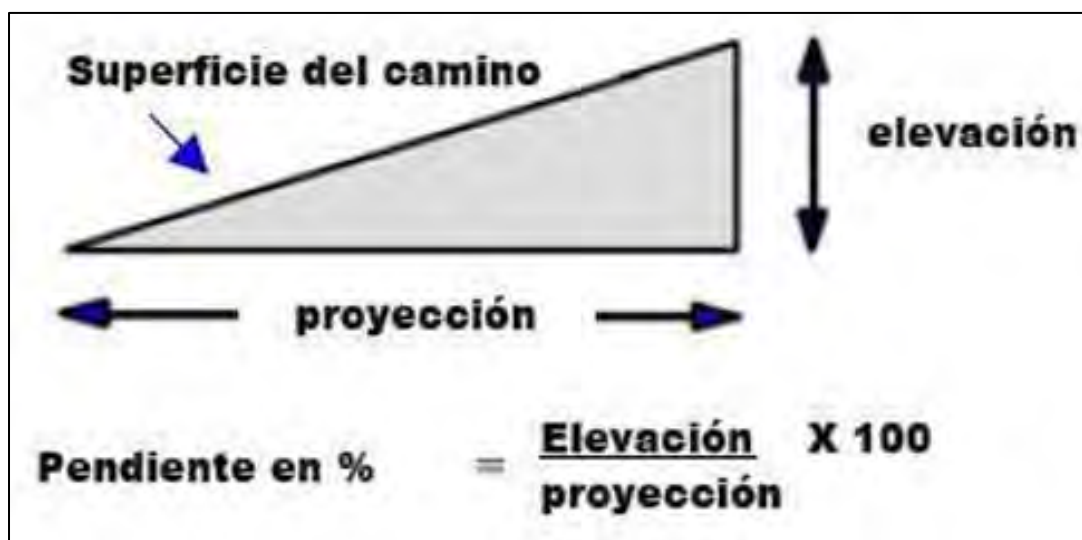
Figura 24: *Alineación de Haul Road*



Fuente: Área de Planeamiento Mina - Unidad Minera Constanca

El diseño longitudinal de los haul roads incorpora pendientes que no deben exceder el 10% en las rampas principales y auxiliares, buscando un equilibrio entre corte y relleno en el trazado de la rasante para optimizar la operación.

Figura 25: *Pendiente de una vía de acarreo*



Fuente: Área de Planeamiento Mina - Unidad Minera Constanca

En cuanto al diseño transversal, el peralte cumple un rol esencial al compensar la acción de la fuerza centrífuga, ya que, en curvas, esta puede superar la resistencia ejercida por el peso del equipo y la fricción de los neumáticos contra la superficie, generando riesgos de deslizamiento. Por este motivo, se emplean peraltes entre 2% y 6%, evitando valores superiores al 6% y eliminando la posibilidad de aplicar peraltes negativos que representen caídas adversas hacia el interior de la vía.

Tabla 4: *Peralte empleado en U.M. Constanica*

Velocidad (Km/Hr)	PERALTE					
	1%	2%	3%	4%	5%	6%
	Radio de Curva					
10	18 m	9 m	6 m	5 m	4 m	3 m
20	73 m	36 m	24 m	18 m	15 m	12 m
30	164 m	82 m	55 m	41 m	33 m	27 m
40	291 m	145 m	97 m	73 m	58 m	48 m
50	454 m	227 m	151 m	114 m	91 m	76 m
60	654 m	327 m	218 m	164 m	131 m	109 m
70	890 m	445 m	297 m	223 m	178 m	148 m
80	1163 m	581 m	388 m	291 m	233 m	194 m

Fuente: Recognised standard 19 -Design and construction of mine roads

El peralte que se emplea en constancia se encuentra entre 3% a 5%, como se muestra en imagen, así mismo en los tramos de Switchback tenemos un valor de peralte de 5% en el cual los camiones ingresan con una velocidad menor a 10 km/hr y en el caso de tramos con radios de curvaturas variados será necesario definir límites de velocidad apropiados en base a las tablas siguientes.

En tramos con radios de curvatura variados, se hace necesario definir límites de velocidad específicos de acuerdo con las tablas de diseño, garantizando que la geometría de la vía se adecue a las condiciones operativas.

Las longitudes de transición en el cambio de peralte se distribuyen de manera que un tercio se ubique dentro de la curva y los dos tercios restantes en la sección recta previa al inicio de la curva, con lo cual se asegura un tránsito progresivo y estable. Todos estos parámetros se sustentan en estándares que sirven de referencia para mantener las vías de acarreo bajo condiciones óptimas de seguridad, eficiencia y durabilidad.

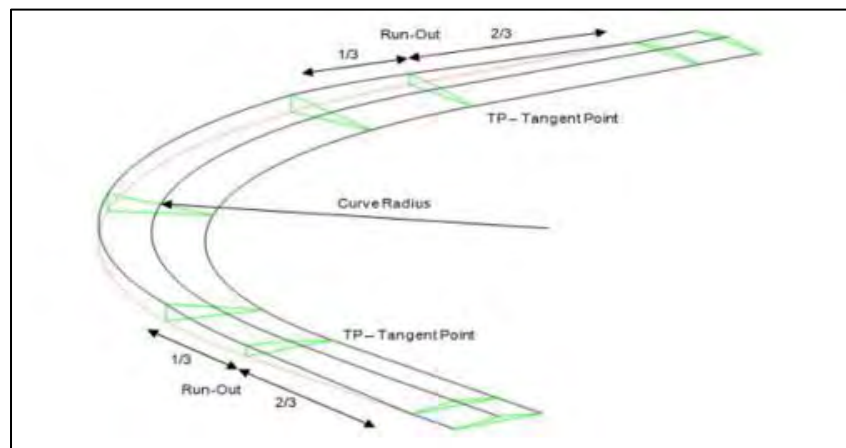
Tabla 5: Velocidad vs Radio de curvatura

Velocidad (Km/Hr)	RADIO DE CURVA												
	50 m	75 m	100 m	125 m	150 m	175 m	200 m	250 m	300 m	350 m	400 m	450 m	500 m
	PERALTE												
10	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
20	1%	1%	1%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
30	3%	2%	2%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	0%	0%	0%	0%
40	6%	4%	3%	2%	2%	2%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%
50	9%	6%	5%	4%	3%	3%	2%	2%	2%	1%	1%	1%	1%
60	13%	9%	7%	5%	4%	4%	3%	3%	2%	2%	2%	1%	1%
70	18%	12%	9%	7%	6%	5%	4%	4%	3%	3%	2%	2%	2%
80	23%	16%	12%	9%	8%	7%	6%	5%	4%	3%	3%	3%	2%

Fuente: Recognised standard 19 -Design and construction of mine roads

Las longitudes de salida varían con la velocidad de diseño de la curva y el cambio total en la pendiente transversal. La desviación se aplica de manera que 1/3 de la longitud de la desviación se produce en la curva y 2/3 de la longitud de la desviación antes del punto tangente de la curva (en la sección recta).

Figura 26: Longitud de desplazamiento



Fuente: Recognised standard 19 -Design and construction of mine roads

Tabla 6: *Pendiente vs Velocidad vs Longitud de desplazamiento*

Variación absoluta de la pendiente transversal	Velocidad						
	20km/hr	30km/hr	40km/hr	50km/hr	60 km/hr	70 km/hr	80 km/hr
	Longitud de desplazamiento						
1%	4 m	5 m	7 m	8 m	10 m	10 m	10 m
2%	8 m	10 m	13 m	16 m	19 m	19 m	19 m
3%	12 m	15 m	19m	24 m	28 m	28 m	28 m
4%	16 m	20 m	25 m	31 m	37 m	37 m	37 m
5%	20 m	24 m	32m	39 m	46 m	46 m	46 m
6%	24m	29 m	38 m	47 m	55 m	55 m	55 m
7%	28 m	34 m	44 m	54 m	64 m	64 m	64 m
8%	32 m	39 m	50 m	62 m	73 m	73 m	73 m
9%	36 m	43 m	57 m	70 m	82 m	82 m	82 m
10%	40m	48 m	63 m	77 m	91m	91m	91m

Fuente: Recognised standard 19 -Design and construction of mine roads

3.7.2.3. SEGURIDAD VIAL EN EL DISEÑO: INTERSECCIONES Y CONTROL DE EXPOSICIÓN

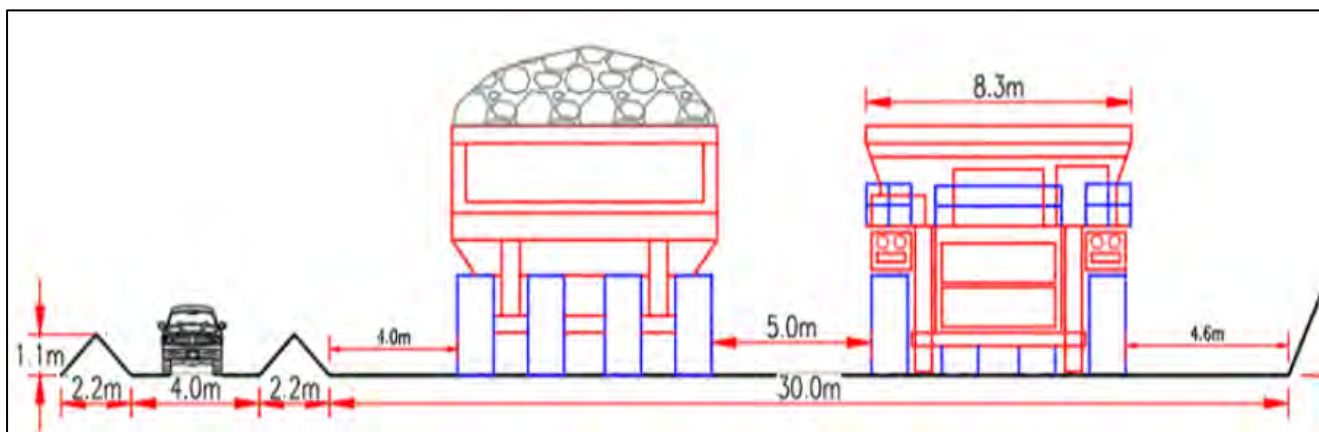
La seguridad vial en minería constituye un eje transversal en la gestión de las vías de acarreo, dado que los camiones de gran tonelaje interactúan con vehículos auxiliares y condiciones geotécnicas variables. Los riesgos asociados incluyen pérdida de control en rampas, deslizamientos en curvas cerradas y colisiones en intersecciones. El estándar de Constancia contempla medidas como la altura mínima de bermas, la señalización en intersecciones y la construcción de rampas de alivio, todas orientadas a reducir la probabilidad de incidentes.

Los tramos con pendientes superiores al 8 %, combinados con curvas de radio reducido, representan escenarios de alto riesgo. En estos sectores, el exceso de velocidad, la falta de peralte adecuado o el deterioro de la capa de rodadura aumentan la probabilidad de volcamiento o pérdida de control. Adicionalmente, la presencia de agua superficial o material suelto intensifica la peligrosidad. Por ello, estos factores deben ser evaluados mediante auditorías viales frecuentes y controlados con limitadores de velocidad, perfilado constante y reforzamiento de bermas.

Un ejemplo emblemático es el accidente ocurrido en la Compañía Minera Antamina en abril de 2025, donde un camión de acarreo de gran tonelaje impactó contra una camioneta liviana en un tramo de vía compartida. Las investigaciones concluyeron que los factores críticos fueron la falta de segregación de rutas, la insuficiente visibilidad en curvas cerradas y la inexistencia de un protocolo estricto de prioridad vehicular en intersecciones. Este evento dejó en evidencia que, aun cuando las vías cumplen parámetros básicos de diseño, la convivencia de flotas heterogéneas representa un riesgo elevado si no se acompaña de medidas adicionales de control, como rutas exclusivas para livianos, sistemas de advertencia temprana y monitoreo constante mediante cámaras o sensores de proximidad.

Los vehículos livianos representan un factor importante a tener en cuenta en la seguridad dentro de la operación, es por ello por lo que en la medida de lo posible se deben construir vías separadas del flujo de camiones de alto tonelaje. La posición de estas vías estará determinada por el diseño de la mina, las instalaciones, los accesos, los cruces de caminos, etc. En el caso de una vía auxiliar de un sentido debe considerarse una carpeta útil de 4 m siendo el ancho de la vía 44.4m en total.

Figura 27: Ancho de HR considerando vías auxiliares



Fuente: Área de Planeamiento Mina - Unidad Minera Constancia

Figura 28: *Vía auxiliar de ingreso al stock 40*



Fuente: Área de Planeamiento Mina - Unidad Minera Constanca

La mitigación del riesgo de interacción entre vehículos livianos (LV) y equipos de acarreo (HME) requiere medidas como la segregación de rutas, horarios diferenciados, obligatoriedad de comunicación radial y control de accesos. Adicionalmente, se incorporan sistemas de detección de proximidad y cámaras de visión periférica para los camiones de gran tonelaje. Estos protocolos reducen la exposición directa y fortalecen la seguridad vial como parte integral de la operación minera.

Otro caso que sirve de referencia proviene de la operación en la Mina Cuajone (Southern Perú), donde se registró la pérdida de control de un camión de acarreo en una rampa de pendiente superior al 10 %. Las investigaciones revelaron que la vía no contaba con rampas de escape adecuadas ni con bermas que cumplieran la altura mínima de $\frac{3}{4}$ de la llanta del camión. Además, la falta de mantenimiento oportuno generó superficies irregulares que aumentaron la resistencia al rodado y contribuyeron al sobrecalentamiento de frenos. La lección derivada de este evento fue la

importancia de que las vías cumplan estrictamente los parámetros de pendiente y peralte, y de que se implementen rampas de alivio en zonas críticas, especialmente en rampas largas. Esto confirmó que incluso pequeñas desviaciones en el cumplimiento geométrico pueden tener consecuencias directas en el consumo de combustible, la fatiga de los operadores y, en el peor escenario, en la pérdida de vidas.

Las rampas de alivio en la Unidad Minera Constancia están constituidas de material granular seco y suelto, con pendiente positiva y espesor creciente, generalmente su longitud no es mayor de 120 m. El material granular y la fuerza de la gravedad se encarga de frenar el vehículo fuera de control. Estas rampas se utilizan en lugares donde no hay el espacio suficiente para la construcción de una rampa con cama de frenado. Son rampas de emergencia o vías de frenado con el objetivo de reducir la velocidad y detener el camión en situaciones de falla en los frenos o pérdida de control, al incorporar una gradiente elevada (15%) y material suelo que opone resistencia al desplazamiento del vehículo.

Para la ubicación se requerirá un estudio de ingeniería y un análisis del historial de accidentes e incidentes, con lo cual se determinará la localización de la rampa de alivio. Los criterios recomendables son:

- ✓ Paralelas y adyacentes a las vías principales.
- ✓ A partir de la mitad de la pendiente.
- ✓ Antes de una curva.
- ✓ En caso de vías de doble sentido evaluar si la rampa de frenado puede ser colocada a la derecha o izquierda de la carretera.

Algunas consideraciones mínimas de diseño según el “Boletín informativo de la gerencia de supervisión minera 2022” son:

- Figura 29:** *Rampa de alivio en la U.M. Constanca*



81

asociados al restablecimiento de las vías. La lección más importante fue la necesidad de contar con un plan de preparación estacional que incluya el reforzamiento preventivo de cunetas, la reposición de material granular en puntos críticos y la verificación constante del funcionamiento de los sistemas de drenaje.

En la Unidad Minera Constancia todos los caminos permanentes y temporales se construirán contemplando un manejo de drenaje de aguas de escorrentía superficial. Para seleccionar los sistemas de control de agua de escorrentía superficial y subsuperficial que se construirán/instalarán, se deberá tomar en cuenta la ubicación del camino y la duración o permanencia del mismo.

Consideraciones generales del drenaje en la U.M. Constancia:

- ✓ Peralte adecuado tanto en caminos permanentes y temporales.
- ✓ Los caminos permanentes deberán contar con cunetas y estructuras de descarga resistentes a la erosión (revestimiento de cualquier tipo: roca, geomembrana, lona, etc.).
- ✓ Los caminos temporales (uso menor a un año) también deberán contar con cunetas laterales y estructuras de descarga.
- ✓ Las cunetas descargarán en estructuras de control de sedimentos (pozas, barreras, etc.).
- ✓ En caso de alcantarillas se considerará la protección de los cabezales de ingreso y salida.

Pendiente transversal en la U.M. Constancia:

- ✓ Los caminos deberán contar con pendiente transversal (peralte) de 2% como mínimo para el drenaje de escorrentía superficial, que será conducido hacia las cunetas laterales de los caminos.

- ✓ Con respecto a los caminos de acarreo se deberán consultar los diseños actuales.
- ✓ Si un canal de derivación de agua de contacto se encuentra junto al camino, la pendiente transversal se deberá inclinar de manera que la esorrentía se dirija hacia el canal de derivación; en cuanto al caso de canales de derivación de agua de no contacto podrá ser de la misma manera siempre y cuando el área de aporte sea de material NAG y no se altere con sedimentos la calidad del agua del propio canal.
- ✓ Si no existe una cuneta al lado del camino, la pendiente transversal deberá inclinarse hacia el talud de relleno del camino.
- ✓ En el caso de los caminos de exploración y construcción, se deberá evaluar la vida útil, tiempo de duración, ubicación y el uso previsto del camino para determinar los requerimientos para el manejo del agua.

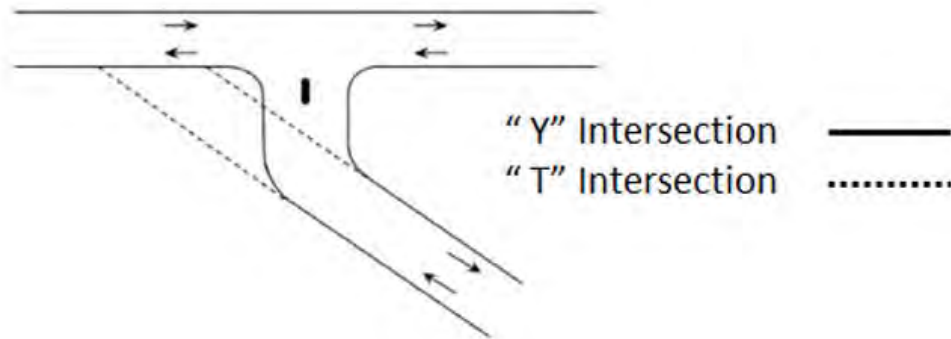
Cunetas transversales de desviación en la U.M. Constanica:

- ✓ Se deben construir cunetas transversales de desviación en el acceso (cunetas o badenes según corresponda) si se presenta pendientes mayores a 3%.

En conjunto, estas experiencias permiten establecer que la seguridad vial en minería no puede abordarse únicamente desde la perspectiva correctiva, sino que requiere una gestión preventiva y sistemática.

El diseño de intersecciones en las vías de acarreo busca mantener la simplicidad y seguridad operativa, evitando configuraciones complejas que generen riesgos adicionales. Por este motivo, no se permiten intersecciones que involucren más de dos vías ni intersecciones en “Y”. Las intersecciones en “T” deben diseñarse en ángulos de 90° con una tolerancia de $\pm 5^\circ$, lo que asegura un cruce claro y predecible para los operadores.

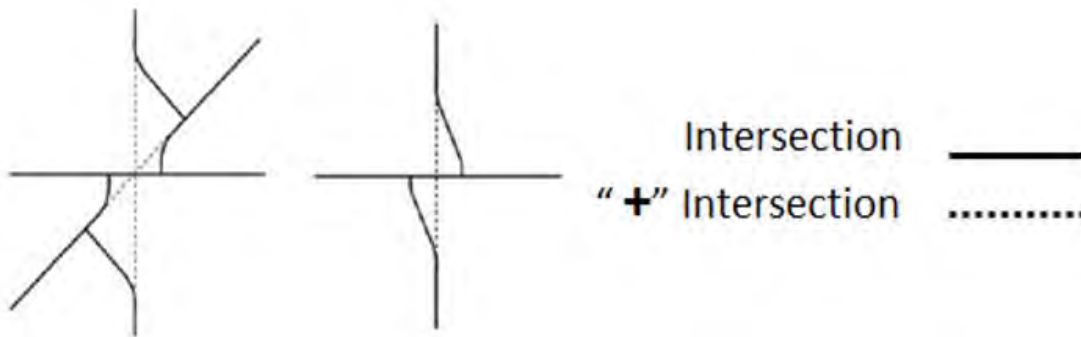
Figura 30: *Diseño de intersecciones en "T"*



Fuente: Recognised standard 19 -Design and construction of mine roads

Solo en casos estrictamente necesarios, y tras una evaluación de riesgos que justifique su implementación, se admite la construcción de intersecciones en "+", cuando no exista otra alternativa técnica viable.

Figura 31: *Diseño de intersecciones en "+"*

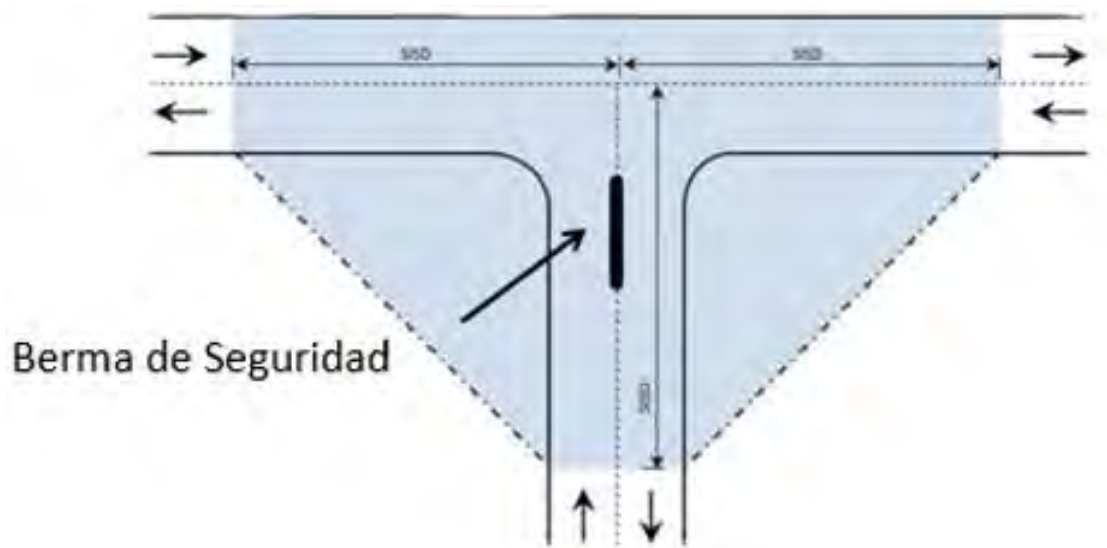


Fuente: Recognised standard 19 -Design and construction of mine roads

En cuanto a las restricciones de velocidad, estas intersecciones deben ubicarse y configurarse de manera que se maximice la distancia de visión durante la aproximación y el cruce. Si los cruces se encuentran en la base de una rampa, se requiere un tramo plano de al menos 25 metros como zona de frenado seguro. En la parte superior de rampas, debe otorgarse prioridad a los vehículos que ascienden, o de lo contrario habilitar un área nivelada similar. En el caso de las zonas de switchback, la distancia mínima establecida para este fin es de 32 metros. Además, se

aplicarán límites de velocidad adaptados a los radios de giro, evitando que los vehículos invadan carriles opuestos al atravesar la intersección.

Figura 32: *Distancia de visión segura en la intersección (SISD)*



Fuente: Recognised standard 19 -Design and construction of mine roads

Tabla 7: *Velocidad vs Distancia de visión*

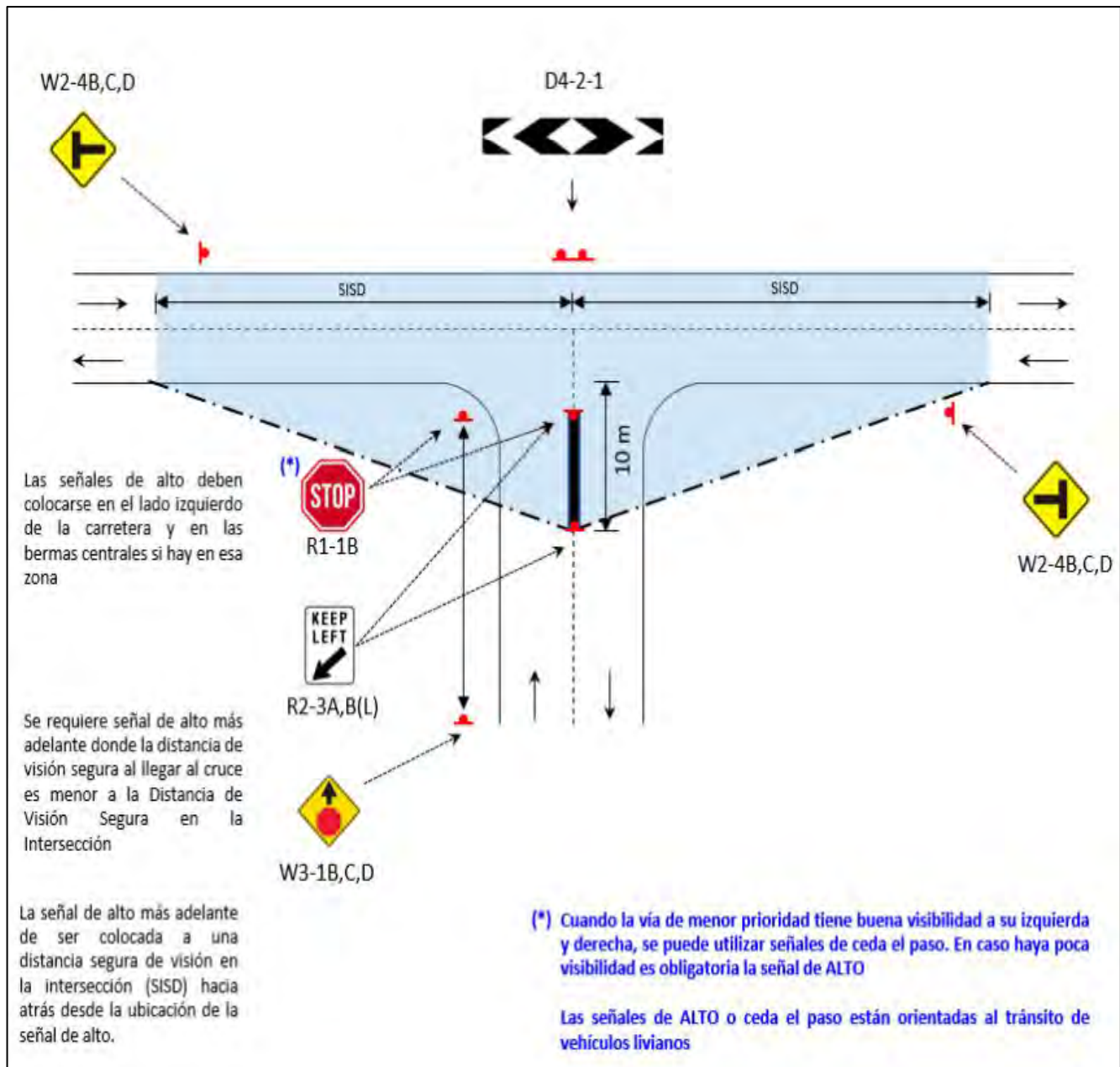
Velocidad (km/hr)	Distancia de Visión de Auto-Intersección (SISD)*
10	10 m
20	30 m
30	50 m
40	70 m
50	90 m
60	110 m
70	145 m
80	185 m

Fuente: Recognised standard 19 -Design and construction of mine roads

El control de tráfico en estas áreas debe garantizar un tránsito fluido y seguro, respetando las prioridades establecidas en la operación minera. Para ello, se recomienda implementar bermas centrales de seguridad que permitan separar los flujos vehiculares sin reducir la visibilidad. La

señalización debe advertir con anticipación la proximidad de una intersección y orientar de forma clara a los conductores, evitando ambigüedades. Asimismo, se instalarán señales a lo largo de toda la red vial para proporcionar información preventiva e instructiva, acompañadas de delineadores que marquen los bordes de la superficie de rodadura.

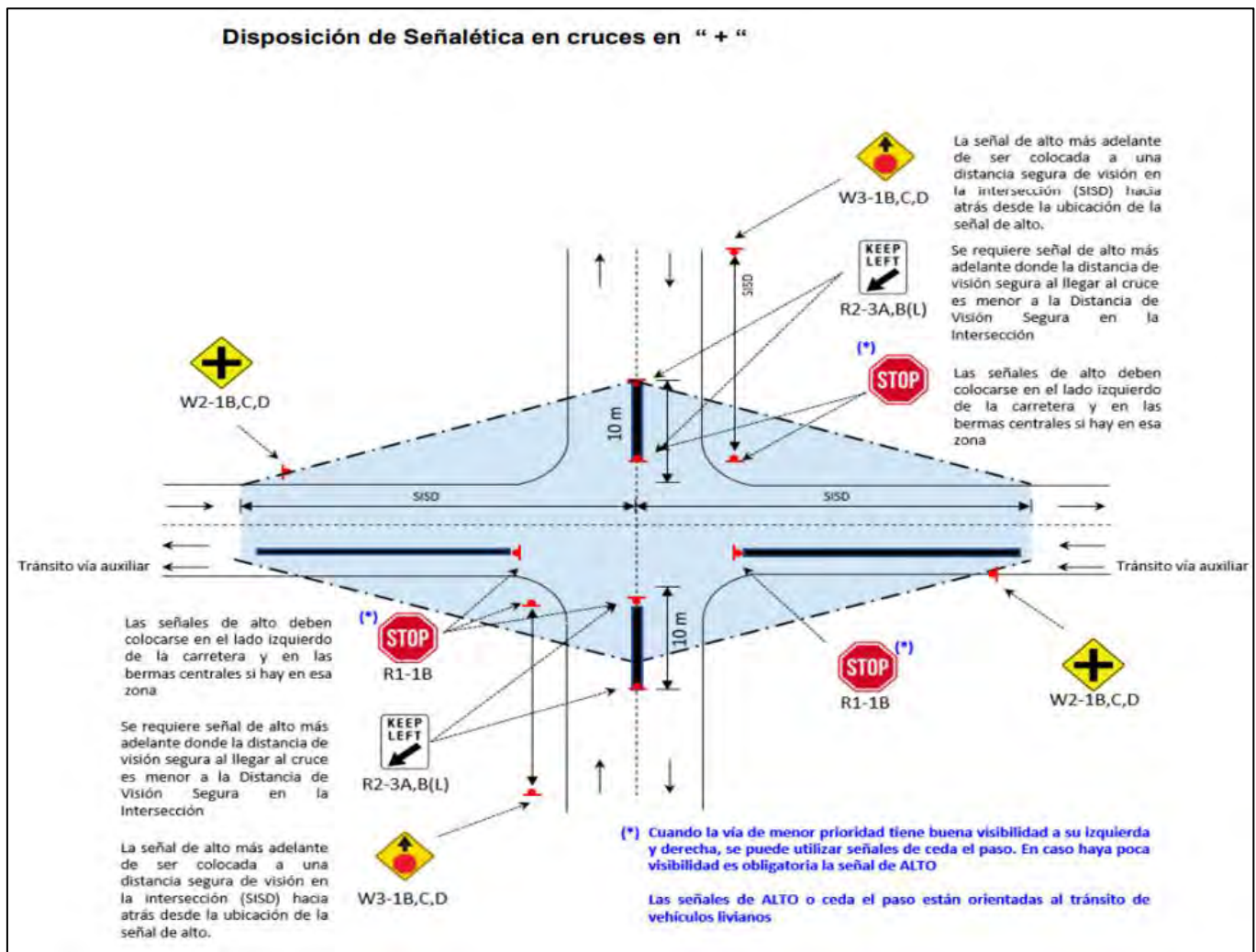
Figura 33: Control de tráfico



Fuente: Recognised standard 19 - Design and construction of mine roads

Respecto a la señalética, su disposición cumple un rol clave en la regulación del tránsito en intersecciones. Se colocarán señales de “Alto” en las bermas del lado izquierdo para controlar el derecho de paso, así como señales de advertencia de peligro bidireccionales en los puntos donde finaliza el haul road, generalmente sobre la berma central. También se ubicarán señales de conducción hacia la izquierda en la berma central y señales preventivas que adviertan la existencia de un cruce o intersección. La disposición de estas señaléticas será específica para los cruces en “T” y en “+”, garantizando uniformidad en la red de acarreo y reduciendo la probabilidad de incidentes por falta de información visual al operador.

Figura 34: Señalética en cruces en “+”



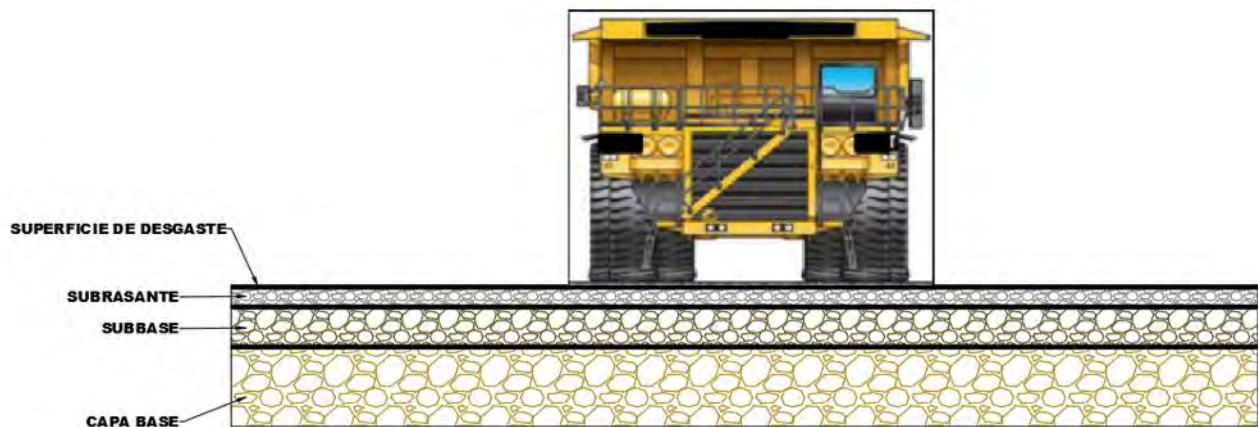
Fuente: Recognised standard 19 - Design and construction of mine roads

3.7.3. GESTIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN

3.7.3.1. PROCESO DE CONFORMACIÓN DE CAPAS ESTRUCTURALES

El proceso constructivo de las vías de acarreo inicia con el tratamiento de la subrasante, la cual debe presentar un $\text{CBR} \geq 6 \%$ o, en caso contrario, ser estabilizada con geosintéticos o reemplazo de material. A partir de allí, se conforma la subbase, la base y la capa de rodadura con materiales no generadores de drenaje ácido (NAG), libres de limos y arcillas, con densidades de $2,5\text{--}2,75 \text{ g/cm}^3$ y resistencia entre $50\text{--}130 \text{ MPa}$. La compactación en capas controladas es crítica para garantizar estabilidad estructural. En cuanto al mantenimiento, se aplican rutinas de perfilado con motoniveladora, control de polvo mediante riego y reposición periódica de afirmado. La frecuencia de estas actividades se define según la intensidad de tráfico y la temporada, priorizando las rutas hacia chancadora y botaderos. Un aspecto esencial es la coordinación entre planeamiento, operaciones y topografía, quienes verifican permanentemente la conformidad con el estándar.

Figura 35: Perfil típico de las vías



Fuente: Recognised standard 19 -Design and construction of mine roads

La subrasante consistirá en material nativo o corte y relleno compactado con la rigidez efectiva o capacidad de soporte para soportar la carga del camión y el peso del tráfico. Los suelos por debajo del nivel superior de la subrasante, en una profundidad no menor de 0.60m , deberán

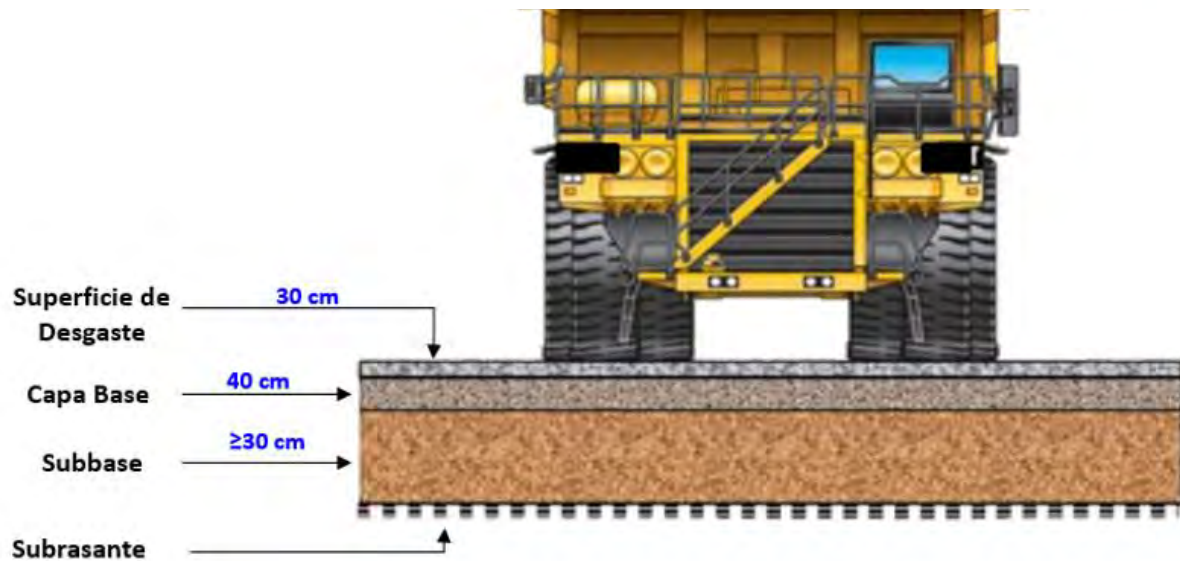
ser suelos adecuados y estables, con CBR $\geq 6\%$; en caso de que el valor sea menor (subrasante pobre o subrasante inadecuada), corresponde estabilizar los suelos y se deberán analizar alternativas de solución como: estabilización mecánica, reemplazo de suelo inadecuado, estabilización con geosintéticos, elevar el nivel de la subrasante, entre otros.

La Subbase constituye la mayor parte de la fuerza de un acarreo. Para los caminos de acarreo primarios, la subbase debe estar compuesta de suficiente material rígido capaz de soportar el peso del tráfico de acarreo. El material normalmente debe estar compuesto de un relleno de excavación rocoso, grueso y seco, con una granulometría mayor a 6 pulgadas y en capas que garanticen una compactación adecuada, considerando una compactación a 1.5m., esta capa dependerá de la calidad del terreno que compone la subrasante, si en caso la sub rasante fuese de material competente la capa sub base puede ser 30 cm o más dependiendo de la configuración del terreno. En los tramos donde la subrasante se compone de material de relleno, no es necesario conformar una capa de sub base. En todos los casos, para la construcción de las vías de acarreo se debe asegurar que la sub rasante llegue a suelo competente y libre de escorrentías de agua, para evitar acolchonamientos. De presentarse el caso de escorrentías se debe implementar manejo de aguas (tipo dren francés u otros).

La capa base es la plataforma para la superficie de uso y es una capa suplementaria compuesta generalmente por roca de mejor calidad y alta capacidad portante para aumentar el espesor del pavimento cuando las subrasantes son más débiles. El material normalmente debe estar compuesto del mejor material rocoso con un tamaño de terrón de 3 a 6 pulgadas y libre de materiales plásticos como arcillas. Será dispuesto en capas < 12 pulgadas. La capa base tiene 40 cm de espesor.

La superficie de desgaste o de carrera puede diseñarse para permitir un reemplazo periódico a lo largo del tiempo considerando un espesor de 30 cm dependiendo de la resistencia del material disponible y de su cohesión (finos cohesivos y humedad, para ayudar a unir la superficie). La granulometría es de 1.5 a 3 pulgadas. Para todas las capas, se debe tener en cuenta que se usa Material tipo NAG (No generador de aguas ácidas), libre de limos y/o arcillas, densidad: 2.5-2.75 gr/cm³, dureza: 50-130 Mpa (La densidad y dureza corresponde a los materiales que se obtienen de los frentes de minado destinado a vías de acarreo).

Figura 36: *Construcción de las vías*



Fuente: Recognised standard 19 -Design and construction of mine roads

El área de servicios técnicos desempeña un papel fundamental en el diseño, construcción y mantenimiento de las vías de acarreo, asegurando que todos los procesos se realicen bajo los lineamientos establecidos en el presente estándar. La Gerencia de Servicios Técnicos o la Superintendencia de Planeamiento Mina tiene la responsabilidad de garantizar que los diseños de las vías se ejecuten conforme a las especificaciones establecidas, velar por el cumplimiento de este documento normativo y disponer de un sistema de control de calidad que supervise cada etapa constructiva. A nivel operativo, el jefe de Planeamiento, en su rol de Ingeniero de Planeamiento

IV, es el encargado de elaborar los diseños de las vías de acarreo de acuerdo con lo estipulado, mientras que el Ingeniero de Planeamiento III, especializado en corto plazo, coordina directamente la ejecución, construcción y control de dichos diseños en conjunto con el equipo de Operaciones Mina.

Por su parte, el jefe de Topografía tiene la responsabilidad del replanteo, control y liberación en campo, asegurando que los trazados se ajusten a los diseños aprobados. En complemento, la Superintendencia de Geotecnia e Hidrogeología, a través de su ingeniero senior o responsable designado, debe validar la estabilidad de los diseños y garantizar un adecuado manejo de aguas, lo cual incluye la correcta ubicación de las pozas de sedimentación. Finalmente, la Superintendencia de Seguridad y Salud Ocupacional interviene en la evaluación de las condiciones de las vías, especialmente en situaciones donde no se cumpla con el ancho estándar establecido, proponiendo y coordinando medidas correctivas como la instalación de señalización preventiva, en articulación con las áreas de Planeamiento, Operaciones y Geotecnia, a fin de preservar la seguridad y la continuidad operativa en la mina.

3.7.3.2. PROCEDIMIENTOS DE LIBERACIÓN DE ÁREAS Y MITIGACIÓN DE RIESGOS

Antes de poner en operación un tramo de vía, este debe ser liberado formalmente mediante inspecciones topográficas que certifiquen el cumplimiento de los parámetros de diseño. Si las dimensiones o condiciones no cumplen con el estándar, se aplican medidas de control como señalización preventiva (P-17 Reducción de Calzada), ceder el paso (R-2) o reducción de velocidad (R-30-4), hasta que el tramo sea rehabilitado. Este proceso formal de liberación asegura que las áreas en uso no representen riesgos para los camiones de acarreo ni para vehículos auxiliares. Además, en caso de no liberación, se genera un plan de acciones correctivas y se

comunica a todas las áreas involucradas, integrando la gestión de riesgos al ciclo constructivo de las vías.

La liberación de áreas constituye una etapa clave en el proceso de habilitación de las vías de acarreo. Una vez que el área de Topografía verifica que los trabajos ejecutados cumplen con lo establecido en el estándar, se procede a autorizar formalmente la zona para su uso operativo. Para ello se realiza una reunión en la que se comunica de manera oficial la liberación del área a las distintas áreas responsables, asegurando que todos los involucrados estén informados y puedan coordinar de manera adecuada las siguientes fases de operación y mantenimiento de la vía.

3.7.3.3. LEVANTAMIENTOS TOPOGRÁFICOS, USO DE DRONES Y ANALÍTICA DE DATOS

El monitoreo continuo de las vías de acarreo ha evolucionado hacia un enfoque digital, donde el control topográfico tradicional se combina con tecnologías como drones, fotogrametría y plataformas de inteligencia artificial. En la Unidad Minera Constancia, el estándar ya reconoce la necesidad de realizar controles mensuales con herramientas de IA, y este concepto se amplía con la incorporación de software especializado como Strayos – Haul Road AI, que permite generar gemelos digitales de la infraestructura vial. Estos sistemas no solo validan parámetros geométricos como anchos, pendientes y peraltes, sino que también generan reportes de conformidad automática, mapas de calor y tableros de control en tiempo real. La integración de la analítica de datos al proceso operativo transforma la gestión de vías en un ciclo de mejora continua, donde las desviaciones se identifican de inmediato y se ejecutan acciones correctivas con mayor rapidez.

Los levantamientos topográficos mediante drones ofrecen una cobertura más amplia y precisa que los métodos convencionales, permitiendo detectar deformaciones en taludes, bermas incompletas o acumulación de agua en la calzada. El uso de fotogrametría de alta resolución genera

modelos digitales del terreno (MDT) y orto mosaicos que pueden integrarse directamente con software de planeamiento y control. Esto garantiza un monitoreo más frecuente y menos invasivo, reduciendo la dependencia de equipos topográficos en campo y mejorando la seguridad del personal al evitar la exposición a zonas de riesgo.

El control topográfico de los haul roads se lleva a cabo a través de levantamientos basados en procesamiento fotogramétrico combinado con herramientas de inteligencia artificial, lo que permite obtener mediciones automáticas y comparativas respecto a los estándares de diseño establecidos, considerando parámetros como anchos de rampas, alturas de bermas, pendientes, peraltes y distancias. Este control se realiza con una frecuencia mensual y los resultados permiten generar planes de acción orientados a corregir las zonas que se encuentren fuera de los rangos definidos, información que es compartida con el equipo de Planeamiento Mina. En esta etapa, la responsabilidad de asegurar que los diseños de vías cumplan con el estándar recae en el Ingeniero Senior de Planeamiento.

El Ingeniero de Corto Plazo, por su parte, coordina la ejecución de las correcciones y el control junto con el área de Operaciones Mina, que se encarga de realizar la construcción y las mediciones correspondientes según las prioridades establecidas. El trabajo de campo es complementado por el área de Topografía mediante replanteos, y finalmente los resultados son validados por el área de Geotecnia e Hidrogeología con el uso de equipos GPS convencionales, lo que permite otorgar la liberación formal del diseño y garantizar que la vía quede en condiciones seguras y conformes con las especificaciones técnicas.

3.7.4. GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO

3.7.4.1. PLAN ESTACIONAL DE PREPARACIÓN PARA LLUVIAS

La temporada de lluvias representa uno de los factores más críticos en la conservación de vías de acarreo, pues incrementa el riesgo de deslizamientos, pérdida de adherencia y erosión superficial. El estándar establece la necesidad de un plan estacional que contemple actividades de reforzamiento de drenajes, perfilado preventivo, relleno de cunetas y stock de material granular. Asimismo, se programan inspecciones adicionales en los puntos más vulnerables, como curvas cerradas, rampas prolongadas y accesos a botaderos. La preparación anticipada permite reducir las probabilidades de pérdida de control vehicular y evita la paralización de la operación minera durante eventos climáticos adversos.

El control de riesgo ante la no liberación del ancho estándar en las vías de acarreo establece medidas específicas de señalización para garantizar la seguridad de la operación. Si después de los trabajos de remediación el haul road no alcanza el ancho requerido, se deberá instalar la señal preventiva P-17 de “Reducción de calzada” a una distancia mínima de sesenta metros antes del inicio del tramo reducido, tanto en el sentido de ida como en el de retorno. Asimismo, se colocará la señal reglamentaria R-2 de “Ceda el paso” a no menos de diez metros del inicio de la reducción en el carril que presente pendiente negativa o destinado al tránsito de equipos vacíos, con el fin de dar prioridad al flujo de equipos cargados. De igual modo, deberá implementarse la señal reglamentaria R-30-4 de “Reducción de velocidad” al inicio del tramo reducido en el carril en bajada, mientras que, en el caso de tratarse de una vía horizontal, esta señal se colocará en ambos sentidos. Estas disposiciones permiten mitigar los riesgos asociados a la disminución del ancho de vía, asegurando condiciones de tránsito seguras para los equipos y operadores.

3.7.4.2. MONITOREO DE TENDENCIAS OPERATIVAS MEDIANTE TABLEROS DE CONTROL

Los tableros de control constituyen la herramienta integradora donde convergen los datos recolectados en campo, los análisis de IA y la retroalimentación operativa. Presentan indicadores en tiempo real, mapas de conformidad por tramo y gráficas de tendencia semanal o mensual. Este enfoque facilita la toma de decisiones basada en evidencia y refuerza la cultura de mejora continua en la operación. Asimismo, permite a las áreas de operaciones, planeamiento y seguridad visualizar de forma unificada el estado de las vías y coordinar intervenciones con base en prioridades verificables.

3.7.4.3. ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO

Este apartado sintetiza la estrategia integral aplicada en la Unidad Minera Constancia para asegurar la transitabilidad, seguridad y productividad de la flota minera a través de un mantenimiento estructurado.

Objetivos y Alcance Operativo:

- ✓ El plan busca mantener condiciones óptimas en las vías para reducir el consumo de combustible, minimizar el desgaste de neumáticos y extender la vida útil de la infraestructura vial.
- ✓ El alcance abarca un total de 12,864 metros lineales divididos en seis tramos operativos principales: Chancadora, TMF I, TMF II, 4215, Cunahuire y WRF.
- ✓ Considerando un ancho de diseño promedio de 32 metros, el área total de mantenimiento comprende 411,648 m² (41.16 hectáreas) de superficie rodante.

Estándares Constructivos y Geométricos:

- ✓ Las vías están diseñadas bajo el estándar STD-OM-108 para soportar el tránsito continuo de flotas de gran tonelaje, como los camiones CAT 793F y Hitachi 400.
- ✓ Se exige un ancho mínimo operativo equivalente a 3.5 veces el ancho del camión crítico para tramos de doble vía.
- ✓ Las gradientes máximas longitudinales se limitan al 10%, mientras que los peraltes en curvas se configuran entre el 2% y el 6% para compensar las fuerzas centrífugas.
- ✓ Las bermas o muros de seguridad perimetrales deben tener una altura mínima del 50% del diámetro de la llanta del camión (aproximadamente 2 metros de altura para un CAT 793F).
- ✓ La estructura del pavimento minero se compone de una sub-base compactada de 40 a 50 cm de espesor, una capa base y una superficie final de desgaste o rodadura.

Estrategia Integral de Mantenimiento:

La gestión del estado de las vías se divide en tres enfoques de intervención:

- ✓ **Mantenimiento Preventivo:** Incluye el perfilado rutinario semanal o quincenal para conservar la geometría, sumado al riego con supresores de polvo (como la Bischofita) en zonas de alto tránsito para proteger la salud ocupacional y garantizar la visibilidad.
- ✓ **Mantenimiento Correctivo:** Consiste en la reparación inmediata de baches y erosiones generadas por factores climáticos (como la temporada de lluvias), rehabilitando los tramos críticos mediante la colocación de material fresco y compactación controlada.

- ✓ Mantenimiento Predictivo: Se apoya en el uso de tecnologías de monitoreo como sistemas FMS, vuelos con drones y analítica de datos a través de plataformas como Strayos y Cascadia para la detección temprana de deformaciones superficiales.

Gestión de Materiales y Flota de Soporte:

- ✓ Los materiales granulares para la conformación de vías se obtienen de la Zaranda Metso y se clasifican en tres tipos según su granulometría.
- ✓ El material "Over Medio" (retención de 3" a 5") se destina a la sub-base estructural. El material "Wearing" (pasante de 3" a 1.5") se emplea para la capa base.
- ✓ El "Material PL" (menor a 1.5") se utiliza exclusivamente para la capa superficial de rodadura y nivelación final.
- ✓ Para ejecutar estas tareas, el área cuenta con una flota auxiliar dimensionada que incluye motoniveladoras, rodillos compactadores, camiones cisterna, excavadoras y volquetes, asegurando una respuesta continua en turnos rotativos.

Indicadores Clave de Desempeño (KPIs):

- ✓ La efectividad del mantenimiento se evalúa midiendo los siguientes parámetros:
- ✓ Velocidad promedio de acarreo en vías principales y auxiliares.
- ✓ Porcentaje de cumplimiento de los estándares geométricos de diseño.
- ✓ Costo operativo por tonelada-kilómetro transportada.
- ✓ Frecuencia de incidentes o desviaciones asociadas directamente a la condición de la vía.

3.7.5. IMPACTO OPERATIVO Y ECONÓMICO DE LA GESTIÓN INTEGRAL

3.7.5.1. IMPACTO ECONÓMICO DE LA OPTIMIZACIÓN DE VÍAS

La mejora geométrica y estructural de las vías de acarreo no solo tiene un efecto en la seguridad y la operatividad, sino también en la economía de la operación minera. Vías mejor perfiladas, con pendientes controladas y superficies compactadas reducen la resistencia a la rodadura y permiten un transporte más eficiente. Esto se traduce en menor consumo de combustible, mayor vida útil de neumáticos y reducción de costos por mantenimiento correctivo de equipos. Asimismo, al disminuir los incidentes por fallas en vías, se evitan pérdidas económicas asociadas a paralizaciones o accidentes.

3.7.5.2. REDUCCIÓN DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLE Y AUMENTO DE VELOCIDADES POR MEJORA GEOMÉTRICA

El consumo de combustible de un camión minero depende directamente de la resistencia total al movimiento, compuesta por la pendiente y la resistencia a la rodadura. Una vía mal perfilada, con baches o irregularidades, aumenta esta resistencia y, en consecuencia, el gasto de diésel. Al implementar correctamente el estándar, se reduce la fricción y el esfuerzo del motor, generando ahorros significativos en el consumo mensual de la flota y adicionalmente aumentando su velocidad.

3.7.5.3. EVALUACIÓN COSTO-BENEFICIO DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL ESTÁNDAR

La evaluación costo-beneficio permite cuantificar el retorno económico de aplicar el estándar en relación con la inversión realizada en construcción y mantenimiento de vías. Se consideran los ahorros en combustible, la reducción de accidentes, el incremento de las velocidades y la prolongación de la vida útil de componentes. Los resultados suelen mostrar que

la inversión inicial se compensa rápidamente con los ahorros operativos, consolidando la justificación técnica y económica de la implementación del estándar en la Unidad Minera Constancia.

3.7.5.4. SÍNTESIS DEL PROCEDIMIENTO Y RESULTADOS

La síntesis del procedimiento resume cómo la integración del estándar, la adaptación al contexto local, el monitoreo digital y la analítica de datos permiten alcanzar mejoras tangibles en seguridad, productividad y costos. La investigación demuestra que el cumplimiento del estándar, combinado con el uso de herramientas tecnológicas y la gestión proactiva de riesgos, genera un sistema de transporte más confiable y eficiente. Esta visión integral no solo fortalece la operación de Constancia en el corto plazo, sino que también establece bases sólidas para un proceso de mejora continua en la gestión de vías de acarreo.

CAPÍTULO IV:

ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1.RESULTADOS

Los resultados obtenidos permiten evidenciar que la gestión del diseño, construcción y mantenimiento de vías de acarreo en la Unidad Minera Constanca tuvo un efecto favorable en la optimización del consumo de combustible, la mejora de velocidades operativas y la reducción de pérdidas asociadas a condiciones geométricas y superficiales deficientes. La evaluación se realizó bajo un enfoque comparativo antes y después de las intervenciones ejecutadas en tramos críticos, utilizando información de la plataforma Cascadia/SmarrView, la cual combina sensores, GPS, medición directa, modelos de machine learning y análisis SHAP para cuantificar el impacto de las mejoras en ruta sobre el consumo de combustible.

La lógica de análisis se basó en tres momentos: una línea base de dos semanas antes de la intervención, una evaluación posterior durante la primera semana y una evaluación acumulada desde la intervención hasta el cierre del periodo de medición. Este procedimiento permitió verificar no solo el efecto inmediato de la mejora de rutas, sino también su sostenibilidad operativa en el tiempo. Esta forma de evaluación guarda relación directa con el objetivo de la investigación, orientado a estandarizar y optimizar el diseño, construcción y mantenimiento de las vías de acarreo, considerando que la tesis plantea la reducción del consumo de combustible entre 8 % y 12 % como uno de los principales resultados esperados.

Tabla 8: Comparación de consumo de combustible antes y después de las intervenciones

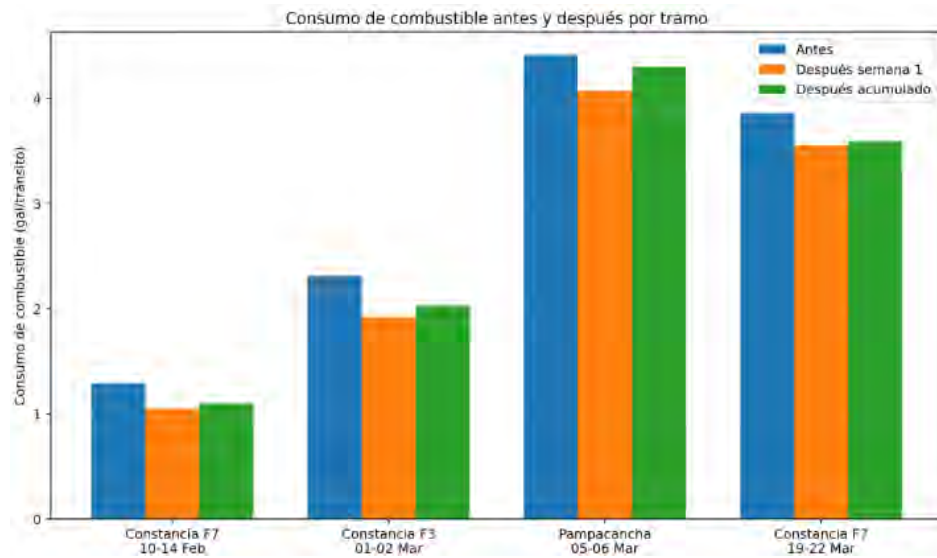
Intervención	Tramo intervenido	Consumo antes (gal/tránsito)	Después semana 1 (gal/tránsito)	Después acumulado (gal/tránsito)	Reducción acumulada
1	Constancia F7	1.29	1.05	1.10	14.73 %
2	Constancia F3	2.31	1.92	2.03	12.12 %
3	Pampacancha	4.41	4.07	4.30	2.49 %
4	Constancia F7	3.86	3.55	3.59	6.99 %

Fuente: Elaboración propia

Los resultados muestran que las intervenciones con mayor impacto fueron el Tramo 1 Constancia F7 y el Tramo 2 Constancia F3. En el primer caso, el consumo se redujo de 1.29 a 1.10 galones por tránsito en la evaluación acumulada, lo que representa una reducción de 14.73 %. En el segundo caso, el consumo disminuyó de 2.31 a 2.03 galones por tránsito, equivalente a una reducción de 12.12 %. Estos valores evidencian que la mejora de rutas tuvo mayor efecto en los sectores donde existía una oportunidad clara de optimización geométrica, superficial u operativa.

En el caso de Pampacancha, la reducción acumulada fue menor, pasando de 4.41 a 4.30 galones por tránsito, equivalente a 2.49 %. Este resultado no significa ausencia de mejora, sino que el tramo presentó una respuesta más limitada frente a la intervención, posiblemente por condiciones propias de pendiente, distancia, carga, geometría o variabilidad operativa. En cambio, la cuarta intervención en Constancia F7 mostró una reducción acumulada de 6.99 %, pasando de 3.86 a 3.59 galones por tránsito, lo que confirma que la repetición de intervenciones sobre rutas críticas permite sostener mejoras progresivas en el desempeño del acarreo.

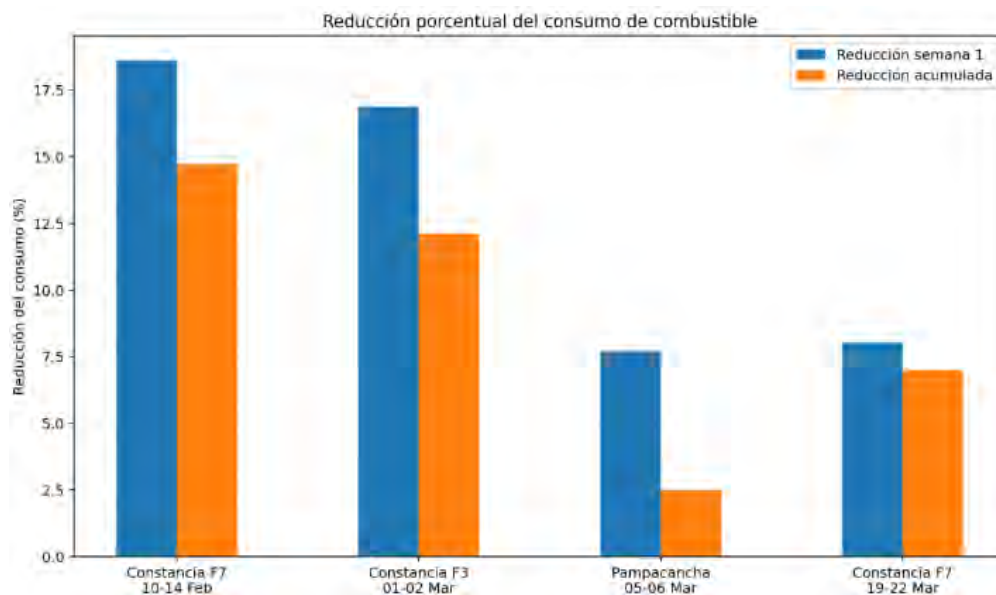
Figura 37: *Consumo de combustible antes y después por tramo*



Fuente: Elaboración propia

El gráfico debe mostrar la comparación entre el consumo antes, el consumo posterior en la primera semana y el consumo acumulado después de la intervención. Se observa que todos los tramos presentan reducción respecto a la línea base, siendo más evidente en Constancia F7 y Constancia F3.

Figura 38: *Reducción porcentual del consumo de combustible*



Fuente: Elaboración propia

La reducción porcentual permite identificar qué tramo tuvo mayor respuesta técnica frente a la optimización. El Tramo 1 alcanzó 14.73 % de reducción acumulada y el Tramo 2 alcanzó 12.12 %, valores coherentes con el rango de optimización planteado en la investigación.

Tabla 9: Comparación de velocidades antes y después de las intervenciones

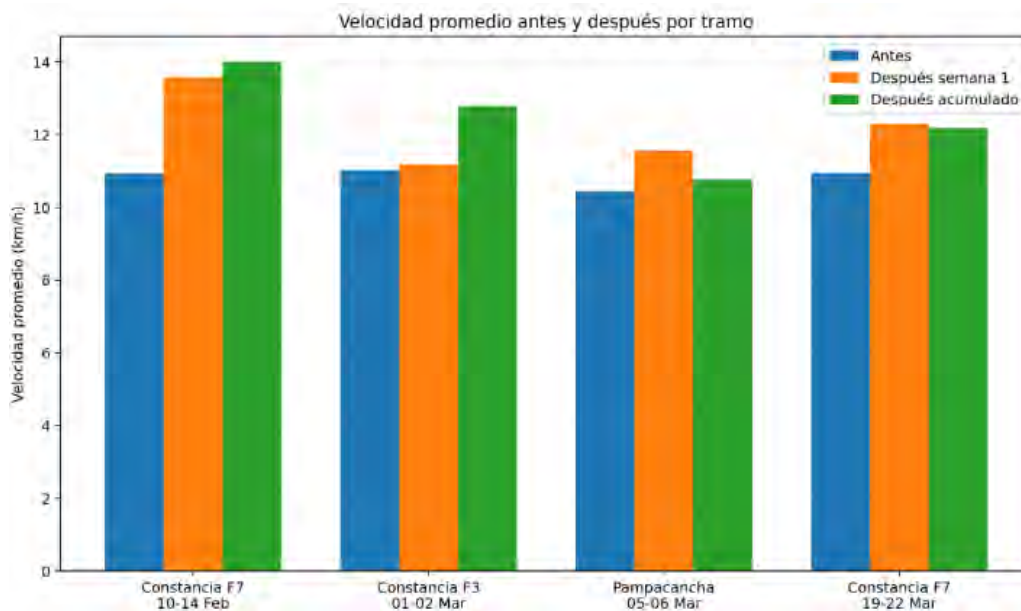
Intervención	Tramo intervenido	Velocidad antes (km/h)	Después semana 1 (km/h)	Después acumulado (km/h)	Incremento acumulado
1	Constancia F7	10.93	13.58	14.00	28.09 %
2	Constancia F3	11.03	11.19	12.79	15.96 %
3	Pampacancha	10.45	11.56	10.77	3.06 %
4	Constancia F7	10.95	12.31	12.19	11.32 %

Fuente: Elaboración propia

La velocidad promedio también mejoró después de las intervenciones, lo cual confirma que la optimización de las vías no solo reduce el consumo de combustible, sino que también permite una operación más fluida y estable. El mayor incremento se presentó en el Tramo 1 Constancia F7, donde la velocidad pasó de 10.93 km/h a 14.00 km/h en la evaluación acumulada, equivalente a una mejora de 28.09 %. Este comportamiento es importante porque una vía en mejor condición reduce frenadas, aceleraciones bruscas, pérdidas por irregularidad superficial y restricciones de tránsito.

En el Tramo 2 Constancia F3, la velocidad aumentó de 11.03 km/h a 12.79 km/h, lo que representa una mejora de 15.96 %. En el Tramo 4 Constancia F7, la velocidad se incrementó de 10.95 km/h a 12.19 km/h, equivalente a 11.32 %. Estos resultados demuestran que la mejora de rutas permite estabilizar el ciclo de acarreo y generar mejores condiciones para el tránsito de camiones mineros. En Pampacancha, el incremento fue menor, con 3.06 %, lo que evidencia que el tramo requiere intervenciones complementarias o un análisis más detallado de sus restricciones operativas.

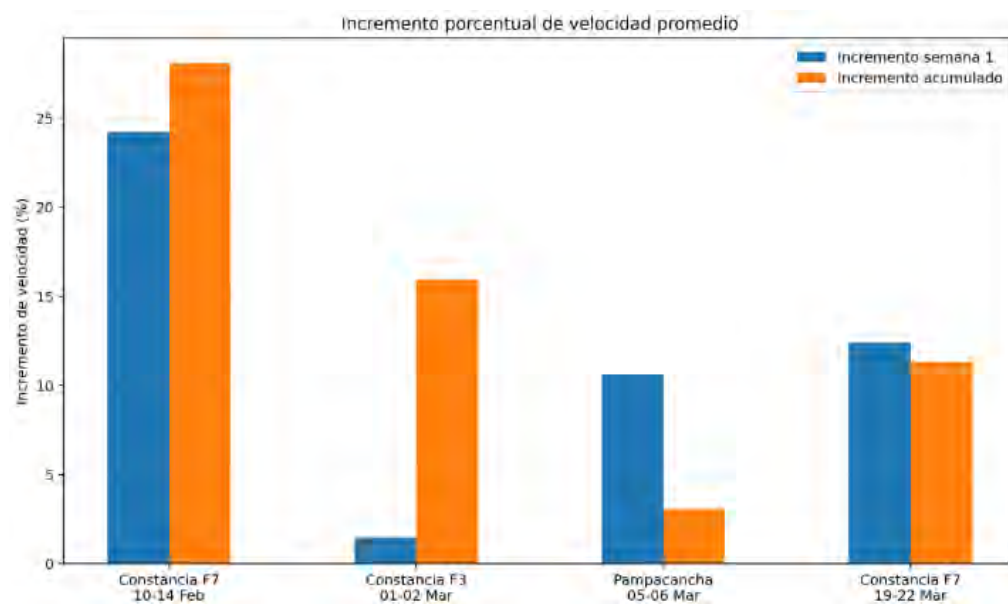
Figura 39: Velocidad promedio antes y después por tramo



Fuente: Elaboración propia

Este gráfico permite visualizar que la velocidad promedio aumentó en todos los tramos intervenidos. El incremento más representativo se observa en Constancia F7, donde la mejora de ruta generó condiciones más favorables para el desplazamiento de la flota.

Figura 40: Incremento porcentual de velocidad promedio



Fuente: Elaboración propia

El gráfico muestra que la mejora de velocidad no fue uniforme en todos los tramos. La mayor optimización se obtuvo en el Tramo 1, mientras que Pampacancha presentó una mejora limitada, lo cual indica que cada ruta responde de manera distinta según sus condiciones geométricas y operativas.

Tabla 10: *Ahorro total de combustible por intervención*

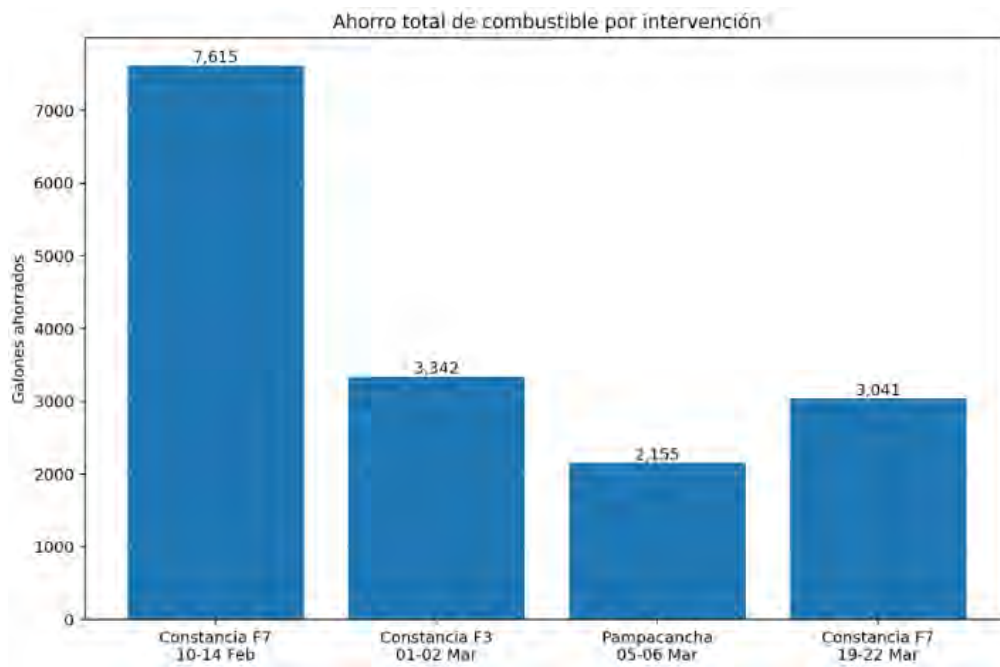
Intervención	Tramo	Distancia intervenida	Galones ahorrados	Participación en el ahorro total
1	Constancia F7	325 m	7,615 gal	47.14 %
2	Constancia F3	294 m	3,342 gal	20.69 %
3	Pampacancha	391 m	2,155 gal	13.34 %
4	Constancia F7	359 m	3,041 gal	18.82 %
Total		1,369 m	16,155 gal	100 %

Fuente: Elaboración propia

El ahorro total consolidado reportado por Cascadia fue de 16,155 galones, distribuido en cuatro intervenciones principales. La mayor contribución correspondió al Tramo 1 Constancia F7, con 7,615 galones ahorrados, lo que representa aproximadamente el 47.14 % del ahorro total. En segundo lugar, se ubicó el Tramo 2 Constancia F3, con 3,342 galones, equivalente al 20.69 %. Estos resultados demuestran que la priorización de tramos críticos permite obtener beneficios significativos incluso en distancias relativamente cortas.

La intervención en Pampacancha registró 2,155 galones ahorrados, mientras que la cuarta intervención en Constancia F7 alcanzó 3,041 galones. Aunque Pampacancha tuvo la mayor distancia intervenida, con 391 m, su ahorro fue menor respecto a los otros tramos, lo que evidencia que la longitud no es el único factor determinante del beneficio. La magnitud del ahorro depende también de la condición inicial de la vía, intensidad de tránsito, pendiente, velocidad, carga transportada y respuesta operativa después de la intervención.

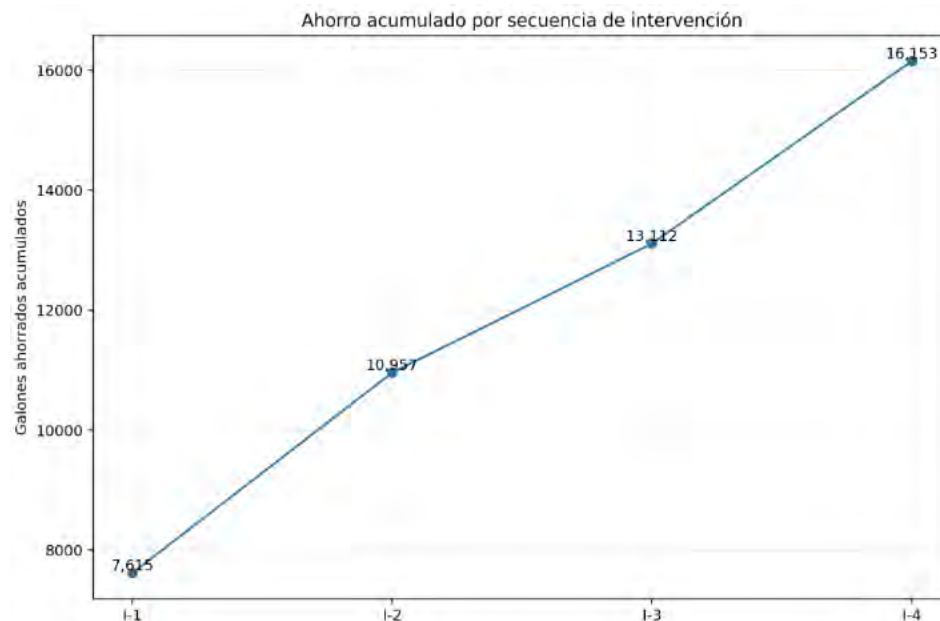
Figura 41: Ahorro total de combustible por intervención



Fuente: Elaboración propia

El gráfico evidencia que el Tramo 1 Constancia F7 fue el de mayor impacto económico-operativo, concentrando casi la mitad del ahorro total de combustible obtenido en las intervenciones analizadas.

Figura 42: Ahorro acumulado por secuencia de intervención



Fuente: Elaboración propia

El gráfico acumulado permite demostrar que las intervenciones sucesivas generaron un beneficio progresivo. La optimización no se limita a una mejora puntual, sino que se consolida a medida que se intervienen nuevos tramos críticos.

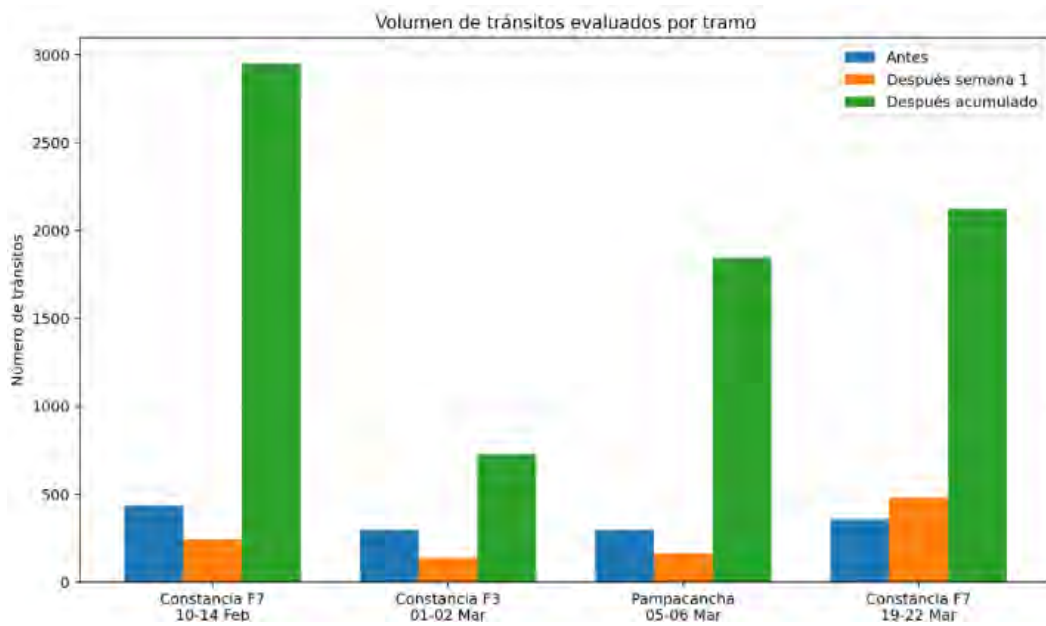
Tabla 11: *Eficiencia del ahorro según distancia intervenida*

Intervención	Tramo	Galones ahorrados	Distancia	Galones ahorrados por metro
1	Constancia F7	7,615	325 m	23.43 gal/m
2	Constancia F3	3,342	294 m	11.37 gal/m
3	Pampacancha	2,155	391 m	5.51 gal/m
4	Constancia F7	3,041	359 m	8.47 gal/m

Fuente: Elaboración propia

Al relacionar los galones ahorrados con la distancia intervenida, se observa que el Tramo 1 Constancia F7 presentó la mayor eficiencia, con 23.43 galones ahorrados por metro intervenido. Este resultado confirma que la intervención fue altamente efectiva, debido a que una distancia de 325 m generó el mayor ahorro total. En cambio, Pampacancha registró 5.51 galones ahorrados por metro, lo cual indica menor eficiencia relativa de la intervención, pese a tener la mayor longitud intervenida. Esta comparación permite sustentar que la selección de tramos no debe basarse únicamente en la longitud, sino en el potencial de optimización de cada ruta.

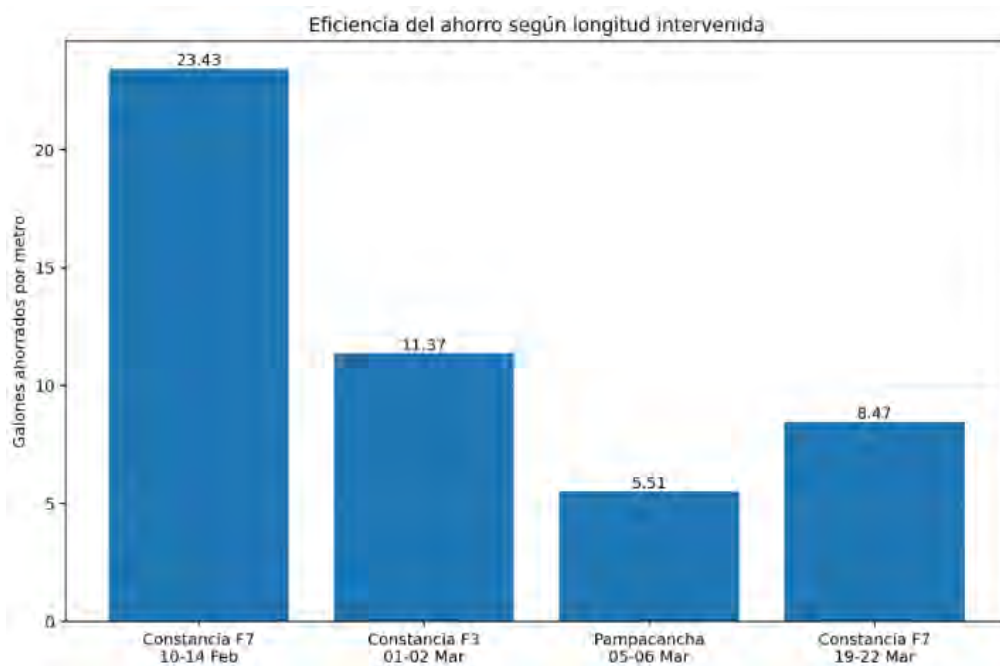
Figura 43: *Volumen de tránsitos evaluados por tramo*



Fuente: Elaboración propia

Este gráfico muestra el número de tránsitos considerados en la evaluación antes y después. La inclusión de tránsitos acumulados permite dar mayor solidez al análisis, ya que los resultados no se limitan a una medición puntual.

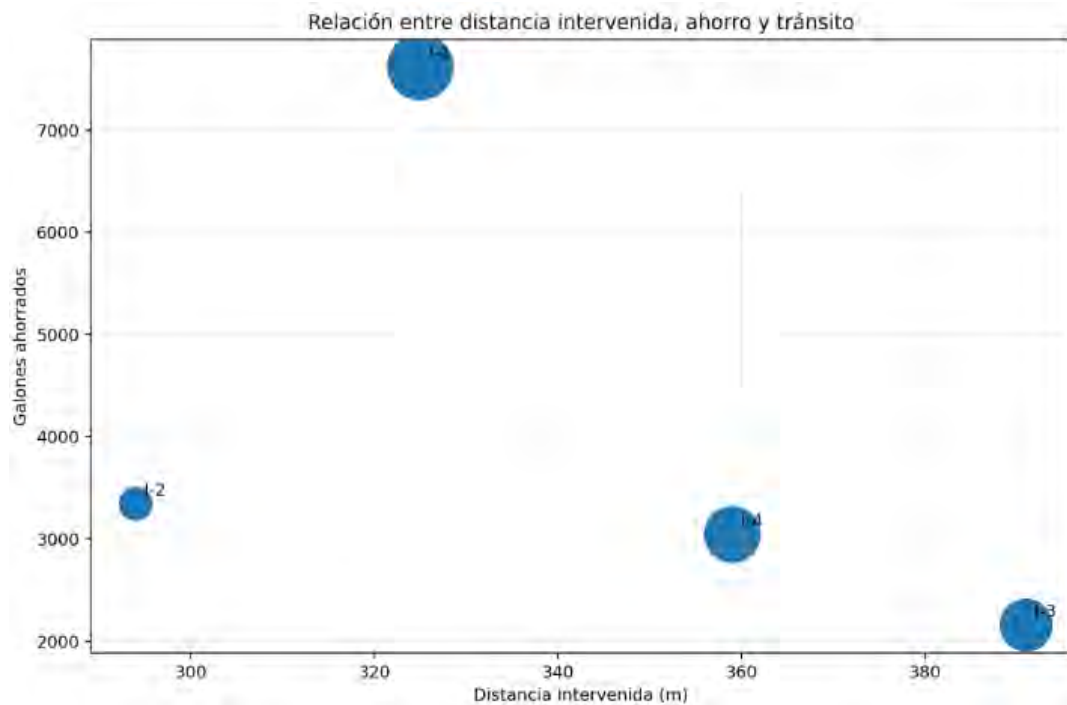
Figura 44: *Galones ahorrados por metro intervenido*



Fuente: Elaboración propia

El gráfico permite identificar la eficiencia relativa de cada intervención. El Tramo 1 fue el más eficiente, mientras que Pampacancha requiere una revisión adicional para incrementar el beneficio por metro intervenido.

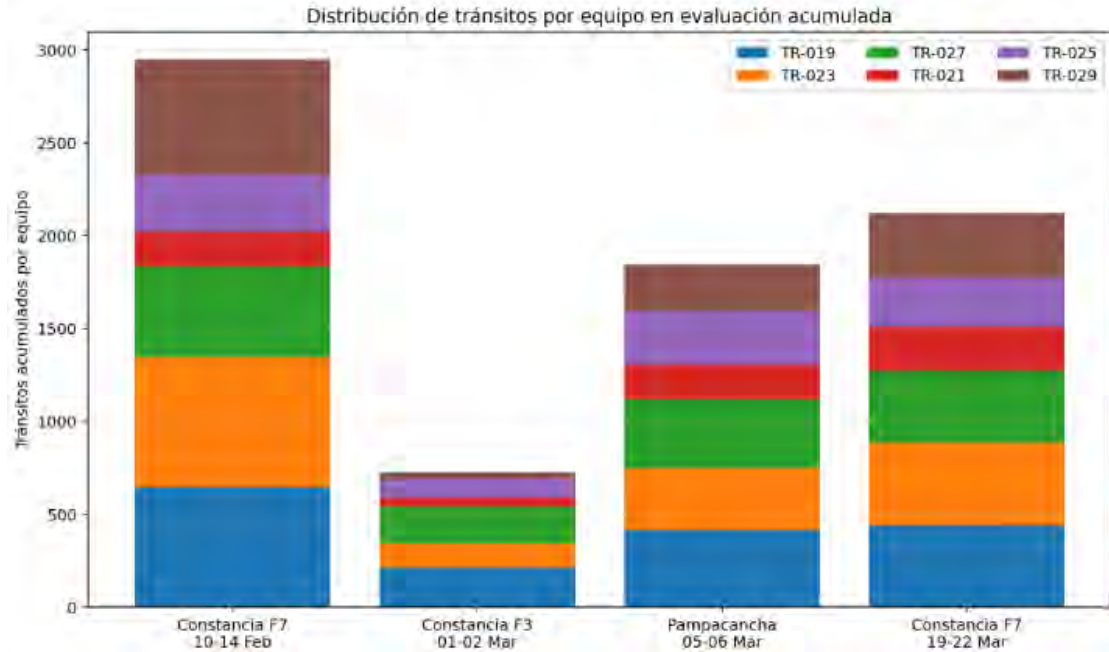
Figura 45: *Relación entre distancia intervenida, ahorro y tránsito*



Fuente: Elaboración propia

La relación entre distancia intervenida y galones ahorrados muestra que no existe una proporcionalidad directa. Esto confirma que los beneficios dependen del comportamiento operativo del tramo y no únicamente de la longitud de intervención.

Figura 46: Distribución de tránsitos por equipo en evaluación acumulada



Fuente: Elaboración propia

Este gráfico permite observar la participación de los equipos TR-019, TR-023, TR-027, TR-021, TR-025 y TR-029 en los tramos evaluados. La distribución por equipo ayuda a comprender qué unidades tuvieron mayor incidencia en los resultados acumulados de consumo y ahorro.

En términos generales, los resultados demuestran que la optimización de vías de acarreo tuvo un impacto directo sobre el consumo energético del sistema de transporte. La reducción promedio acumulada del consumo por tramo fue de 9.08 %, mientras que la reducción ponderada por tránsitos acumulados fue de aproximadamente 7.06 %. Asimismo, la velocidad promedio acumulada aumentó en 14.61 % por tramo y en 16.38 % al ponderarse por tránsitos, lo que evidencia una mejora operativa sostenida. Estos resultados son coherentes con el fundamento técnico de la tesis, donde se señala que la estandarización de pendientes, radios, peraltes y anchos de vía permite reducir aceleraciones bruscas, mejorar la estabilidad del tránsito y disminuir el consumo específico de combustible.

Por tanto, la comparación antes y después permite sostener que la implementación de mejoras en rutas de acarreo constituye una estrategia efectiva de optimización operativa. El ahorro de 16,155 galones no solo representa una reducción del consumo de combustible, sino también una mejora en la eficiencia del acarreo, menor exigencia mecánica para los camiones, mayor estabilidad de velocidad y mejor aprovechamiento de la infraestructura vial minera. En consecuencia, los resultados validan la importancia de gestionar las vías de acarreo como un componente estratégico de la operación minera y no únicamente como una infraestructura auxiliar

4.2.DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en la presente investigación confirman que la gestión técnica de las vías de acarreo influye directamente en la eficiencia operativa del transporte minero. La optimización aplicada en los tramos Constancia F7, Constancia F3, Pampacancha y nuevamente Constancia F7 permitió obtener un ahorro total de 16,155 galones de combustible, con reducciones acumuladas de consumo de 14.73 %, 12.12 %, 2.49 % y 6.99 %, respectivamente. Estos resultados evidencian que la mejora de rutas, cuando se realiza sobre tramos críticos previamente identificados, genera beneficios medibles en consumo de combustible, velocidad promedio y estabilidad del acarreo. La plataforma Cascadia/SmarterView permitió comparar el desempeño antes y después de las intervenciones, utilizando sensores, GPS, modelos de machine learning y análisis SHAP para estimar el impacto de la condición de ruta sobre el consumo de combustible.

En comparación con Visser y Thompson (2015), quienes señalan que el diseño geométrico, la calidad superficial y la disciplina de mantenimiento son determinantes para reducir el consumo de combustible, desgaste de neumáticos y riesgos operativos, los resultados de esta investigación presentan una coincidencia directa. La reducción de consumo observada en Constancia F7 de 1.29 a 1.10 gal/tránsito y en Constancia F3 de 2.31 a 2.03 gal/tránsito demuestra que la mejora de la

superficie de rodadura y la intervención técnica de rutas reducen la resistencia al avance de los camiones. Mientras el antecedente establece el fundamento técnico general para la gestión de haul roads, esta investigación lo valida con información operativa real de la Unidad Minera Constanica, cuantificando ahorros concretos por tramo intervenido.

Asimismo, los resultados guardan relación con el Recognised Standard 19 del Department of Natural Resources and Mines de Queensland, el cual enfatiza la necesidad de definir criterios verificables de pendientes, peraltes, radios de curvatura, anchos de vía y auditorías de conformidad geométrica. En la presente investigación, la aplicación del estándar STD-OM-108 y el control mediante analítica de datos permitieron pasar de una gestión correctiva a una gestión más preventiva y medible. Esta coincidencia es importante porque demuestra que los estándares viales no solo tienen valor normativo, sino también impacto económico-operativo. La diferencia principal es que el antecedente se orienta a lineamientos técnicos de diseño y construcción, mientras que este estudio incorpora una evaluación antes–después con indicadores de combustible, velocidad, tránsitos y ahorro acumulado.

En relación con Valenzuela Barreto (2022), quien concluyó que la corrección de rampas, intersecciones y cuellos de botella reduce la variabilidad del ciclo de acarreo y mejora la productividad, los resultados de esta tesis también son concordantes. La mejora de velocidad en todos los tramos evaluados demuestra que las intervenciones sobre la ruta permiten reducir restricciones operativas que afectan el desplazamiento continuo de los camiones. En Constanica F3, la velocidad acumulada pasó de 11.03 km/h a 12.79 km/h, mientras que en la cuarta intervención de Constanica F7 aumentó de 10.95 km/h a 12.19 km/h. Estos incrementos refuerzan la idea de que una vía mejorada permite ciclos más estables, menores pérdidas por aceleración y frenado, y una operación de acarreo más predecible.

Respecto a Arrascue Fuentes (2021), quien evaluó la viabilidad del uso de drones para la detección temprana de fallas en vías de acarreo, la presente investigación coincide en la necesidad de incorporar herramientas tecnológicas para optimizar el monitoreo y pasar de inspecciones visuales a evaluaciones objetivas. En este estudio, la plataforma Cascadia/SmarterView permitió utilizar mapas de calor, medición directa, modelamiento y valores SHAP para identificar puntos de mejora y estimar beneficios por tipo de camión, dirección de tránsito y condición de carga. La principal diferencia es que Arrascue se centró en la identificación de deterioros superficiales para proyectar estimaciones teóricas de ahorro, mientras que esta investigación relaciona la intervención física de la ruta con indicadores económicos y operativos reales en campo, evidenciando un ahorro comprobado de 16,155 galones de combustible y mejoras directas en la velocidad.

En relación con Ancalla Gómez (2018), quien demostró que la combinación de un diagnóstico geométrico y un mantenimiento programado incrementa la producción operativa—, se ratifica que el control estructurado de la infraestructura vial reduce significativamente el esfuerzo mecánico de la flota. Sin embargo, el aporte distintivo de esta tesis radica en la evolución metodológica del control. Mientras dicho antecedente se fundamentó en levantamientos topográficos convencionales y en la evaluación de rutinas estáticas, el presente trabajo incorporó un ecosistema de validación dinámica. Al enlazar la corrección física de los tramos directamente con la telemetría en tiempo real, se logró medir el efecto operativo de forma continua, lo cual se tradujo no solo en el registro preciso de 16,155 galones de combustible ahorrados, sino en un incremento comprobado de hasta el 28.09 % en la velocidad de acarreo.

Finalmente, los resultados de esta investigación se relacionan con Ágreda Ajén (2018), desarrollado también en Mina Constanza con aplicación de ControlSense, existe una relación

directa en el uso de tecnología para mejorar el ciclo de carguío y acarreo. Dicho antecedente reportó mejoras asociadas al monitoreo operativo, velocidades y tiempos de acarreo; en cambio, la presente investigación profundiza en la condición de las vías como causa específica del desempeño del transporte. Los resultados obtenidos muestran que no basta con monitorear la flota, sino que es necesario intervenir físicamente las rutas críticas. Esto se evidencia en el Tramo 1 Constancia F7, donde después de la intervención la velocidad acumulada aumentó de 10.93 km/h a 14.00 km/h, equivalente a una mejora de 28.09 %, además de generar 7,615 galones ahorrados.

CONCLUSIONES

1. La implementación del estándar, permitió incrementar la velocidad y reducir el consumo de combustible garantizando la sostenibilidad operativa en la Unidad Minera Constancia – Hudbay Perú S.A.C.
2. El diagnóstico inicial permitió identificar deficiencias en el diseño, construcción y mantenimiento de las vías de acarreo. Este análisis sirvió como base para definir áreas críticas de mejora.
3. La gestión del estándar permitió incrementar la velocidad promedio en un 14.61% mejorando el desempeño operativo en la Unidad Minera Constancia – Hudbay Perú S.A.C.
4. La gestión del estándar redujo el consumo de combustible entre el 8 % y el 12 % optimizando las ganancias netas en la Unidad Minera Constancia – Hudbay Perú S.A.C.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda institucionalizar el estándar como documento de cumplimiento obligatorio en todas las fases de la operación, desde planeamiento hasta ejecución. Asimismo, debe garantizarse su revisión anual para adaptarlo a la evolución de la operación y a las innovaciones tecnológicas aplicables.
2. Es fundamental priorizar el mantenimiento preventivo frente al correctivo, estableciendo rutinas programadas de perfilado, drenaje y reposición de afirmado. Se recomienda integrar estas actividades al plan maestro de mantenimiento de mina, con KPIs de cumplimiento medibles y auditables.
3. Se recomienda fortalecer la digitalización de la gestión vial incorporando de manera continua el uso de drones, gemelos digitales y procesamiento con inteligencia artificial. Esto permitirá un monitoreo en tiempo real más robusto y una capacidad de respuesta inmediata ante desviaciones críticas en parámetros geométricos y estructurales.
4. Dado que la estandarización demostró beneficios técnicos, económicos y de seguridad, se recomienda implementar este modelo en otras unidades operativas de Hudbay y de compañías similares. Ello permitirá reducir la variabilidad de desempeño entre minas, generando un marco común de gestión de infraestructura vial minera a nivel corporativo y sectorial.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Ágreda Ajén, J. A. (2018). Optimización del carguío y acarreo aplicando el sistema ControlSense en la Mina Constancia [Tesis de título profesional, Universidad Alas Peruanas]. Repositorio Institucional UAP, Cajamarca, Perú.
- Domínguez, J. (2012). *Optimización del Carguío y Acarreo por Zublin Chile Caso Minera Yanacocha*. Universidad Nacional de Ingeniería, Cajamarca, Perú. Obtenido de <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/1838>
- Gómez, G. (2017). *Disponibilidad de Equipos Auxiliares para Optimizar la Productividad en el Carguío y Acarreo de las Fases 01,03 y 07 del Tajo Constancia Empresa Especializada Stracon Gym S.A.* Universidad Nacional San Agustín de Arequipa, Chumbivilcas, Cusco, Perú. Obtenido de repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/3252
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la Investigación* (Sexta ed.). Ciudad de Mexico, México: Mc Graw Hull Education.
- Huamán, W. (2015). *Estudio Comparativo entre el Sistema Minestar Health y el Sistema Convencional en el Control de Camiones Mineros en Minera Gold Fields La Cima, Cajamarca - 2015*. Universidad Privada del Norte, Hualgayoc, Cajamarca, Perú. Obtenido de <http://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/han>
- KIM, C. J. (2009). *DISEÑO Y EVALUACIÓN TÉCNICO ECONÓMICA DE UN NUEVO. SANTIAGO DE CHILE*. Obtenido de <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/103454/Disen%cc%83o-y-evaluacio%cc%81n-te%cc%81cnico-econo%cc%81mico-de-un-nuevo-sistema-de-cargui%cc%81o-y-transporte.pdf?sequence=3&isAllowed=y>

- Lagos, E. (2012). *Gestión Operativa del Sistema de Despacho – Estudio Técnico y Económico*. Universidad Nacional de Chile, Santiago, Chile. Obtenido de http://www.tesis.uchile.cl/tesis/uchile/2012c/sources/lagos_ec.pdf
- Marca, W. (2014). *Análisis de la Disponibilidad y Rendimiento de los Equipos de Carguío y Transporte en la Empresa Contratista Smcgsa, Mina Colquijirca de SMBSA*. Tacna, Perú. Obtenido de <http://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/>
- Mauricio G. (2015). *Mejoramiento Continuo en la Gestión del Ciclo de Acarreo de Camiones en Minería a Tajo Abierto en Antamina, Cerro Verde, Toquepala, Cuajone, Yanacocha, Alto Chicama, Las Bambas, Cerro Corona, Antapacay y Pucamarca. Tesis Magistral en Ciencias*. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú. Obtenido de cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/2181
- Olazabal, J. (2014). *Factibilidad del Cambio de Sistema de Control de Mina en la Unidad Minera Toquepala*. . Pontificia Universidad Católica, Lima, Perú. Obtenido de tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/123456789/59
- Ríos, F. (2013). *Evaluación del Rendimiento de Diferentes Tipos de Rodaduras para la Optimización del Ciclo de Acarreo y Transporte del Material en Tunelería*. Universidad de San Carlos de Guatemala, San Carlos, Guatemala. Obtenido de http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_3541_C.pdf
- Torres, G. A. (2019). *OPTIMIZACIÓN DE EQUIPOS DE CARGUÍO Y TRANSPORTE. CUSCO - PERÚ : UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO* .
- Bernal, C. A. (2016). **Metodología de la investigación: para administración, economía, humanidades y ciencias sociales** (4.^a ed.). Pearson.

- Department of Natural Resources and Mines. (2019). *Recognised Standard 19: Design and construction of mine roads*. Queensland Government.
- Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado, C., & Baptista, P. (2021). *Metodología de la investigación* (7.^a ed.). McGraw-Hill.
- Yin, R. K. (2018). *Case study research and applications: Design and methods* (6th ed.). SAGE Publications.

ANEXOS

• ÁMBITO DE LA INVESTIGACIÓN

El presente anexo describe el ámbito físico, geológico, operativo y económico de la Unidad Minera Constancia, operada por Hudbay Perú S.A.C., con la finalidad de contextualizar el desarrollo de la investigación titulada “Gestión del diseño, construcción y mantenimiento de vías de acarreo en la Unidad Minera Constancia – Hudbay Perú S.A.C.”. La investigación se enfoca en las vías de acarreo de la unidad minera, debido a su importancia en el transporte de material, la eficiencia operativa, la seguridad vial minera y los costos de operación.

La Unidad Minera Constancia se encuentra ubicada en la región Cusco, en el sur del Perú. Corresponde a una operación minera a tajo abierto orientada principalmente a la explotación de cobre, con presencia de molibdeno, plata y oro como elementos asociados. Su ubicación geográfica permite relacionar la operación con las condiciones topográficas, climáticas y geotécnicas propias de la zona altoandina, las cuales influyen directamente en el diseño, construcción y mantenimiento de las vías de acarreo.

Las vías de acarreo dentro de la unidad minera constituyen infraestructura crítica, debido a que conectan los frentes de minado, botaderos, chancadora, zonas de descarga, áreas auxiliares y accesos operativos. Por ello, su ubicación dentro del tajo y sectores asociados debe ser evaluada considerando pendientes, radios de giro, anchos de vía, drenaje superficial, estabilidad de taludes y condiciones de tránsito de equipos de gran tonelaje.

[illegible]

Fuente: Área de Planeamiento Mina – Unidad Minera Constanacia

- **ACCESIBILIDAD**

La accesibilidad hacia la Unidad Minera Constanca se realiza principalmente por vía terrestre, mediante carreteras regionales y accesos internos que permiten el traslado de personal, maquinaria, insumos, combustibles y equipos auxiliares. Esta condición resulta importante para la operación minera, ya que la continuidad del transporte externo e interno influye en la logística, abastecimiento y desarrollo de las actividades de producción.

Dentro de la operación, la accesibilidad interna está conformada por vías principales de acarreo, accesos secundarios, rampas, intersecciones, zonas de parqueo operativo, accesos hacia botaderos y conexiones hacia planta. Estas vías deben mantenerse en condiciones adecuadas para

soportar el tránsito constante de camiones mineros, equipos auxiliares, vehículos livianos y maquinaria de mantenimiento vial.

Desde el punto de vista operativo, la accesibilidad no solo se relaciona con la existencia de caminos, sino también con su condición funcional. Por ello, deben considerarse aspectos como el ancho operativo, pendiente máxima, estado de la superficie de rodadura, señalización, drenaje, bermas de seguridad, control de polvo y visibilidad en curvas e intersecciones.

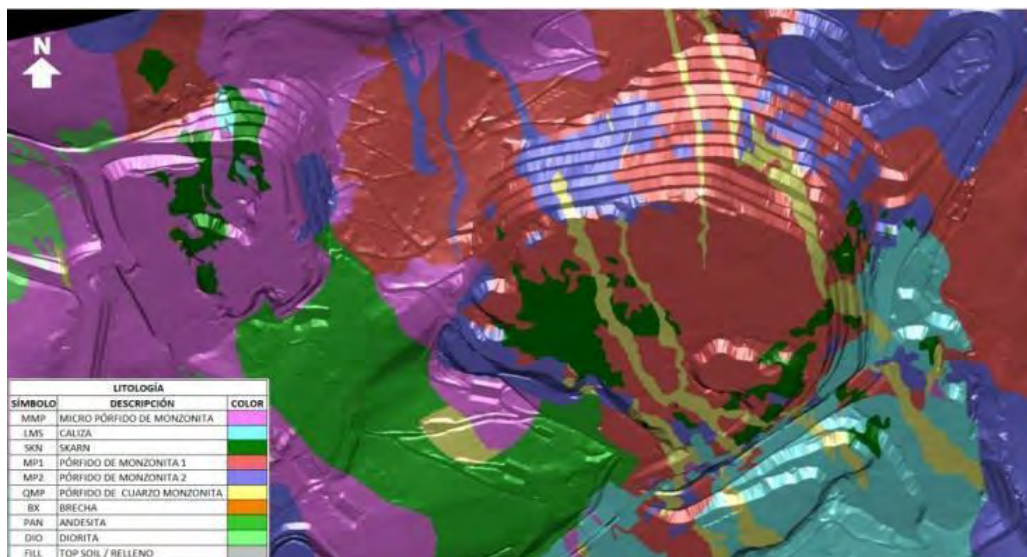
- **GEOLOGÍA GENERAL.**

Geología general se presentan principalmente rocas ígneas intrusivas del batolito de Apurímac, rocas volcánicas de las formaciones Alfabamba, Orcopampa, Casanuma y Huaycha, cuyas edades se encuentran entre el cretáceo inferior al cretáceo superior. así como rocas sedimentarias de limonitas, areniscas y calizas de las formaciones Chilloroya y Arcurquina; (Gomez, 2017, p. 41).

- **GEOLOGÍA REGIONAL Y LOCAL.**

La unidad minera Constancia se encuentra emplazado en la margen este del batolito Andahuaylas – Yauri. La Formación Arcurquina descansa de manera discordante sobre la Formación Chilloroya y se correlaciona con la Formación Ferrobamba del Cretácico Superior (Huamani, 2018, p. 41). La litología se puede observar en la Figura 10. El pórfido de monzonita es la principal rocas huéspedes de la mineralización porfídica de cobre de Constancia. Se han reconocido al menos cuatro fases principales de intrusión, y la segunda más antigua se encuentra asociada con el evento de mineralización principal del más antiguo al más reciente Los patrones del afloramiento de las monzonitas sugieren que estas intrusiones son mayormente planas, parcialmente de tipo sill y se encuentran en contacto con unidades de roca calcárea que ocurren con frecuencia como colgantes. (Zeballos, 2019, p. 16).

Figura 48: Vista en 3D de litología de la unidad minera Constanca.



Fuente: Área de Planeamiento Mina – Unidad Minera Constanca

• GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

De igual manera que ocurre con la mayor cantidad de complejos de cobre porfídico, la actividad estructural en Constanca ha jugado el papel más relevante en la preparación y localización de la alteración hidrotermal y en el acompañamiento de la mineralización de cobre, molibdeno, plata, oro, incluyendo la formación de skarn (Knight Piesold 2013, p. 25).

Los sistemas principales de diaclasamiento inter-mineral y post- mineral en el área del yacimiento tienen rumbo noreste. Uno de los mejor conocidos es la "Falla de Barita", y se hace referencia a la dirección de la "Barita". El sistema estructural de la Falla Barita está formado por un número de fallas de vetas casi paralelas que transportan sulfatos de metal base y barita. Estas vetas han sido explotadas mediante trabajos mineros artesanales en toda la propiedad. Este sistema es claramente visible en los mapas magnéticos de suelos, controlando las características principales incluyendo los cambios topográficos y cortes en la zona de San José.

Un segundo sistema importante dirección de norte a sur. Éste parece ser más reciente que el sistema de Barita, controlando parte del yacimiento San José y la mayor parte de las brechas

silicificadas (algunas de ellas mineralizadas) en el sistema. Éste tiene la misma dirección que los diques post-minerales, y puede haberse originado en la medida que existen cortes de tensión hacia la dirección de la Barita.

Al final de la secuencia se encuentra el sistema de fallas con orientación norte-noroeste a sur-sureste, cuyo principal ejemplo es la Falla Yanak mostada en la Figura 11. Estas fallas generan extensas áreas de salbanda y roca molida, algunas de las cuales muestran altas pendientes hidráulicas.

- **FALLA BARITINA**

La Falla de Barita es una estructura de formación tardía, con rumbo noreste-suroeste entre las zonas de Constancia y 50 San José. La zona de falla tiene por lo general de 5 a 10 m. de ancho, y se caracteriza por óxidos brechados de monzonita-barita-cuarzo-cobre y galena. En detalle, la veta muestra una estructura escalonada, con secciones ajustadas al noreste seguidas de cortes de tensión este-noreste e incluso este-oeste, las cuales contienen mineralización de mejor ley.

Varios tajos y túneles de exploración se encuentran ubicados a lo largo de esta estructura en más de 1000 m. Ocurren vetas paralelas, las cuales

muestran rumbo y mineralización similar. Debido a la escasez de afloramientos y al rumbo cambiante, la Falla de Barita se define como una zona con fallas simples definidas en oposición a la zona de corte, donde las fallas / vetas individuales no han sido definidas.

La Falla de Barita tiene movimiento de cobre post-Hipógeno tardío que difiere y limita la zona de Constancia en su lado noroeste. El sistema de fallas puede asimismo controlar la zona de San José en su lado sur.

Es posible que las zonas de San José y Constancia puedan tener desplazamiento horizontal equivalente a lo largo de una Falla de Barita lateral izquierda.

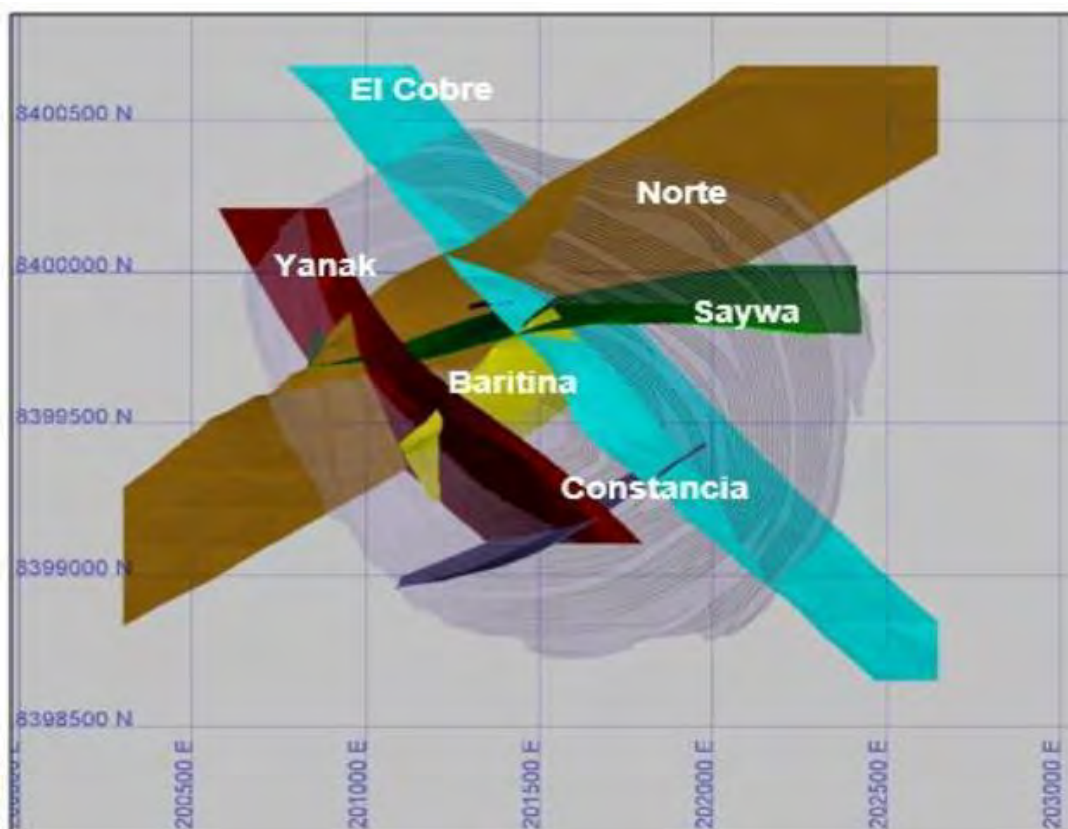
- **FALLA SAN JOSÉ**

Esta es una falla que está ligada al lado oriental del tajo San José. Tiene rumbo norte-sur; sin embargo, serpentea en su extensión norte, donde puede estar asociada con las zonas de silicificación de Yanaccaca.

- **FALLA YANAK**

Esta falla pertenece al evento estructural más reciente en el área. La estructura presenta rumbo norte-noroeste a sur - sureste y se encuentra ubicado entre los yacimientos Constancia y San José. Ha sido reconocida por aproximadamente 3 km y ha desarrollado una zona de influencia de hasta 50 m de ancho donde se encuentran presentes la salbanda y roca molida.

Figura 49: *Fallas Principales en 3D, tajo Constancia.*

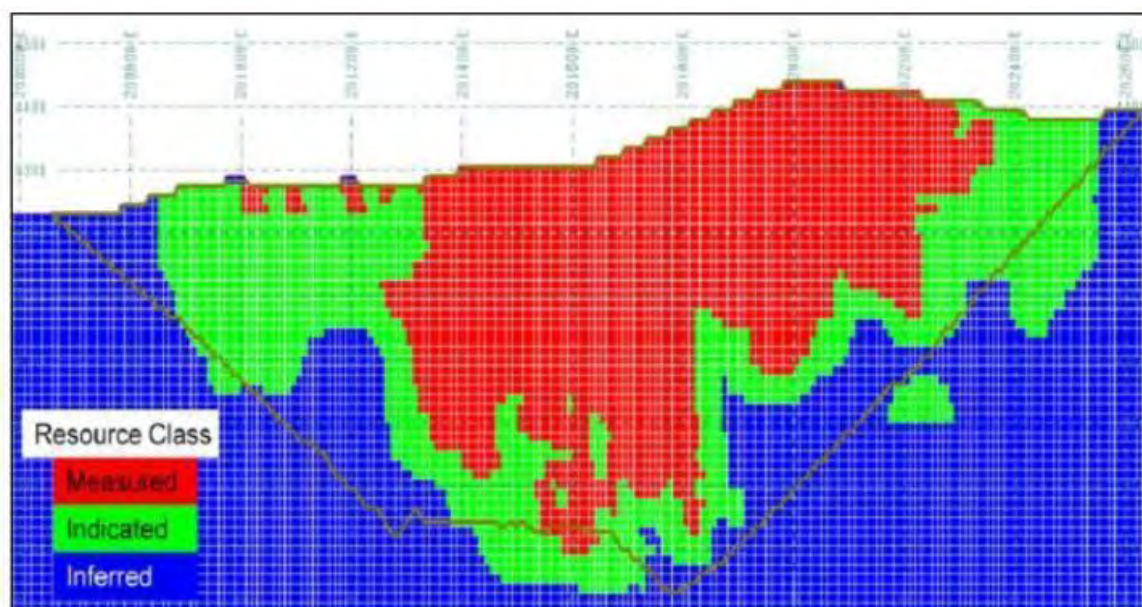


Fuente: Área de Planeamiento Mina – Unidad Minera Constancia

- **RECURSOS Y RESERVAS**

Los recursos minerales para el depósito de Constancia se muestran en la Figura 12 y se clasificaron bajo los Estándares de Definición de Recursos Minerales y Reservas Minerales de la CIM 2016 mediante la aplicación de una ley de corte de acuerdo al *Net Smelter Return* (NSR) que refleja el beneficio combinado de producir cobre, molibdeno y plata además de los costos operativos, procesales de la mina. Los recursos minerales, clasificados como Medidos, Indicados e Inferidos, se resumen en la Tabla 5 Los recursos minerales se informan utilizando los precios de los metales a largo plazo y tienen una fecha de vigencia del 30 de junio de 2016. Los recursos minerales que no son reservas minerales no tienen viabilidad económica demostrada. Debido a la incertidumbre que puede estar asociada con los recursos minerales inferidos, no se puede suponer que la totalidad o parte de los recursos inferidos se actualizará a un recurso indicado o medido. (Huamani, 2018, p. 57).

Figura 50 : *Recursos minerales de mina Constancia.*



Fuente: Área de Planeamiento Mina – Unidad Minera Constancia

Tabla 12: *Reservas de mineral de Constancia y Pampacancha.*

	Categoría	Mt	CU(%)	Mo(g/t)	Ag(g/t)	Au(g/t)
Constancia	Probado	442.3	0.30	99	2.99	0.037
	Probable	109.4	0.23	64	2.66	0.035
	Total 2P	551.7	0.29	92	2.93	0.037
Pampacancha	Probado	22.8	0.53	149	4.44	0.299
	Probable	20.2	0.44	164	3.85	0.250
	Total 2P	43	0.49	156	4.17	0.276
Stockpile	Probado	3.5	0.50	115	4.53	0.075
	Probado	468.6	0.32	101	3.08	0.05
	Probable	129.6	0.26	80	2.85	0.068
Total		598.2	0.30	97	3.03	0.054

Fuente: Área de Planeamiento Mina – Unidad Minera Constancia

• **PARÁMETROS DE DISEÑO**

Se realiza un método de minado convencional de tajo abierto con la aplicación de perforación y voladura, palas y camiones de gran tonelaje

- Ancho de la vía de acarreo: 32.5 m
- Gradiente de la vía: 10%
- Ancho de minado: 60 m en promedio
- Gradiente inter-rampa: 45°-47°
- Talud de banco: 60°-65°
- Talud final: 37°-42°
- Altura de banco: 15 m
- Capacidad de la planta: ±29 Mt/año

• **PARÁMETROS DE LA OPERACIÓN MINA**

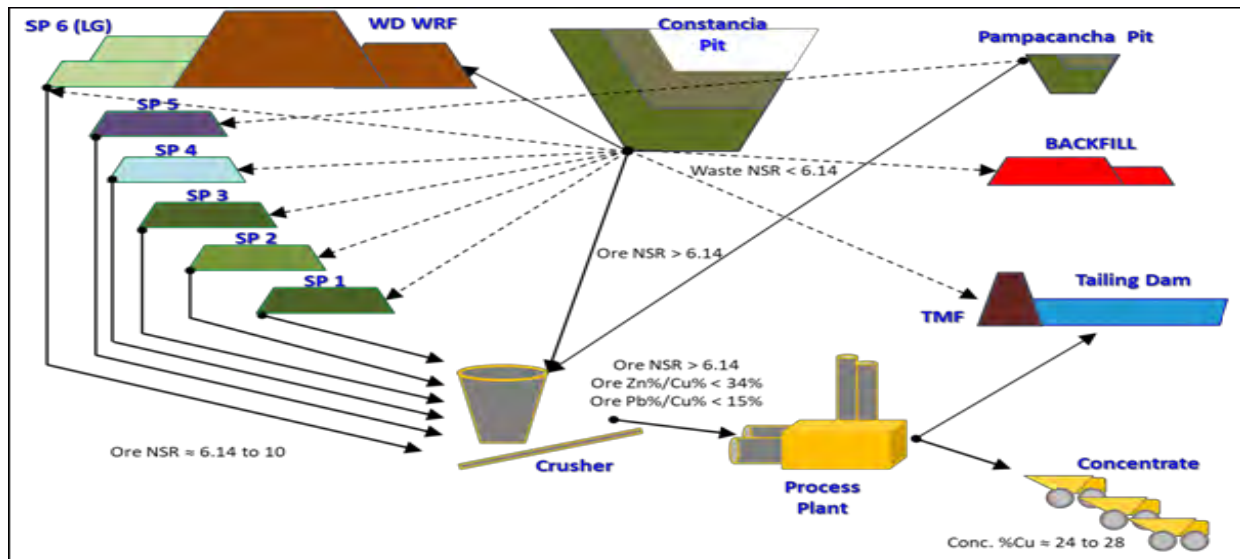
- Rendimiento 28.1Mt

- Concentrado promedio (toneladas):
- Años 1-5: 118 000
- Años 6-16: 77 000
- Costo por libra:
- Años 1-5: US\$/Lb 0,66
- Años 6-16: US\$/Lb 1,11
- Gasto de capital inicial: USD 1 546 M

- **PLAN DE MINA**

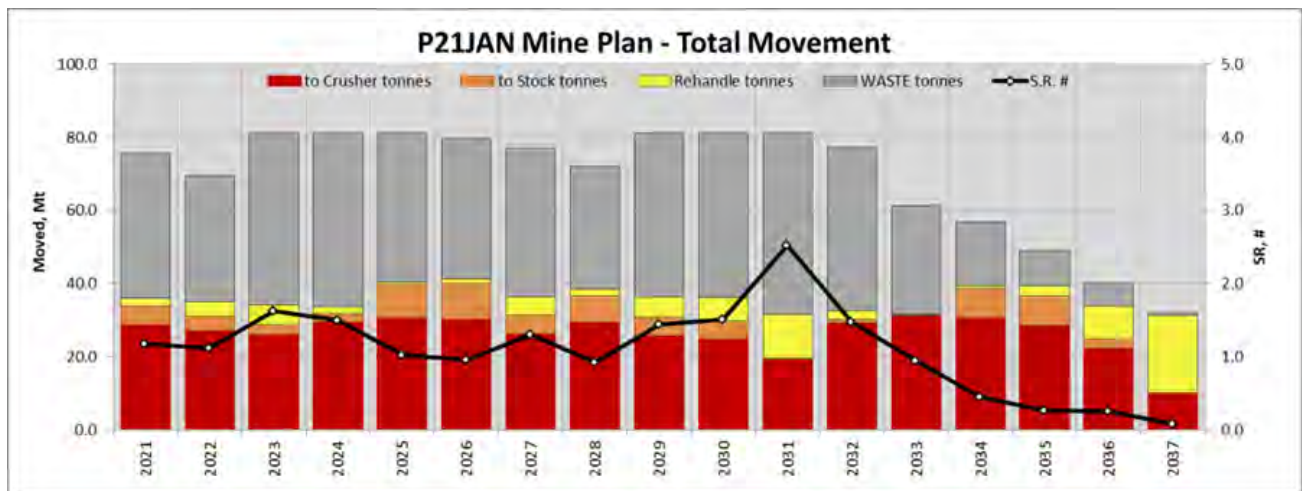
El plan de producción de la mina incluye 569,4 Mt de desmonte y 532,5 Mt de mineral (tanto de tajos como de acopio), arrojando una relación de desbroce promedio (desecho/mineral) de 1,1. Se requiere una tasa de extracción anual promedio de 77,0 Mtpa, durante los primeros 13 años, con un máximo de 81 Mtpa, para proporcionar una tasa nominal de alimentación al proceso de mineral de 31,3 Mtpa en función de un rendimiento variable por tipo de mineral (90-94 ktpd y 94 % disponibilidad). El cronograma de producción de mineral para la operación presenta tendencias descendentes con la ley de Cu promediando 0.44 % Cu de 2022 a 2024 cuando Pampacancha está en su pico de producción, luego se reduce a 0.34 % Cu de 2025 a 2029 con la programación preferencial de mineralización de mayor ley de el tajo Contancia y finalizando disminuyendo a 0.25% Cu al final de la vida de la mina. La ley promedio LOM promedio es 0.311% Cu, 0.009% Mo, 0.065 g/t Au y 3. El diagrama de flujo de destino de las operaciones de Constancia se muestra en la Figura mientras que la Tabla presenta las distancias en km entre las Fases de la Mina y las instalaciones principales. Los cronogramas de la mina para la vida útil de la mina se muestran en la Figura.

Figura 51: Flujo orígenes y destinos



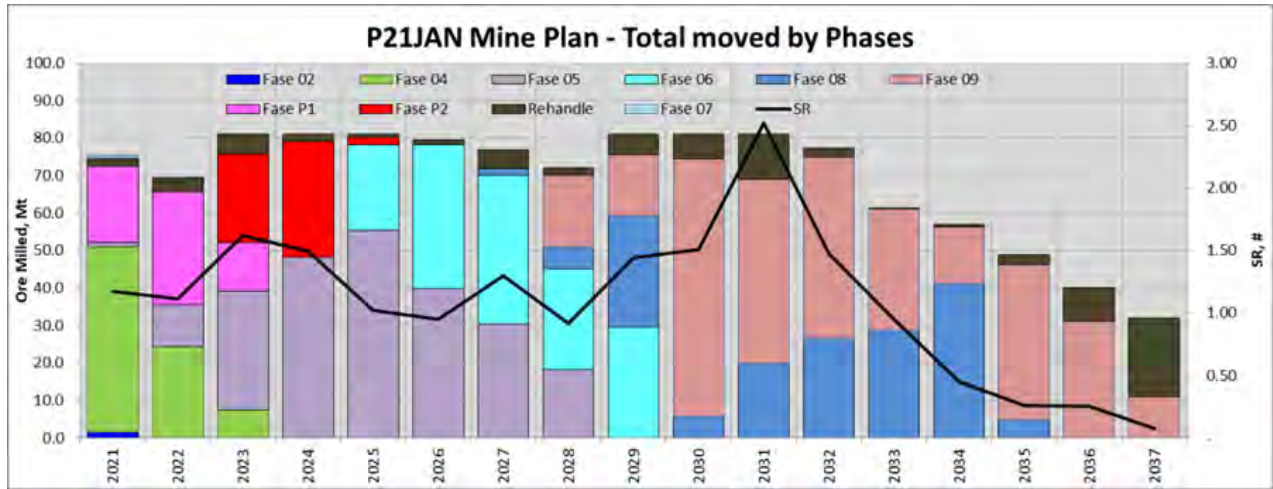
Fuente: Área de Planeamiento Mina – Unidad Minera Constanica

Figura 52: Movimiento de materiales por destino



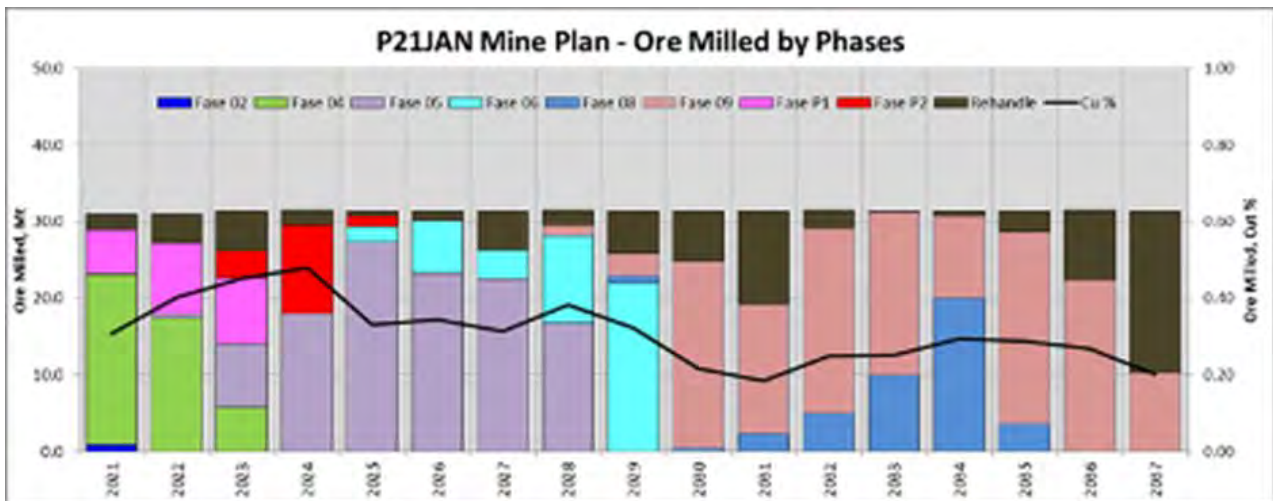
Fuente: Área de Planeamiento Mina – Unidad Minera Constanica

Figura 53. Movimiento de materiales por fase de minado



Fuente: Área de Planeamiento Mina – Unidad Minera Constanca

Figura 54. Material movido ore por fases



Fuente: Área de Planeamiento Mina – Unidad Minera Constanca