

UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA

Escuela Profesional de Ingeniería de Minas

**“OPTIMIZACIÓN DE LA PRODUCTIVIDAD DE ACARREO DE
DESMONTE MEDIANTE IMPLEMENTACIÓN DE FAJAS
TRANSPORTADORAS Y CHANCADORAS UTILIZANDO
LA SIMULACIÓN CON EL SOFTWARE MINEHAUL®
EN LA COMPAÑÍA MINERA ANTAMINA S.A.”**

TESIS

PRESENTADA POR:

BACH. BRIAN JARNI VARGAS JUAREZ

Para obtener el Título Profesional de:

INGENIERO DE MINAS

MOQUEGUA – PERÚ

2019

UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS



FOLIO N°

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Según Resolución de COMISIÓN ORGANIZADORA N° 1120-2019-LINAM

El Jurado Dictaminador ha calificado la defensa de la tesis:

TITULADA:

OPTIMIZACIÓN DE XADRO DESMONTE MEDIANTE
IMPLEMENTACIÓN DE FOPS TRANSPORTADORES Y CHANCADORES
UTILIZANDO LA SIMULACIÓN CON EL SOFTWARE MINEMANL®
EN LA COMPAÑIA MINERO ANTAMINA S.A.

Asesor: DR. MARCO LUIS QUISPE PEREZ

Asesor Externo:

Tesista: BACH. BRIAN JAVIER VARGAS JUÁREZ

UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA
CERTIFICA: Que el presente documento ES COPIA FIEL DEL ORIGINAL, al que me remito para los fines pertinentes

Moquegua 27 NOV 2019

Tec. Josefa Quispe Tintaya
FEDATARIA ADSCRITA 03

Dictamina como APROBADO por UNANIMIDAD

La defensa del tema de investigación con la nota: DIECISEIS (16)

Por lo que SÍ opta el Grado de Ingeniero de Minas.

Siendo las 12:00 horas, del 19 de NOVIEMBRE del año 2019

se procede a firmar la presente.

Presidente del Jurado
ING. JORGE LUIS FLORES SANCHEZ

Primer Miembro
ING. AGAPITO FLORES JUSTO

Segundo Miembro
ING. OSMAR CUENCA TOLEDO

Tesista
Bach. Brian Vargas Juárez

DEDICATORIA

A Dios por bendecirme con salud y permitirme cumplir mis metas y objetivos, además de su bondad y amor infinito.

A mi madre Nilda, mi padre Oscar y Bárbara, quienes me apoyaron en cada una de mis metas.

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Nacional de Moquegua y a la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas por brindarme todos los conocimientos para realizar mis estudios.

Al Dr. Marcos Luis Quispe Pérez, por el apoyo brindado en la dirección de la presente investigación, por su amistad y compañerismo.

Al MSc. Luis Richard Mamani, por el apoyo y disposición para el desarrollo del presente trabajo de investigación.

A mis compañeros del área de planeamiento de largo plazo de la Compañía Minera Antamina S.A., por su excelente ética profesional, valiosas aportaciones críticas en el desarrollo del presente documento, y sobre todo por su apreciable y valiosa amistad.

A los miembros del jurado calificador de la presente tesis, el presidente MSc. Jorge Luis Tomas Florez Salas, primer miembro Ing. Agapito Flores Justo y segundo miembro MSc. Osmar Cuentas Toledo, por contribuir con sus sugerencias en el desarrollo y presentación de la investigación.

A los catedráticos de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, por sus orientaciones, críticas constructivas y contribuir en mi formación académica.

RESUMEN

En la minería superficial el mayor costo operativo es el acarreo que sobrepasa el 50% del total de costos de operaciones en la mina. El objetivo de este estudio es optimizar la productividad de acarreo de desmonte en la Compañía Minera Antamina mediante la implementación del sistema de chancado y fajas. En este contexto, el incremento de productividad reduce los costos de acarreo, pero para que el proyecto pueda concretarse requiere de una fuerte inversión de capital que debe ser sustentada en la evaluación económica realizada en la presente investigación.

El método de evaluación de los proyectos propone una simulación mediante el software MineHaul® para el acarreo, con variación de escenarios, es decir, de un caso base que no considera implementación del proyecto y tres casos alternativos que incluyen el proyecto con diversas ubicaciones en la topografía de la mina. Los resultados demuestran el incremento de la productividad gracias al proyecto, pero el valor de este depende de la distancia desde las salidas del pit y el ahorro de distancias de acarreo, ya que este ahorro debe superar la inversión de capital realizada.

Teniendo en cuenta esto, se recomienda que se evalúe con mayor detalle el Capex requerido para la implementación del proyecto en la mejor ubicación evaluada.

Palabras clave: Planeamiento de minado, productividad de acarreo, sistemas de chancado y fajas transportadoras, software MineHaul®.

ABSTRACT

In surface mining, the highest operating cost is the hauling that exceeds 50% of the total operating costs in the mine. The objective of this study is to optimize the productivity of waste haulage in the Antamina Mining Company through the implementation of the crushing and conveyor systems. In this context, the increase in productivity reduces the costs of hauling, but in order for the project to be carried out it requires a strong capital investment that must be supported in the economic evaluation carried out in the present investigation.

The project evaluation method proposes a simulation using the MineHaul® software for hauling, with variation of scenarios, that is, of a base case that does not consider project implementation and three alternative cases that include the project with various locations in the topography of the mine. The results demonstrate the increase in productivity thanks to the project, but the value of this depends on the distance from the pit exits and the saving of haul distances, since this saving must exceed the capital investment made.

With this in mind, it is recommended that the Capex required for project implementation in the best location evaluated be evaluated in greater detail.

Keywords: Mine planning, hauling productivity, crushing and conveyor systems, MineHaul® software.

ÍNDICE

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	17
1.1. DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	18
1.1.1. Problema general.....	21
1.1.2. Problemas específicos	21
1.2. ANTECEDENTES	21
1.2.1. A nivel nacional:	22
1.2.2. A nivel internacional:	22
1.3. OBJETIVOS	24
1.3.1. Objetivo general	24
1.3.2. Objetivos específicos.....	24
1.4. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.....	24
1.5. HIPÓTESIS.....	26
1.5.1. Hipótesis general	26
1.5.2. Hipótesis específica.....	27
1.5.3. Variables.....	27
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	28
2.1. BASES TEÓRICAS.....	28
2.1.1. Ubicación del proyecto.....	28
2.1.2. Accesibilidad, clima, recursos locales, infraestructura y fisiografía.....	29

2.1.3.	Geología del yacimiento.....	32
2.1.4.	Tipo de yacimiento.....	33
2.1.5.	Zonación y alteración.....	34
2.1.6.	Mineralización.....	36
2.1.7.	Historia de las operaciones.....	38
2.1.8.	Método de minado.....	38
2.1.9.	Factores metalúrgicos.....	39
2.1.10.	Instalaciones de almacenamiento de desmonte.....	40
2.1.11.	Plan de minado.....	42
2.1.12.	Equipos mina.....	43
2.2.	DEFINICIÓN DE TÉRMINOS.....	44
2.2.1.	Sistema de pala-camión.....	45
2.2.2.	Sistema chancadora-fajas transportadoras.....	46
2.2.3.	Spreader.....	46
2.2.4.	Valor actual neto (VAN).....	47
2.2.5.	Tasa interna de retorno (TIR).....	48
2.2.6.	Plazo de recuperación de la inversión (PAYBACK).....	48
2.2.7.	Software MineHaul®.....	49
2.2.8.	Programación lineal.....	49

CAPÍTULO III: MÉTODO.....	50
3.1. TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN	50
3.1.1. Tipo de investigación	50
3.1.2. Diseño de investigación	50
3.1.3. Nivel de investigación.....	53
3.2. ÁMBITO TEMPORAL Y ESPACIAL	53
3.2.1. Ámbito temporal	53
3.2.2. Ámbito espacial.....	53
3.3. POBLACIÓN Y MUESTRA.....	54
3.3.1. La población.....	54
3.3.2. Muestra.....	54
3.4. INSTRUMENTOS.....	54
3.5. PROCEDIMIENTOS.....	55
3.6. ANÁLISIS DE DATOS.....	56
CAPÍTULO IV: RESULTADOS.....	58
4.1. PRESENTACIÓN DE LOS CASOS.....	58
4.2. PLAN DE MINADO E INFORMACIÓN BASE	59
4.3. CONFIGURACIÓN DE LOS PROYECTOS EN EL SOFTWARE MINEHAUL®	62

4.3.1. Datos de entrada requeridos para la simulación.....	62
4.3.2. Configuración del proyecto y carga del plan minero	63
4.4. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN.....	69
4.4.1. Caso Test.....	69
4.4.2. Caso A.....	72
4.4.3. Caso B	76
4.4.4. Caso C	80
4.5. ANÁLISIS DE LOS CASOS.....	83
4.5.1. Capex.....	83
4.5.2. Opex	86
4.5.3. Evaluación económica	88
4.5.4. Productividad de acarreo.....	93
CAPÍTULO V: DISCUSIÓN DE RESULTADOS	97
CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES	100
CAPÍTULO VII: RECOMENDACIONES.....	102
CAPÍTULO VIII: BIBLIOGRAFÍA	105
CAPÍTULO IX: ANEXOS	108

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Clasificación de minerales Antamina.	40
Tabla 2: Clasificación del desmonte Antamina.....	41
Tabla 3: Equipos principales Antamina 2019.	44
Tabla 4: Esquema de Diseño Experimental con posprueba únicamente, varios grupos y uno de Control.	51
Tabla 5: Ubicación del sistema de chancado para cada caso.	58
Tabla 6: Lista de Precios.	59
Tabla 7: Evaluación Económica - Caso Test.	71
Tabla 8: Resumen de acarreo - Caso Test.	72
Tabla 9: Evaluación económica – Caso A.	75
Tabla 10: Resumen de acarreo – Caso A	76
Tabla 11: Evaluación económica Caso B.....	79
Tabla 12: Resumen de acarreo. Caso B - Caso Test.	79
Tabla 13: Evaluación económica Caso C.....	82
Tabla 14: Resumen de acarreo Caso C.	82
Tabla 15: Compras de camiones Komatsu 980.....	84
Tabla 16: Inversión en compras de camiones.	84
Tabla 17: Resumen de Capex.....	85
Tabla 18: Resumen Opex del plan minero.	86
Tabla 19: Horas de acarreo total estimadas en MineHaul®.....	86
Tabla 20: Resumen de costo operativo de acarreo.....	87

Tabla 21: Tonelaje enviado por el sistema de chancado y fajas transportadoras de desmonte.	88
Tabla 22: Ingresos e impuestos del plan.	89
Tabla 23: Evaluación económica de los casos desarrollados. Resumen.	89
Tabla 24: Flujo de efectivo incremental. Caso A - Caso Test.	91
Tabla 25: Flujo de efectivo incremental. Caso B - Caso Test.	92
Tabla 26: Flujo de efectivo incremental. Caso C - Caso Test.	92
Tabla 27: Resumen de evaluación económica.	93
Tabla 28: Conclusiones de los casos evaluados.	101

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Distribución de los Costos - Operaciones Mina.	19
Figura 2: Concesiones mineras – Antamina.....	28
Figura 3: Ubicación de la mina y sus principales infraestructuras (WGS84).	29
Figura 4: Esquema de ubicación política del Yacimiento de Antamina, mineroducto y puerto.	31
Figura 5: Geología local de Antamina.	33
Figura 6: Litología y zonas metálicas.	34
Figura 7: Litología y mineralización.....	37
Figura 8: Esquema del Sistema Pala-Camión.	45
Figura 9: Spreaders en un botadero de desmonte.....	47
Figura 10: Diseño de las etapas de la metodología de la investigación.	52
Figura 11: Diagrama de flujo de la planificación iterativa de la mina.....	56
Figura 12: Movimiento total del plan minero.	60
Figura 13: Minado total del plan minero.....	60
Figura 14: Tasa de alimentación a planta.....	61
Figura 15: Desmonte total del plan minero.....	61
Figura 16: Plan de Producción *csv para MineHaul®.....	62
Figura 17: Topografía inicial y cortes de minado en formato *dxf para MineHaul®.	63
Figura 18: Configuración de Periodos, Fases y Materiales.....	64
Figura 19: Configuración de pendiente y camiones (velocidad, capacidad, disponibilidad y utilización).	64

Figura 20: Vista de Diseño MneHaul®.....	65
Figura 21: Red de rutas de acarreo y faja transportadoras en MineHaul®. Caso Test 2025. ..	66
Figura 22: Perfil de Camiones del Caso Test (Acarreo sólo camiones).....	67
Figura 23: Configuración de Fajas Transportadoras como Tipo de Ruta.	68
Figura 24: Simulación Caso Test periodo 2022.	69
Figura 25: Horas de acarreo total - Caso Test.	70
Figura 26: Productividad de camiones – Caso Test.	70
Figura 27: Simulación Caso A periodo 2022. Ubicación de la chancadora A y sus fajas transportadoras.....	73
Figura 28: Perfil de camiones. Caso A - Caso Test.	74
Figura 29: Productividad de camiones. Caso A - Caso Test.	74
Figura 30: Simulación Caso B periodo 2022. Ubicación de la chancadora y fajas transportadoras.....	77
Figura 31: Perfil de camiones. Caso B - Caso Test.....	77
Figura 32: Productividad de camiones. Caso B - Caso Test.	78
Figura 33: Simulación Caso C periodo 2022. Ubicación de la chancadora y fajas transportadoras.....	80
Figura 34: Perfil de camiones. Caso C – Caso Test.	81
Figura 35: Productividad de camiones. Caso C – Caso Test.	81
Figura 36: Perfil de camiones. Comparación de casos.	84
Figura 37: Resumen de Capex - Comparación.	85
Figura 38: Comparación del total de horas de acarreo estimadas.....	87

Figura 39: Resumen de Opex- Comparación.	88
Figura 40: Resumen de Flujo de Efectivo Neto - Comparación.	91
Figura 41: Resumen Valor Actual Neto - Comparación.	93
Figura 42: Productividad de acarreo - Comparación.	94
Figura 43: Distancia equivalente total - Comparación.	95
Figura 44: Tiempos de ciclo - Comparación.	95
Figura 45: Costo unitario de acarreo - Comparación.	96
Figura 46: Análisis de varianza para la productividad toneladas/kilómetro.hora	97
Figura 47: Análisis de varianza para costo de acarreo US\$/t.	98

LISTA DE ANEXOS

Anexo A: Plano de ubicación.....108

Anexo B: Plan de producción.....109

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

La tesis titulada “Optimización De La Productividad De Acarreo De Desmote Mediante Implementación De Fajas Transportadoras Y Chancadoras Utilizando La Simulación Con El Software MineHaul® En La Compañía Minera Antamina S.A.” se inicia con la búsqueda de alternativas para disminuir costos operativos de acarreo en la unidad minera Antamina; la importancia crítica de los costos de acarreo, que superan el 50% de los costos operativos de mina, motivan el desarrollo y estudio de métodos más productivos a menor costo mediante la inversión en innovación y avances tecnológicos.

En el Capítulo I se desarrolla el planteamiento del problema, justificación, objetivos e hipótesis de la investigación.

En el Capítulo II se desarrollan los antecedentes de la investigación, se describe las condiciones geográficas donde se realizó el estudio, la geología de la zona, restricciones, parámetros y componentes de la unidad minera, condiciones y características del sistema chancadora-fajas transportadoras.

En el Capítulo III se desarrolla la metodología que se aplicó para el trabajo de investigación, el tipo y nivel de investigación, las variables e indicadores utilizados, y la población y muestra del proyecto.

En el Capítulo IV se presentan los resultados de la investigación, la comprobación de la hipótesis y discusión de resultados con otros trabajos de investigación.

Finalmente, en los dos últimos capítulos se tienen las conclusiones y recomendaciones.

1.1. DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Las operaciones mineras día a día buscan optimizar sus procesos productivos, identificando las etapas críticas dentro de su flujo de producción, empleando soluciones innovadoras que logren incrementar la productividad de sus operaciones, muchas veces incentivando la creación e investigación de nuevas tecnologías.

El proceso de extracción de una mina a cielo abierto inicia con la perforación y voladura, para luego dar paso al carguío y acarreo del material, donde el mineral es llevado a la planta de procesos para su beneficio, mientras que el desmonte se descarga en los botaderos planificados. Este proceso se debe evaluar de forma holística para otorgar el mejor resultado combinado que sea posible, ya que cada etapa tiene efectos directos en las demás.

Se conoce que en minería a tajo abierto el costo más alto es el acarreo, debido a las dimensiones y cantidades necesarias de camiones que se necesiten según la producción de la unidad minera. Así mismo, involucra el consumo de llantas, repuestos y combustible, es por eso que el acarreo es un punto crítico en el proceso de producción (Darling, 2011). Los costos de acarreo para Antamina en el 2017 llegaron a superar el 50% de los costos operativos de la mina (ver Figura 1), por eso es necesario enfocarse en optimizar esta etapa fundamental del proceso.

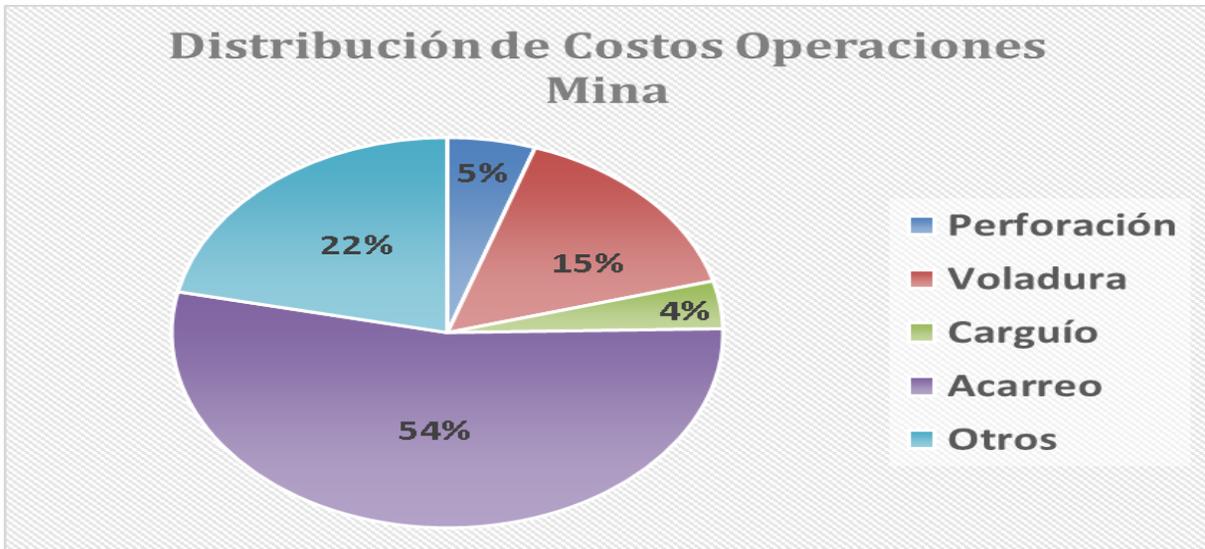


Figura 1: Distribución de los Costos - Operaciones Mina.

Elaboración propia en base a la Data Histórica Antamina 2017

A medida que la mina profundiza, al avanzar con las fases de producción e incrementar el material de desmonte que se envía a los botaderos disponibles los cuales incrementan su altura con el tiempo, provocan que las distancias de acarreo de los camiones se incrementen periodo a periodo (Darling, 2011), y si no se lleva un adecuado plan de acarreo puede significar picos altos en el perfil de camiones o incluso la disminución del tonelaje de mineral enviado a la planta si no se logra realizar el desbroce por limitación de camiones.

Optimizar la productividad de acarreo de material también tendría un impacto en la disponibilidad de los equipos, puesto que al tener rutas más cortas el mantenimiento de vías será realizado en menor tiempo y además mejorará la utilización de los equipos (Darling, 2011).

Hoy en día con los avances tecnológicos e innovadores métodos de extracción que podemos observar en minas importantes alrededor del mundo e incluso en nuestro país, muestran el uso de

sistemas de chancadoras y fajas transportadoras como parte del sistema de acarreo de material siendo una de las alternativas más rentables para la gran minería.

Optimizar el acarreo permitirá incrementar la producción de una operación minera sin la necesidad de comprar nueva flota de camiones, lo cual a su vez genera mejores condiciones de seguridad y menos congestión por la interacción de equipos en las rutas, aumentando la productividad de los equipos de carguío y acarreo.

Así mismo, el uso de chancadoras para el desmonte permitirá tener una mejor distribución del material chancado en el botadero optimizando la capacidad del diseño del botadero y su mantenimiento. La implementación del sistema chancadora – fajas transportadoras genera muchas oportunidades en la disminución del OPEX, incremento de productividad, reducción de emisión de gases contaminantes al ambiente como CO₂ y mayor seguridad en las operaciones (Ribeiro, 2013).

Todos estos aspectos positivos demuestran el importante valor que genera la implementación de estas nuevas tecnologías, sin embargo, los estudios y conocimientos al respecto de estas tecnologías que progresan continuamente son muy limitados y se requiere de un capital de inversión (CAPEX) muy alto para su construcción, preparación y desarrollo. Por lo tanto, debe de ser comprobada su rentabilidad mediante numerosos estudios y sensibilidades según las condiciones de cada proyecto minero.

En la Compañía Minera Antamina ubicada en Áncash, buscan aumentar la productividad de sus equipos y disminuir los costos operativos, para lograrlo se tiene la oportunidad de optimizar el acarreo mediante la implementación de sistemas de chancadoras y fajas transportadoras (CCS del

inglés Crusher and Conveyor System) que implica una inversión alta que depende de su ubicación y longitud de fajas, las mejoras que se proponen en este proyecto es la reducción de gastos en acarreo de desmante.

1.1.1. Problema general

- ¿Con la implementación de sistemas de chancado y fajas transportadoras se optimizará la productividad de acarreo de desmante en la Compañía Minera Antamina?

1.1.2. Problemas específicos

- ¿Cuál es la mejor ubicación operativa y económica para el sistema de chancado y fajas transportadoras en la Compañía Minera Antamina?
- ¿Es rentable el proyecto de implementación de chancado y fajas transportadoras para desmante en la Compañía Minera Antamina?

1.2. ANTECEDENTES

La innovación en tecnologías busca reducir los costos generando mayores ganancias, las chancadoras y fajas transportadoras además de disminuir el costo de acarreo nos dan la oportunidad de incrementar la seguridad de las operaciones y disminuir la emisión de gases contaminantes al medio ambiente, por supuesto, todo esto requiere de grandes inversiones que deben de ser sustentadas por estudios más detallados y por lo tanto más caros. En el Perú se han realizado estudios de optimización de acarreo con la implementación de fajas transportadoras y chancadoras, pero gran parte de estos son confidenciales por empresas importantes de la región ya que los costos que han tenido estas investigaciones son muy elevados, sin embargo, también hay estudios que buscan incrementar la productividad de acarreo comparando otras alternativas.

1.2.1. A nivel nacional:

Adolfo Merca (2008). Análisis de sistemas de extracción y planeamiento estratégico de profundización de mina, Universidad Nacional de Ingeniería (Perú); en la cual se muestra que el costo de transporte por volquetes en la mina Huarón del departamento de Pasco es de 3.8 \$/tm disminuye al implementar las fajas a 0.2 \$/tm. Dando como resultado un VAN de 4 430 340 US\$, TIR de 21% y el PAYBACK de 5 años.

Aarón Alhuay (2014). Optimización de flota de camiones para la alimentación a chancadora primaria, Universidad Nacional de Ingeniería (Perú); en el cual el autor desarrolla un modelo del sistema de carguío y acarreo de mineral a chancadora primaria en Antamina, además compara la productividad de los camiones Caterpillar 793F y Komatsu 930E en la operación.

El avance de las tecnologías abre camino a mejores alternativas en las operaciones a nivel mundial, internacionalmente esto se demuestra con la gran cantidad de estudios que se tienen acerca de la implementación de nuevos sistemas de acarreo con chancado y fajas transportadoras, estudios que demuestran que para una mejor minería es necesario que se incremente la investigación y aplicación de la tecnología minera.

1.2.2. A nivel internacional:

David Tutton, Willibald Streck (2009). The application of mobile in-pit crushing and conveying in large, hard rock open pit mines. In Mining Magazine Congress, Canada; en la que muestra la comparación directa de un sistema de transporte de 250kt / d en una rampa del 10% (con \$ 0.70 / l de combustible y \$ 0.10 / kWh de energía eléctrica) muestra que los costos totales de propiedad del transporte con camiones de 360t son \$ 0.18 / t.km en comparación con \$ 0.06 /t.km, con un

sistema de transporte con fajas transportadoras, es decir, una reducción de 77% entre el costo de acarreo con camión o con faja transportadora sin considerar los costos de la chancadora.

Jose Raimundo Lopes (2010). Viabilização técnica e econômica da lavra contínua de minério de ferro com o uso de sistema de britagem móvel “in pit” auto propelido, Universidade Federal de Ouro Preto (Brasil), en la que se obtiene una reducción en los costos de operación desde 0.68\$/TM en el caso convencional con camiones, hasta 0.26\$/TM en el caso con IPCCS (del inglés In-Pit Crusher Conveying System, lo cual significa Sistema de Chancado y Transporte por Fajas Dentro del Tajo) siendo la última 38% menos costoso.

Breno Gonçalves Cardozo Ribeiro (2013). Estudo de viabilidade econômica para a implantação de correias transportadoras de Rom de minério de ferro: estudo de caso da Mina Fábrica em Congonhas, Estado de Minas Gerais, Universidade Federal de Ouro Preto (Brasil), en la que demuestra que en la alternativa en que se implementa el sistema de chancado móvil y las fajas transportadoras se reduce la distancia media de acarreo en aproximadamente 4.7 km, y el costo operacional se reduce en US\$1.70/t.

Breno Gonçalves Cardozo Ribeiro, Wilson Trigueiro de Sousa & José Aurélio Medeiros da Luz (2016). Feasibility Project for implementation of conveyor belts in an iron ore mine. Study case: Fabrica Mine in Minas Gerais State, Brazil; Rem: Revista Escola de Minas, 69(1), 79-83 (Brasil); en la que se obtienen dos alternativas de implementación de chancadoras y fajas con VAN (Valor Actual Neto) descontado con respecto al valor del caso base con sólo camiones positivos, siendo la alternativa C la que presenta el mayor valor con un VAN descontado de US\$ 26,564,712, representando una reducción de 9 camiones disminuyendo sus costos operativos de 0.97 US\$/t

como el caso base con sólo camiones a 0.23 US\$/t para la alternativa C con un sistema de chancado móvil dentro del tajo con fajas transportadoras.

Nelson Banda (2016). Evaluation of two different mechanized earth moving technologies truck and shovel and IPCC for handling material from a large open pit mine using requisite design and operational conditions, efficiency, cost, skills and safety as criteria using sishen iron ore mine as a case study, University of Witwatersrand (Sudáfrica), en la que se obtuvo la disminución de los costos operativos de 11.41 ZAR/t a 7.97 ZAR/t con la implementación de sistemas de chancadoras móviles y fajas transportadoras, esto significa una disminución del 30%.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo general

- Optimizar la productividad de acarreo de desmonte implementando el sistema de chancado y fajas transportadoras de desmonte en la Compañía Minera Antamina.

1.3.2. Objetivos específicos

- Determinar la mejor ubicación para la chancadora y las fajas transportadoras que permitan disminuir los costos de acarreo en la Compañía Minera Antamina.
- Determinar la rentabilidad del proyecto de implementación de chancadora y fajas transportadoras de desmonte.

1.4. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

Geológica: La presencia de la mineralización y la necesidad de la profundización en la explotación provoca que las rutas de acarreo para los camiones sean mucho más largas, y en condiciones de mayor stripping ratio requiere de mayor capacidad de botaderos.

Geográfica: La geografía de las zonas mineralizadas tiene condiciones muy complicadas para el desarrollo de rutas con distancias cortas e incluso para la planificación de botaderos cercanos al pit.

Operativa: Operativamente es importante descongestionar las vías en el pit, Antamina actualmente cuenta con más de cien camiones de gran capacidad, esto genera congestión en las vías que terminan por disminuir la productividad de la operación, por lo tanto, la búsqueda de una alternativa ante el incremento de equipos es una necesidad considerando que las condiciones pronostican el incremento de equipos en los siguientes años.

Económica: El uso del sistema combinado chancadora – fajas transportadoras junto a condiciones favorables para los sistemas disminuyen el costo de acarreo frente al uso de sólo camiones. Además, el incremento de camiones en los siguientes años involucra un CAPEX que puede amortiguar el efecto de la inversión por los sistemas chancadoras-fajas.

Tecnológica: La tecnología minera sigue encontrando nuevas soluciones y mejores procedimientos de operación para mejorar los resultados en las operaciones mineras, la innovación e investigación realizada por Antamina le otorga un valor agregado en el mercado que demuestra al mundo su estabilidad y dedicación por buscar un mejor futuro.

Ambiental y seguridad: Las nuevas tecnologías otorgan una oportunidad de mejora en controles ambientales y seguridad en las operaciones, la implementación de fajas transportadoras detiene el incremento de camiones, disminuye el consumo de combustible, por lo tanto, disminuye la generación de CO₂. Además, al disminuir la congestión de las vías, disminuye la probabilidad de accidentes en las vías.

En la actualidad, la industria minera exige mayor productividad con costos reducidos en todos sus procesos productivos. Los sistemas combinados de chancadoras y fajas transportadoras son utilizados en operaciones mineras a nivel mundial, dando como resultado mayor rentabilidad, incremento de la productividad de los equipos, reducción de los costos operativos, reducción de la contaminación ambiental y mayor seguridad en las operaciones, sin embargo, la inversión requerida para su implementación es muy alta por lo cual requiere de estudios previos que generen confiabilidad en los inversionistas. El software MineHaul® ha sido modificado por el área de Planeamiento a Largo Plazo Antamina y la colaboración de Dave Carkeet, propietario del software, con los requisitos necesarios para la simulación del sistema de chancado y fajas transportadoras y el caso base de acarreo con sólo camiones para comparar los resultados de los diferentes casos. Sin embargo, Antamina tiene diversos tipos de materiales de desmonte y restricciones en los botaderos que no permiten la descarga de todos los tipos de desmonte en cualquier botadero, esta es una dificultad que el software aún no está diseñado para optimizar por sí sólo, por lo tanto, se plantea utilizar un modelo de transporte con programación lineal para complementar la configuración del software y obtener los mejores resultados cuando se simule con la implementación del sistema de chancado y fajas transportadoras.

1.5. HIPÓTESIS

1.5.1. Hipótesis general

- Con la implementación del sistema de chancado y fajas transportadoras incrementará la productividad del acarreo de desmonte en la Compañía Minera Antamina.

1.5.2. Hipótesis específica

- La mejor ubicación del sistema será la más cercana al pit o sus salidas, que permita disminuir mayor distancia equivalente de acarreo para camiones.
- El proyecto de implementación de chancadora y fajas transportadoras de desmonte será rentable para la mina Antamina si demuestra mejores condiciones técnicas, económicas y ambientales.

1.5.3. Variables

Variable independiente

- El sistema de chancado y fajas transportadoras

Definición operacional:

- Alternativas de ubicación del sistema A, B y C.
- Sin implementación del sistema (Testigo).

Indicadores:

- Longitud de Fajas Transportadoras (m).

Variable dependiente

- Productividad de acarreo de desmonte.

Indicadores:

- Productividad (t/h y t/km.hr).
- Costo de acarreo (\$/t).
- Costo de inversión (\$).
- Rentabilidad del proyecto de implementación (Indicadores financieros: VAN, TIR y PAYBACK).

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. BASES TEÓRICAS

2.1.1. Ubicación del proyecto

El depósito de Antamina se encuentra en los Andes centrales del norte de Perú, la mina está ubicada a aproximadamente $9^{\circ}32'17''$ S de latitud y $77^{\circ}03'51''$ W de longitud y 4.300 metros de altitud. Está a 270 kilómetros al norte de Lima y 103 kilómetros al este del Océano Pacífico y se encuentra en el lado este de la Cordillera Occidental en la parte superior de la cuenca del Río Marañón, un afluente del Amazonas. Todas las concesiones mineras están ubicadas en el distrito de San Marcos, provincia de Huari, departamento de Ancash (ver Figura 2, Antamina es el titular de las concesiones de color rojo). Para una mejor visualización de la ubicación del proyecto ver Figura 3, el plano de ubicación se encuentra en el Anexo A: Plano de ubicación.



Figura 2: Concesiones mineras – Antamina.

Fuente: GEOCATMIN.

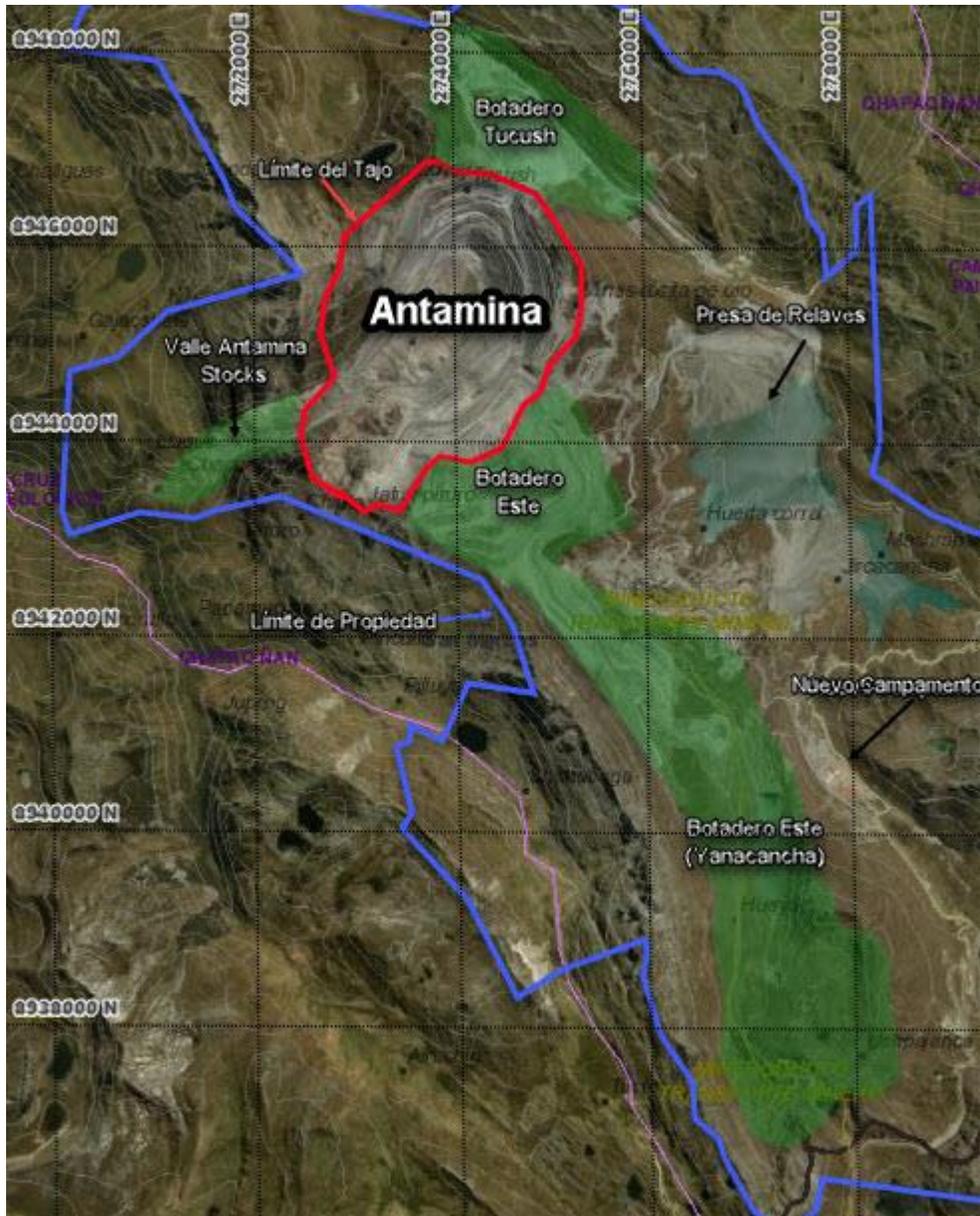


Figura 3: Ubicación de la mina y sus principales infraestructuras (WGS84).

Fuente: Elaboración propia en base a Estimated Mineral Reserves and Resources, Antamina Deposit, Perú S.A. 2010.

2.1.2. Accesibilidad, clima, recursos locales, infraestructura y fisiografía

La topografía en el área se caracteriza por crestas y picos de piedra caliza escarpados y afilados, generalmente a una altitud de 4.500 a 4.800 m, pero hasta un máximo de 5.073 metros. Hay valles

glaciares cortos con lagos y cañones y valles de ríos profundos y con pendientes. La cresta dominante y la tendencia de los valles es el noroeste, lo que refleja la estructura regional y tectónica con valles de tendencia noreste controlados estructuralmente más cortos. La vegetación está pobremente desarrollada y consiste predominantemente en el "ichu", que se utiliza principalmente para pasteo y en la construcción de refugios.

El acceso al sitio de la mina es por medio de una carretera, el camino de la mina se conecta con la carretera nacional 14 en el lago Condorcocha. La carretera 14 se conecta a la carretera panamericana y con la ciudad de Huaraz a través de la carretera nacional peruana 3N. El distrito más cercano al sitio de la mina es San Marcos, a 38 kilómetros por camino de tierra (ver Figura 4). Huaraz es la ciudad más cercana al sitio de la mina, 200 kilómetros por camino pavimentado o 156 kilómetros por camino de tierra parcial.



Figura 4: Esquema de ubicación política del Yacimiento de Antamina, mineroducto y puerto.

Fuente: Estimated Mineral Reserves and Resources, Antamina Deposit, Perú S.A. 2010.

Las temperaturas la zona de Antamina varían desde un máximo de 15.3 °C hasta un mínimo de 0.1 °C y la precipitación promedio es de 1.870 mm por año. Estas condiciones son apropiadas para realizar operaciones mineras durante todo el año. Las interrupciones ocasionales en las actividades mineras pueden deberse a fuertes tormentas eléctricas. (Lozada y Espinoza, 2010)

Sobre la base del actual Plan LOM (del inglés Life Of Mine, Vida de la Mina en español) de la Compañía Minera Antamina S.A., la fisiografía disponible es suficiente para la minería, disposición de relaves, depósitos de desmonte, procesamiento e infraestructura requerida.

2.1.3. Geología del yacimiento

2.1.3.1. Geología regional

El yacimiento se encuentra emplazado desde el Jurásico medio con la Formación Oyotún hasta el Cretácico Superior con la Formación Celendín y se ubica metalogénicamente en la cordillera occidental de los Andes Peruanos.

2.1.3.2. Geología local

El yacimiento de Antamina exclusivamente se ha dado en rocas carbonatadas de la Formación Jumasha y la Formación Celendín produciendo una zona de alteración denominada Skarn producto de la intrusión del pórfido cuarzo-monzonítico (ver Figura 5). (Lozada, 2010)

Además de acuerdo a los controles estructurales existen una serie de fallas normales con dirección NE transversales al sistema andino justo en el valle del yacimiento, y otras que son subparalelas pero que se caracterizan por ser fallas de sobre escurrimiento acompañados de pliegues con orientación NW.

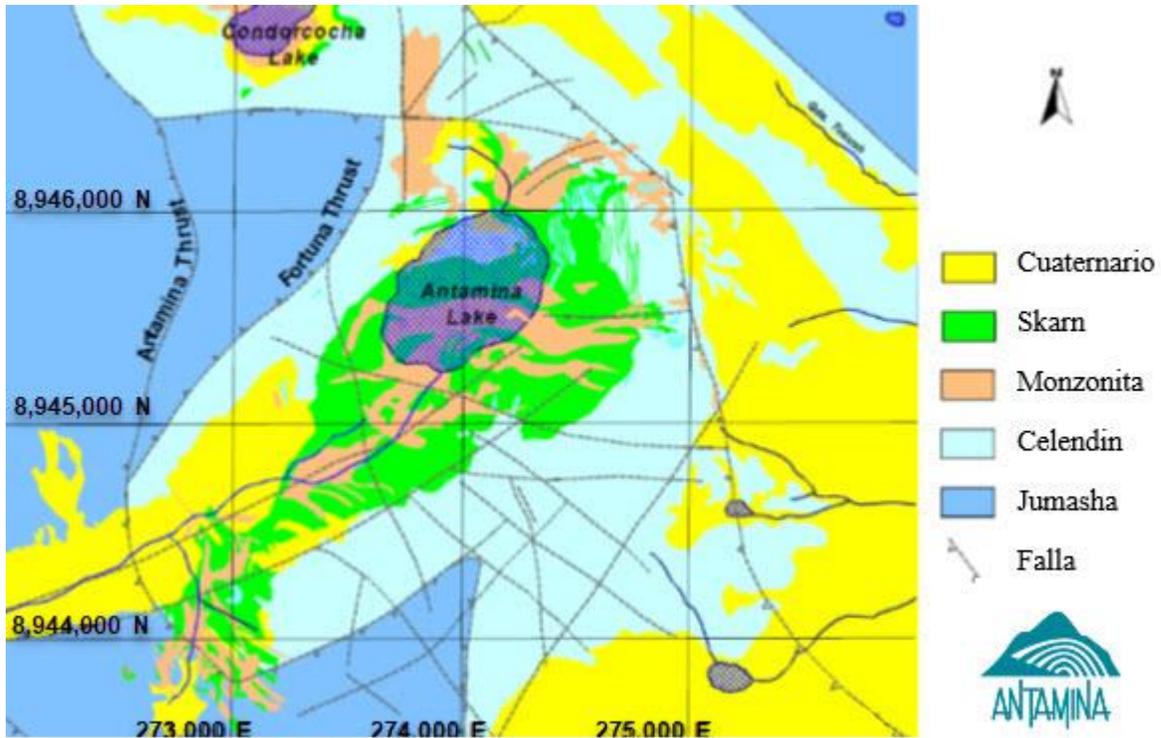


Figura 5: Geología local de Antamina.

Fuente: Estimated Mineral Reserves and Resources, Antamina Deposit, Perú S.A. 2010.

2.1.4. Tipo de yacimiento

Los intrusivos de Antamina datan de la deformación Quechua II del Mioceno medio que en su contacto con rocas calizas de las Formaciones Jumasha y Celendín han dado un yacimiento tipo Skarn. Su emplazamiento fue probablemente controlado por la reactivación de estructuras más antiguas, estando estas localizadas en parte de la inflexión del cinturón regional del Marañón. El núcleo de Antamina es un pórfido cuarzo-monzonítico, dónde hacia el contacto con el intrusivo (endoskarn) existe una zona de mayor concentración de Cu, y para lo zona más distal (exoskarn) la existencia de una zona más rica Zn-Ag y en menor medida Cu. (Lozada, 2010)

2.1.5. Zonación y alteración

La zonación general del Skarn se rige desde el núcleo intrusivo hacia fuera: En donde en el endoskarn están presentes el granate marrón o café y rosa, pero para el exoskarn el granate de color verde a marrón son los más abundantes y acompañados de una gran presencia de diópsido, wollastonita, hornfeles, mármol y en última instancia la roca caliza que no ha sido alterada. Además, la brecha heterolítica compuesta de todos los tipos Skarn puede ocurrir en cualquier tipo de litología (ver Figura 6).

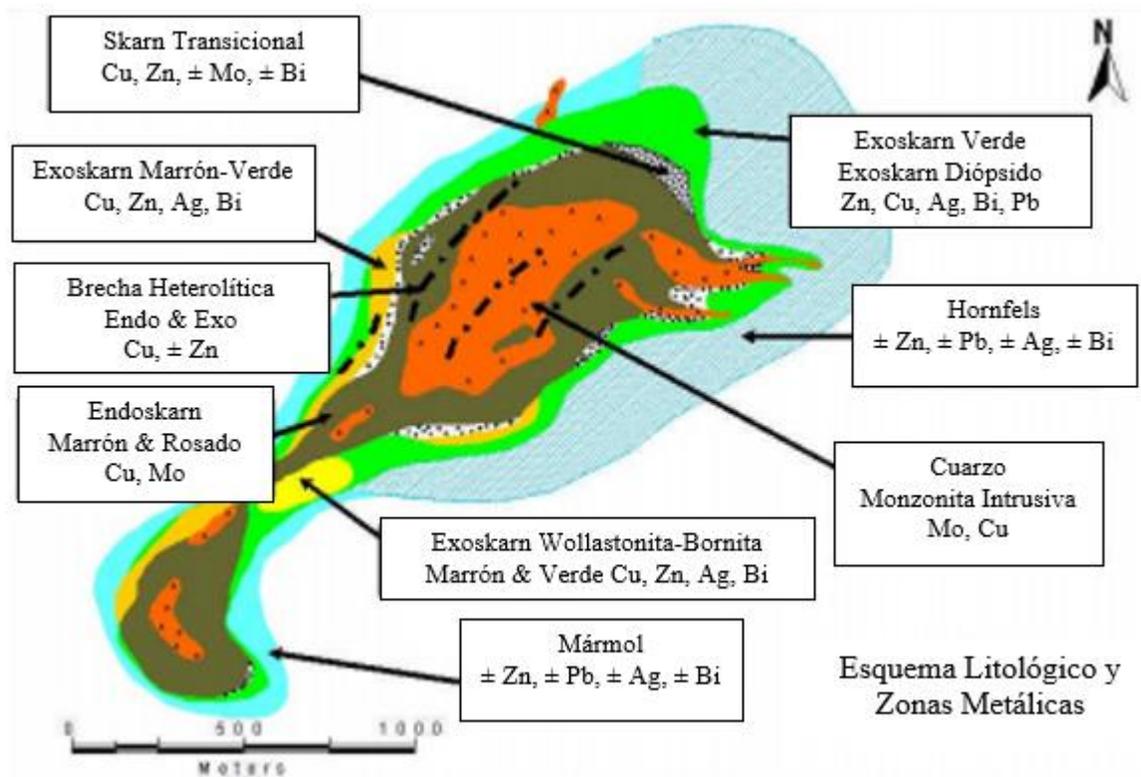


Figura 6: Litología y zonas metálicas.

Fuente: Estimated Mineral Reserves and Resources, Antamina Deposit, Perú S.A. 2010.

La mayor parte del Skarn es de tipo exoskarn, dominado por granates masivos. El halo de alteración del Skarn se divide en zonas concéntricamente desde granates marrones, a granates

verdes, luego la roca caliza alterada (Skarn en sí) con zonas de wollastonita y diópsido. (Lozada, 2010)

2.1.5.1.Endoskarn

Es reconocido por granates pseudomorfos al del pórfido, y por la presencia de reliquias de este. Dos tipos endoskarn se reconocen en el yacimiento de Antamina: Skarns con granates de color rosa de grano grueso, compuesto de una matriz de plagioclasa de color blanco lechoso, que contrasta con la matriz de color gris pálido a translúcido similar al pórfido inalterado; y Skarns con granates de color rosa oscuro de grano fino, comúnmente alojados en brechas que constituyen muchos de los cuerpos que cortan la roca intrusiva. (Lozada, 2010)

2.1.5.2.Skarn intermedio

Este tipo Skarn es la transición del endoskarn y el exoskarn, donde la generación de Skarn ha sido intensa y que comúnmente son de color marrón, de grano medio y de textura granular.

2.1.5.3.Exoskarn

En esta parte se reconocen dos colores de granates que contiene el exoskarn: Granates café o marrones los cuales están en menor proporción, aparentemente forman la zona más interna de exoskarn haciendo una especie de anillo con el endoskarn; y los granates verdes que constituye la mayor parte del depósito, que se producen junto a mármol o hornfels, estos se han formado por dos caminos de reacción diferentes uno a través de Skarn rico en wollastonita y el otro por reemplazamiento directo de calcita. Cabe resaltar que ambos granates son masivos, predominantemente compuestos por grosularia entre 0% y 28% y Andradita 72% a 100%. Además, en el exoskarn existen tres minerales dominantes así se tiene la magnetita la cual es relativamente temprana, y se corta por venillas de calcopirita; la wollastonita produciéndose en mayor medida

en la parte SE del depósito; y el Diópsido que forma el exoskarn más exterior, y se encuentra predominantemente en los flancos norte y este del depósito. (Lozada, 2010)

Los Hornfels también están presentes, estos son rocas de grano muy fino y están en los márgenes del depósito producto del metamorfismo térmico; las brechas comúnmente están en el contacto intrusivo – endoskarn y se distinguen un tipo de brechas muy dominante llamadas brechas heterolíticas caracterizadas por poseer componentes de todas las rocas que cortan.

Un actuante preponderante para la formación del depósito como yacimiento económico, ha sido la alteración retrógrada actuando en mayor parte en el endoskarn y caracterizándose por poseer minerales como clorita, epidota, actinolita, cuarzo, calcita, sericita y arcilla. (Lozada, 2010)

2.1.6. Mineralización

En la mineralización más del 90% de la Skarn está mineralizado con cantidades significativas de Cu y con cantidades menores de Zn, Ag y Mo. Aquí el Cu está asociado con granates rojo-marrón en el endoskarn y los promedios de zinc oscilan alrededor 2% en la zona exterior dominada por granates verdes. Con respecto a la mineralización de sulfuros (calcopirita, pirita, bornita, esfalerita, galena y molibdenita) estos están presente en tres formas: intersticiales a los cristales de granate, en zonas de sulfuros masivos, que son irregulares en forma y tamaño, que van desde unos pocos centímetros hasta 10 m de espesor y por último en venillas transversales; esta mineralización se ha depositado en dos etapas principales, la primera es la etapa prógrada, en donde los minerales de sulfuro van acompañados por calcita como adiciones menores; y la segunda es la etapa retrógrada en donde los sulfuros dominantes de pirita y calcopirita han sido componente importante para mineralización. (Lozada, 2010)

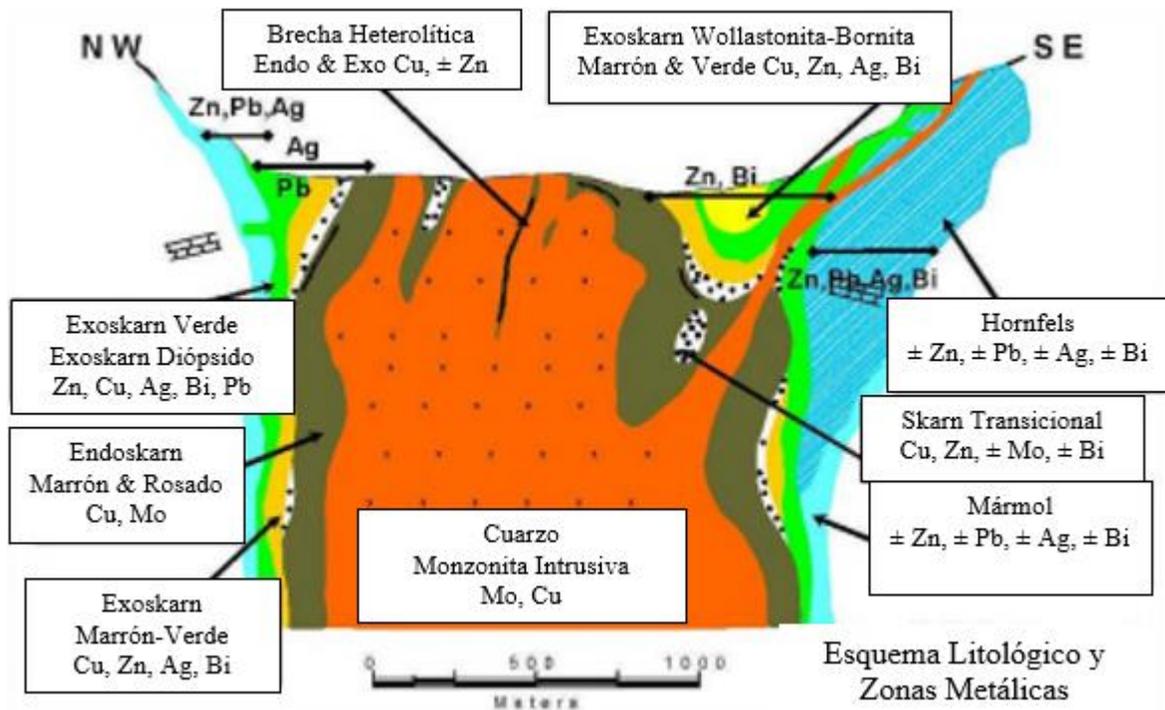


Figura 7: Litología y mineralización.

Fuente: Estimated Mineral Reserves and Resources, Antamina Deposit, Perú S.A. 2010.

Las asociaciones minerales principales en el yacimiento son:

Calcopirita, está se formó en estadios tempranos de mineralización, y se distribuye en todo el endoskarn y exoskarn y que esta como la zona principal rica en cobre, coincidiendo con el granate marrón proximal.

Bornita, la cual está restringido principalmente al Skarn rico en wollastonita y localmente en las secciones exteriores adyacentes del Skarn rico en granates verdes.

Esfalerita, asociados a los granates y piroxenos típico de los Skarns ricos en Zn ubicados en las partes más distales de la intrusión.

2.1.7. Historia de las operaciones

Varias empresas realizaron actividades de exploración, como Northern Perú Copper (1925), Cerro de Pasco Corporation (1952-1970), Minero Perú, GEOMIN, Rio Algom Limited (RAL) e Inmet Mining Corporation (IMC) hasta 1996.

En 1999, la propiedad se modificó y el porcentaje de propiedad fue 33.75% RAL (ahora BHP), 33.75% NORANDA (ahora Glencore), 22.5% Teck y 10% MITSUBISHI.

Las operaciones mineras comenzaron a prueba el 28 de mayo de 2001, y la producción comercial se logró el 1 de octubre de 2001. En 2002, fue el primer año completo de operación, la producción de la planta promedió aproximadamente 72 ktpd, aumentando a 85 ktpd en 2004 y 92 ktpd en 2009. Después de la finalización del Proyecto de Expansión de Antamina (PEA) en 2011, el rendimiento se elevó a un valor nominal de 130 ktpd.

Desde 2015, donde la producción de mineral alcanzó picos de 154 ktpd, el rendimiento del molino se ha dirigido a 145 ktpd. La tasa de procesamiento promedio en los 4 años anteriores (2015 a 2018) se ha registrado en 143.1 ktpd. (Mamani, 2018)

2.1.8. Método de minado

Antamina es una gran operación a cielo abierto, que está siendo operada como una mina de Cu típica que usa equipo de minería estándar. La longitud actual del pit es de aproximadamente 3.3 km, y el ancho de la fosa es de 2.4 km. La profundidad del pit es de 855 m (contados desde el primer banco de la fase 9 hasta el fondo de la fase 5).

El diseño final del pit considera dos restricciones activas: la capacidad de los relaves y la ubicación de la chancadora. El pit final está totalmente contenido dentro del pit óptimo con un

factor de ingreso (RF: Revenue Factor) de 1.00. En realidad, la cáscara del pit con RF de 0,63 fue la que se usó como referencia para el diseño del pit.

Los parámetros de diseño de la mina son los siguientes:

- Altura del banco: 15 m.
- Ancho mínimo de minado: 80 m.
- Pendiente de rampa: 10%
- Berma geotécnica: 30 m.
- Ancho de rampa: 40 m.

Todos los parámetros cumplen las especificaciones técnicas de los equipos disponibles y las normas de seguridad según el DECRETO SUPREMO-N° 024-2016-EM.

2.1.9. Factores metalúrgicos

Las ecuaciones metalúrgicas son específicas para cada uno de los tipos de mineral geometalúrgico que procesa Antamina. En total, hay ocho tipos de mineral diferentes basados en Cu, Zn y contenido de elementos perjudiciales.

Los minerales se procesan en la planta sobre una base de campaña; los minerales de calcopirita Cu, minerales de Cu-Zn y Cu bornita no se mezclan, sino que se separan durante la extracción y el procesamiento. Esto significa que parte del mineral se envía a los stocks dinámicos y luego se vuelve a manipular a la trituradora primaria. Estas campañas van desde un número de días hasta un mes entero, dependiendo del desarrollo del mineral y los requisitos de comercialización del concentrado.

La clasificación de minerales en Antamina se puede ver en la Tabla 1.

Tabla 1: Clasificación de minerales Antamina.

TIPO	CU (%)	ZN (%)	BI/CU	CLASIFICACIÓN
M1	>= 0.1	< 0.6	< 9.4	Calcopirita Cu mineral con bajo Bi
M2	>= 0.1	< 0.6	>= 9.4 Y < 35.3	Calcopirita Cu mineral con alto Bi
M2A	>= 0.2	< 0.5	>= 35.3	Calcopirita Cu mineral con muy alto Bi
M2AT	>= 0.2	< 0.5	>= 35.3	Mineral Transicional de Cu
M5	>= 0.2	< 0.5	-	Mineral de Bornita con bajo Zn
M6	>= 0.2	< 0.5	-	Mineral de Bornita con alto Zn
M4B	>= 0.1	< 0.5	-	Mineral de Cu-Zn
M4BT	>= 0.2	< 0.5	-	Mineral Transicional de Cu-Zn

Fuente: Compañía Minera Antamina S.A.

Los minerales M1, M2 y M2A producen principalmente concentrados de Cu y Mo. M4B produce principalmente concentrados de Cu y Zn. Tanto M5 como M6 son minerales de bornita, mientras que el mineral de M5 solo produce concentrados de bornita de Cu, el mineral de M6 produce concentrado de bornita de Cu y Zn. Tanto M2AT como M4BT son variantes en M2A y M4B, respectivamente (el sufijo "T" significa Transicional), se ubican entre calcopirita y bornita, y se modelan en base a un indicador de óxido.

Como resumen, Antamina produce los siguientes cinco concentrados diferentes:

- Un concentrado de Calcopirita Cu
- Un concentrado de Bornita Cu.
- Un concentrado de Zn.
- Un concentrado de Mo
- Un concentrado de Pb-Bi.

2.1.10. Instalaciones de almacenamiento de desmonte

El desmonte se caracteriza como se muestra en la tabla y está segregado a los vertederos apropiados (ver Tabla 2).

Tabla 2: Clasificación del desmonte Antamina.

Tipo	CuAc/Cu	Zn (%)	As (ppm)	Tipo de Roca	Clasificación
A	< 0.4	>= 0.15	>= 400	-	Reactivo
AOx	>= 0.4	>= 0.15	>= 400	-	Óxido Reactivo
B	-	>= 0.07 y < 0.15	< 400	10 - 14*	Med Reactivo
C	-	< 0.07	< 400	10 - 14	Limpio

(*) Estos son mármol, hornfel y piedra caliza.

Fuente: Compañía Minera Antamina S.A.

Los principales botaderos son Yanacancha Dump (que es una extensión del original East Dump) y Tucush Dump. Ambos están totalmente aprobados por el gobierno, la administración de Antamina y los accionistas.

El primero se encuentra en el sureste del pit, cerca de la planta concentradora y el depósito de relaves. Este botadero está diseñado para contener residuos reactivos; por lo tanto, puede almacenar todos los tipos de residuos: A, B, C. Este botadero no tiene capacidad limitada y puede ampliarse si es necesario.

El último, Tucush, está ubicado al noreste del pit y está diseñado para contener solo roca moderadamente reactiva y limpia; es decir, solo los tipos B o C.

La capacidad total aprobada para los botaderos de desmonte Yanacancha y Tucush es de 3.052 Mt y 931 Mt, respectivamente. A fines de 2018, había aproximadamente 2,097 Mt de roca estéril rellena en los vertederos, dada una capacidad de aprobación restante de 1,885 Mt. Incluyendo la gestión de residuos dentro de los límites del pit, el plan de la mina LOM 2019 - Reserva de mineral produjo un total de 1,243 Mt de roca de enviado al botadero; es decir, la capacidad restante es más que suficiente para acomodar todo el material de desmonte.

Además, el Departamento de Planificación de Minas y Geotecnia ha realizado varios trabajos de optimización, que permiten aumentar la capacidad de descarga restante hasta 2010 Mt dentro de la misma huella de aprobación.

Las operaciones de Antamina utilizan dos tipos de stockpiles: stocks de alta y baja ley. El primero se utiliza para fines de mezcla y para administrar campañas de mineral; tiene una capacidad aproximada de 3 Mt de mineral y se ubica en el valle de Antamina, en el sudoeste del pit. Este último se utiliza para habilitar una política de corte variable, que proporciona espacio para almacenar mineral no procesado para el potencial futuro.

2.1.11. Plan de minado

Los principales insumos para el programa de producción están relacionados con las tasas de extracción y procesamiento. En primer lugar, la tasa de extracción de aproximadamente 290 Mt / a está determinada por:

Restricciones mineras:

- Máxima tasa de hundimiento de 8 bancos por año.
- Rendimiento, disponibilidad y utilización de los equipos de la mina.
- Área dentro del banco minero

Segundo, la tasa de procesamiento de 145,000 t / d está limitada por:

- Tasa de procesamiento variable para cada tipo de mineral.
- Disponibilidad y utilización general de la planta (esto incluye la trituradora primaria)
- Alimentación mínima a planta por dos días por campaña concentradora.

2.1.12. Equipos mina

El equipo de minería utilizado en Antamina es el estándar de la industria y se puede describir de la siguiente manera:

La perforación se realiza con grandes taladros rotativos, y la voladura utiliza explosivos a granel, detonadores electrónicos y demoras. También hay taladros de tamaño mediano y pequeño para ayudar con el control de la pared y las áreas de amortiguamiento.

El equipo de carga comprende una pala eléctrica, una pala hidráulica y un cargador frontal. Se planea aumentar la pala hidráulica para aumentar la capacidad de carga debido al aumento del material de desecho y reemplazar el cargador frontal 994 cuando quede obsoleto. Las palas eléctricas de cable se utilizan para la producción primaria de la mina, mientras que las palas hidráulicas y los cargadores se utilizan para volver a manejar un trabajo secundario.

La flota de camiones principal es Komatsu 930, que actualmente consta de 92 unidades. Originalmente, Antamina opera con camiones Caterpillar 793, pero estos fueron reemplazados por camiones más grandes cuando alcanzaron su vida útil. Recientemente, Antamina probó e incorporó dos camiones Komatsu 980. También existe la necesidad de aumentar la flota de camiones Komatsu, principalmente debido a una mayor distancia de transporte de desmonte.

Se planea aumentar el tamaño de la flota para el equipo de producción de la mina primaria de acuerdo con el plan de la mina.

Tabla 3: Equipos principales Antamina 2019.

Tipo	Modelo	Capacidad Nominal	Unidades
			2019
Perforadora	Bucyrus 49HR/RIII	351mm	13
Perforadora	DMM2/D75KF	211mm	2
Perforadora	ROC/T600	127mm	7
Pala Eléctrica	P&H 4100 XPC	56m ³	7
Pala Hidráulica	HITACHI EX5600	29m ³	4
Cargador Frontal	CAT 994	18m ³	2
Camión	CAT 793	226t	11
Camión	Komatsu 930E	290t	92
Camión	Komatsu 980E	370t	2

Fuente: Compañía Minera Antamina S.A.

Antamina es una operación madura con un historial de desempeño exitoso. Los trabajos iniciales de desarrollo de la mina comenzaron en 1999 y la producción comercial comenzó en 2001.

El plan de la mina es el resultado de un proceso de planificación sólido y bien establecido que se realiza anualmente, y toda la organización está involucrada en él. Todas las entradas para el plan de la mina están firmadas por el gerente del proceso, el vicepresidente de operaciones y el presidente de Antamina. El plan de la mina se ha desarrollado adecuadamente para maximizar las eficiencias de la minería y se basa en el conocimiento actual de información geotécnica, hidrológica, minera y de procesamiento.

El método de minería a cielo abierto demostró ser susceptible al gran depósito de skarn de Antamina. El equipo de la mina está básicamente en su lugar; solo se necesita una flota de camiones para aumentar debido al aumento esperado de la distancia de transporte.

2.2. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS

Para mejor comprensión de la presente investigación se consideró los términos más importantes.

2.2.1. Sistema de pala-camión

Los cargadores y camiones mueven más material que todos los demás sistemas de excavación combinados. Los factores decisivos en la selección de este sistema son típicamente las características cualitativas de la flexibilidad y la probabilidad de alcanzar los objetivos de producción y costo.

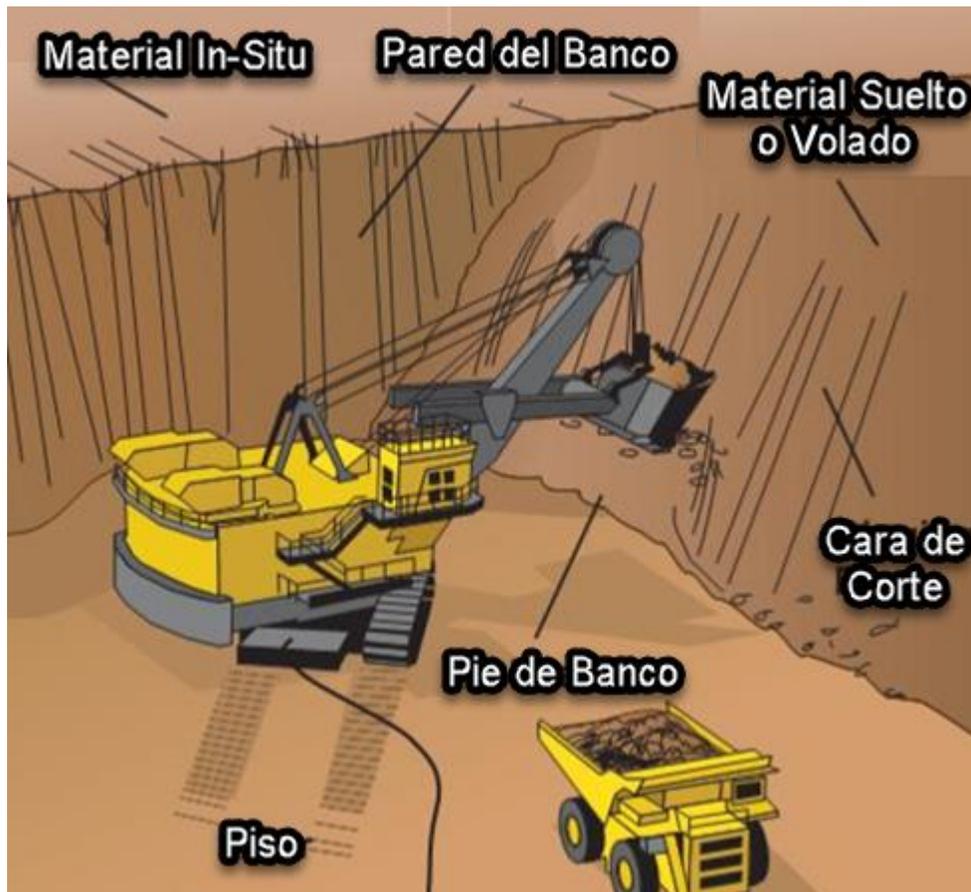


Figura 8: Esquema del Sistema Pala-Camión.

Fuente: Peak Performance Practices (P&H, 2006)

Cargadores y camiones sobresalen en flexibilidad. No están limitados dimensionalmente por el método de operación, por lo que son capaces de moverse en cualquier dirección a cualquier distancia. Por lo tanto, pueden trabajar en geologías y terrenos restringidos o irregulares, y pueden

incrementarse gradualmente, lo que los hace virtualmente la única opción para su uso en minas de pozo muy profundo. Su flexibilidad también permite que una operación minera se adapte rápidamente a los cambios en los precios de los metales, geología y otras influencias que hacen que el plan original de la mina cambie, como inevitablemente lo hace.

Además, el sistema puede operar a través de una amplia gama de geologías y climas. Todo esto proporciona un sistema confiable con poca variación impredecible en eficiencia, producción o costo.

A efectos de comparación, el sistema de carga y transporte es un sistema de bajo costo de capital, alto costo de operación que es muy flexible y puede operar a través de una amplia gama de aplicaciones con baja sensibilidad a la variación geológica. (Darling, 2011, p. 912)

2.2.2. Sistema chancadora-fajas transportadoras

Este sistema utiliza una unidad chancadora/clasificadora para procesar material desde una tolva hasta un tamaño que es adecuado para la faja transportadora, extendiendo los sistemas de fajas alrededor del tajo para incluir el desmonte o mineral.

A efectos de comparación, el sistema es de alto costo de capital y bajo costo operativo que tiene una flexibilidad limitada y puede operar a través de un rango limitado de aplicaciones con sensibilidad moderada a la variación geológica. (Darling, 2011, p. 928)

2.2.3. Spreader

Este equipo recibe el material que viene de los transportadores continuos para depositar en la pila de estéril. Está montado sobre orugas, circula en forma ascendente y descendente en la pila de estéril, conformando la misma. Recibe y descarga el estéril en la pila. (Ribeiro, 2013, p. 26)

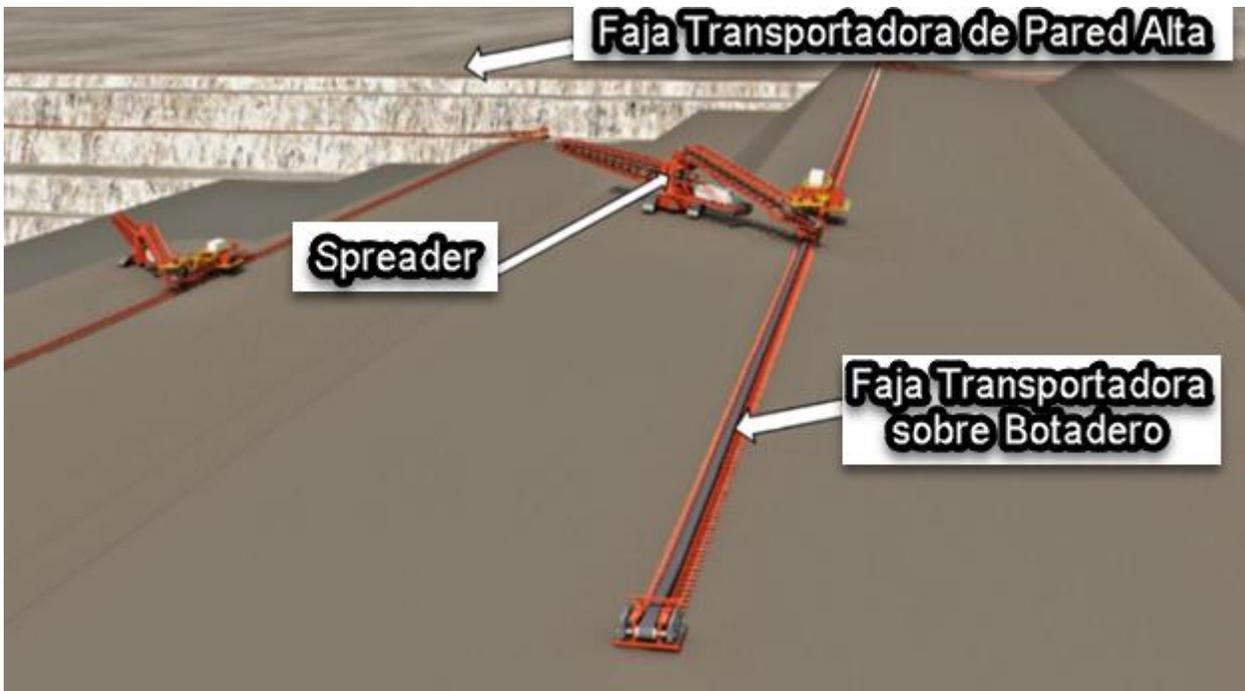


Figura 9: Spreaders en un botadero de desmonte.

Fuente: Sishen Mine IPCC Review Scoping Study- In-pit Waste Crushing and Conveying, 2008

2.2.4. Valor actual neto (VAN)

El Valor Actual Neto de un proyecto es el valor actual/presente de los flujos de efectivo netos de una propuesta, entendiéndose por flujos de efectivo netos la diferencia entre los ingresos periódicos y los egresos periódicos. Para actualizar esos flujos netos se utiliza una tasa de descuento denominada tasa de expectativa o alternativa/oportunidad, que es una medida de la rentabilidad mínima exigida por el proyecto que permite recuperar la inversión, cubrir los costos y obtener beneficios.

Para su cálculo se utiliza la siguiente ecuación:

$$VAN = \left[\sum_{t=1}^n FE(t) * (1 + i)^{(0-t)} \right] + I(0)$$

Ecuación [1]: Fórmula de Valor Actual Neto (Mete, 2013)

Donde:

- VAN: Valor Actual Neto
- FE(t): flujo de efectivo neto del período t
- I: tasa de expectativa o alternativa/oportunidad
- N: número de períodos de vida útil del proyecto
- I(0): inversión inicial (neta de ingresos y otros egresos)

(Mete, 2013)

2.2.5. Tasa interna de retorno (TIR)

Se define como la tasa de descuento que iguala el valor presente de los egresos. Es la tasa de interés que, utilizada en el cálculo del Valor Actual Neto, hace que este sea igual a 0 (Mete, 2013).

$$\sum_{t=0}^n \frac{FE}{(1 + TIR)^t} = VAN = 0$$

Ecuación [2]: Fórmula de Tasa Interna de Retorno (Mete, 2013)

2.2.6. Plazo de recuperación de la inversión (PAYBACK)

Según Cruz, Urrutia & Medina (como se citó en Reyes, 2017) por medio del payback sabemos el número de periodos (normalmente años) que se tarda en recuperar el dinero desembolsado al comienzo de una inversión.

2.2.7. Software MineHaul®

MineHaul, es un software de simulación que permite estimar la dimensión de flota de transporte requerida para un plan de producción definido, dando la posibilidad de realizar diseños gráficos de rutas y estimando las distancias menores entre las alternativas presentadas. (Percca, 2016, p. 5)

2.2.8. Programación lineal

La Programación Lineal es una técnica que trata de la resolución de problemas de carácter lineal, en donde se trata de optimizar, ya sea maximizando o minimizando una función lineal, llamada “objetivo” y que está sujeta a una serie de restricciones representadas por inecuaciones lineales y cuyas variables, que representan las incógnitas del problema, sólo puede tener valores positivos. (Munier, 2011, p. 16)

CAPÍTULO III: MÉTODO

3.1. TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN

3.1.1. Tipo de investigación

Según la finalidad del presente trabajo es una investigación de tipo aplicada, puesto que, busca solucionar de forma práctica un problema como es el incremento de la productividad de acarreo de desmonte mediante la implementación de un nuevo sistema de acarreo.

Según el método de manipulación de datos es de enfoque cuantitativo, debido a que, para lograr los objetivos del trabajo, se inició con la recolección y análisis de los datos obtenidos por las simulaciones en el software MineHaul®, para analizar el comportamiento de las variables propuestas.

3.1.2. Diseño de investigación

El diseño de investigación para este trabajo es experimental con posprueba únicamente, varios grupos y uno de control, porque los datos de entrada serán los mismos para cada simulación, considerando una posprueba que mantiene el sistema convencional de acarreo (grupo de control), mientras que en los otros grupos se aplica el tratamiento que involucra la implementación del nuevo sistema de acarreo y la variable de su ubicación para realizar la comparación de sus productividades (Hernández, Fernández y Baptista,2006). El esquema de este diseño en la Tabla 4.

Tabla 4: Esquema de Diseño Experimental con posprueba únicamente, varios grupos y uno de Control.

GE ₁	X ₁ (Implementación Sistema con Ubicación A)	O ₁
GE ₂	X ₂ (Implementación Sistema con Ubicación B)	O ₂
GE ₃	X ₃ (Implementación Sistema con Ubicación C)	O ₃
GE ₄	--- (Sin implementación)	O ₄

Fuente: Elaboración Propia en base a la Metodología de la Investigación de Hernandez, R., Fernandez, C. y Baptista, 2010

Dónde

GE : Grupo Experimental

X : Tratamiento Experimental

O : Post test

Los tres primeros grupos muestran el tratamiento que recibirá la variable independiente, mientras que el cuarto grupo es el grupo de control o testigo (Hernández, Fernández y Baptista,2010).

El diseño de las etapas de la metodología de la investigación utilizada se detalla en la Figura 10.



Figura 10: Diseño de las etapas de la metodología de la investigación.

Fuente: Elaboración Propia en base a la Metodología de la Investigación de Hernandez, R., Fernandez, C. y Baptista, 2010

3.1.3. Nivel de investigación

El nivel de la investigación es experimental y aplicativo porque responde a las preguntas:

¿Qué cambios y modificaciones se han producido?, ¿qué mejoras se han logrado?, ¿cuál es la eficiencia del nuevo sistema?, etc.

En este nivel se aplica un nuevo sistema, modelo, tratamiento, programa, método o técnicas para mejorar y corregir la situación problemática, que ha dado origen al estudio de investigación. (Alfaro, 2012)

3.2. ÁMBITO TEMPORAL Y ESPACIAL

3.2.1. Ámbito temporal

El estudio se refiere esencialmente al análisis productivo y evaluación financiera de la simulación por implementación de fajas transportadoras en el proceso de minado, específicamente en el acarreo de desmonte. El periodo considerado es una proyección desde el año 2020 considerando información actual en base a la data histórica, hasta el año 2036 que muestra los resultados de la simulación en base a los objetivos y restricciones del plan de minado.

3.2.2. Ámbito espacial

El análisis se encuentra enfocado a la situación presente respecto al yacimiento polimetálico de Antamina (Compañía Minera Antamina S.A.), el cual se encuentra en el Distrito San Marcos, Provincia Huari de la Región Áncash, ubicado en el ámbito nacional y que también se puede considerar para investigaciones internacionales que presenten condiciones geográficas, geológicas y operativas similares al yacimiento en estudio.

3.3. POBLACIÓN Y MUESTRA

3.3.1. La población

La población fueron los resultados de las simulaciones de acarreo MineHaul®, tonelajes asociados en origen-destino-período, parámetros operacionales para cada ruta, distancias, tiempos, cantidad de equipos, tonelajes por botadero, congestión y materiales.

3.3.2. Muestra

La muestra fueron los resultados filtrados desde el periodo 2020 hasta el 2036.

3.4. INSTRUMENTOS

Los datos de entrada para le MineHaul® como es el plan de minado, las fases, la topografía, la flota de equipos, las velocidades, tiempos fijos por destino y origen, botaderos disponibles y las restricciones fueron obtenidas de los inputs del proceso de Planeamiento de la Vida de la Mina Antamina. Todos los datos fueron entregados por las áreas involucradas en la operación, información obtenida de la data histórica de Antamina (Sistema Dispatch).

Tras realizar la simulación, MineHaul® nos permite exportar todos los resultados de los cálculos realizados por el programa, todos cuantificables, separa cada tipo de material de una fase y banco en determinado periodo con un destino definido, permitiendo cuantificar las distancias, tiempos fijos y tiempos en ruta cargados o vacíos.

La distancia de las fajas depende de la ubicación de la chancadora, según la alternativa se calculará la distancia por la topografía.

Los costos han sido obtenidos por la tendencia de la data histórica y por benchmarking con otros estudios que han evaluado la implementación de fajas transportadoras.

3.5. PROCEDIMIENTOS

La confiabilidad de los datos de entrada para el plan minero de Antamina es casi completa debido a que se obtienen de la revisión previa de cada área antes de realizar la entrega formal de sus factores. El plan de minado y el modelo de recursos utilizado fue aprobado por el área de Planeamiento de Largo Plazo por lo tanto hay confiabilidad en ambos instrumentos.

El método e instrumentos utilizados están corroborados por el proceso estándar de planeamiento según Runge (1998), que para esta investigación nos enfocamos en tres etapas: Equipamiento Mina, Calendario Mina y Costos Mina (ver Figura 11).

El software MineHaul® para la simulación de acarreo, actualmente está autorizado por Antamina para sus evaluaciones de proyectos y planificación minera, puesto que es una herramienta personalizada con los requerimientos que se consideran imprescindibles para cada proceso, el software es revisado anualmente por Dave Carkeet (creador del software) y el personal de Antamina.

Los supuestos para los costos del proyecto de implementación serán comparados con estudios previos similares a esta investigación.

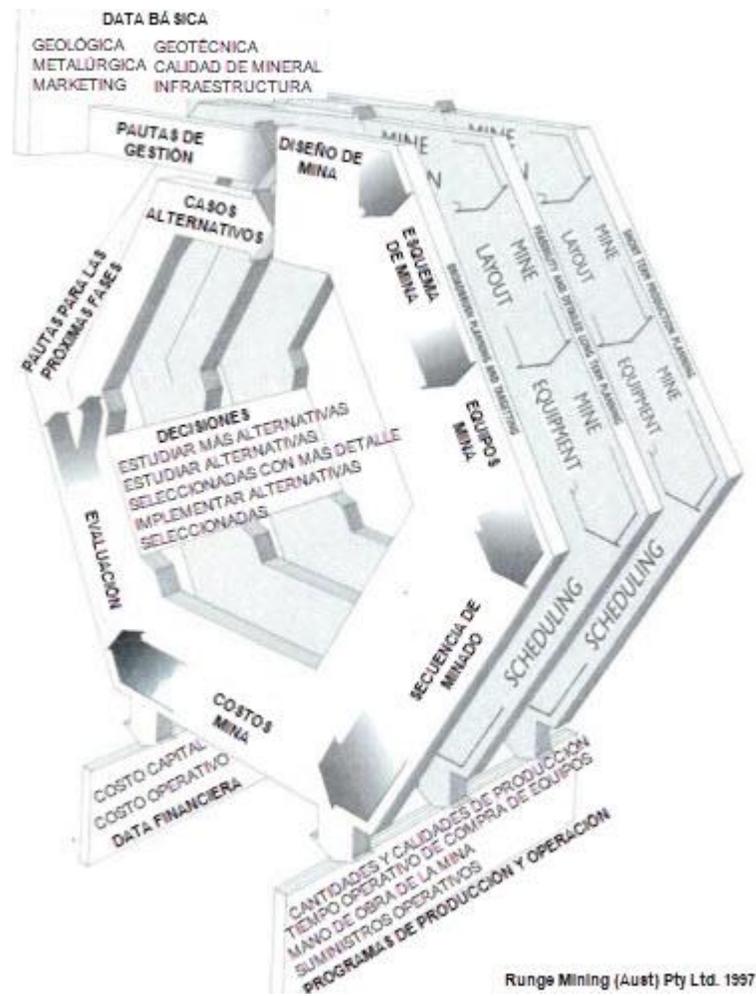


Figura 11: Diagrama de flujo de la planificación iterativa de la mina.

Fuente: Mining economics and strategy. SME.

3.6. ANÁLISIS DE DATOS

Se hará uso de técnicas estadísticas descriptivas e inferenciales, además del uso de las herramientas financieras como son el VAN, TIR y PAYBACK. Los cálculos y comparaciones se realizarán en el programa Excel mediante gráficos y tablas que compararán los diferentes casos y sus efectos en cada variable.

También se propondrá un modelo de transporte por programación lineal que permitirá optimizar la simulación de las fajas transportadoras en el software MineHaul@.

La estadística descriptiva que se usará será: tablas de frecuencia, polígonos de frecuencia, medidas de tendencia central como moda, mediana y media.

Los estadígrafos de estadística paramétrica ANOVA (Análisis de Varianza), correlación de Pearson y análisis de desviación estándar para contrastar la hipótesis.

También la comparación de costos y productividad del acarreo de desmonte sin implementar las fajas y con la implementación.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS

4.1. PRESENTACIÓN DE LOS CASOS

Para el presente estudio se consideró dos alternativas de transporte de material, uno con acarreo por camiones (actualmente utilizado para el desmonte) y otro mixto que combina camiones y fajas transportadoras, este último con tres posibles alternativas de ubicación de la chancadora de desmonte (A, B y C), las tres ubicaciones se consideran ex-pit (por su ubicación afuera del área del pit). Estas ubicaciones cuentan con las principales condiciones para la instalación de la chancadora, como son el área disponible, la accesibilidad para los equipos y la estabilidad de la zona. El caso con sólo camiones no considera la implementación del sistema de chancado y transporte por fajas, esta alternativa se considera como un caso base o de prueba (Test), todos los casos evaluados ejecutan un mismo plan de minado (secuencia) mostrando como variable la implementación de las fajas transportadoras en el acarreo.

Las coordenadas de ubicación utilizadas en los casos están en el sistema WGS84, en la Tabla 5 el detalle.

Tabla 5: Ubicación del sistema de chancado para cada caso.

Caso	Este	Norte	Altura	Sistema de acarreo
Test		No aplica		Sólo camiones (Actual)
A	275,119.1	8,985,185.8	4,410.5	Mixto (Camiones y Fajas)
B	274,816.6	8,981,895.7	4,425.5	
C	274,938.6	8,983,950.5	4,410.3	

Fuente: Elaboración propia.

4.2. PLAN DE MINADO E INFORMACIÓN BASE

El plan de minado que se consideró en la presente investigación es el mismo para todos los casos, es decir, las ganancias del plan son las mismas, las principales diferencias en los casos son el capital de inversión (CAPEX) y el costo operativo (OPEX), puesto que la implementación de la chancadora y fajas transportadoras requiere de una inversión en los primeros periodos además de los camiones adicionales que se requieran; al ser implementado el sistema, el costo operativo de mina varía por el costo de transporte por fajas. Mientras que en el caso base (Test) no se considera el CAPEX de la implementación de las fajas y el costo de acarreo considera solamente el generado por el acarreo con camiones.

En el Anexo B: se presenta el plan de minado considerado para la evaluación, la Figura 12 muestra el total movido anual del plan, el total movido es aproximadamente 3,882 Mt de los cuales 870 Mt son de mineral alimentado a la planta con una tasa promedio de 150 ktpd. En la Tabla 6 se muestran los precios considerados para la valorización de los metales:

Tabla 6: Lista de Precios.

<u>Metal</u>	<u>Unidad</u>	<u>Valor</u>
Cu Precio	(US\$/lb)	3.06
Zn Precio	(US\$/lb)	1.08
Moly Precio	(US\$/lb)	8.74
Pb Precio	(US\$/lb)	0.91
Ag Precio	(US\$/Oz)	18.25
Bi Precio	(US\$/lb)	6.51

Fuente: Elaboración propia en base a los precios del mes de junio del 2019.

Para que los precios no generen efectos adicionales en las evaluaciones del plan minero se ha considerado la lista de precios para todos los años de vida de mina.

El movimiento total de mina incluye el material minado y el remanajo in-pit. Para la estimación del plan minero se consideró las restricciones de minado y los equipos principales disponibles en Antamina, además de compras estimadas.

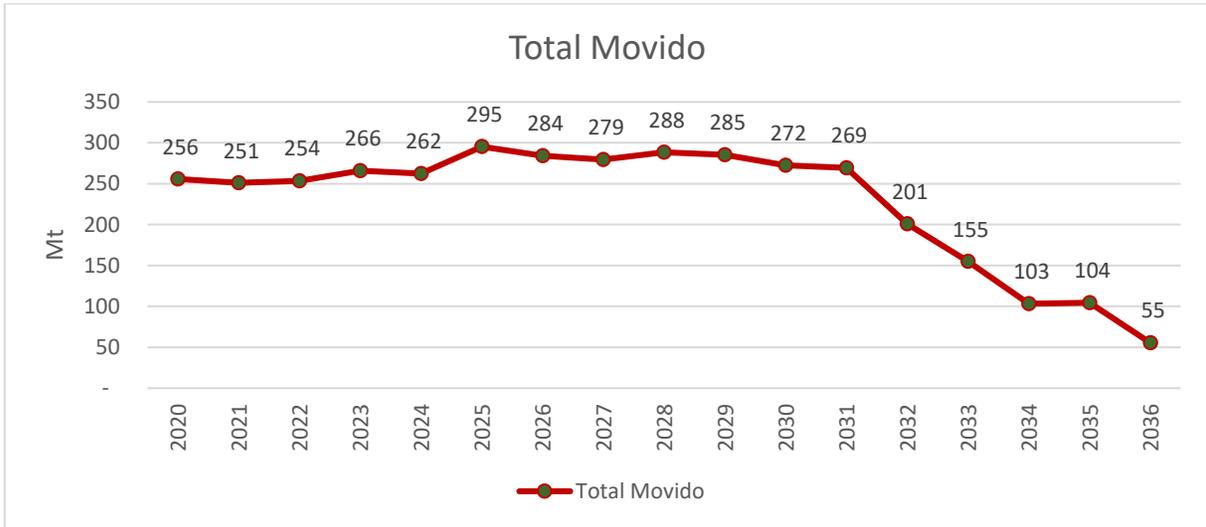


Figura 12: Movimiento total del plan minero.

Fuente: Elaboración propia.

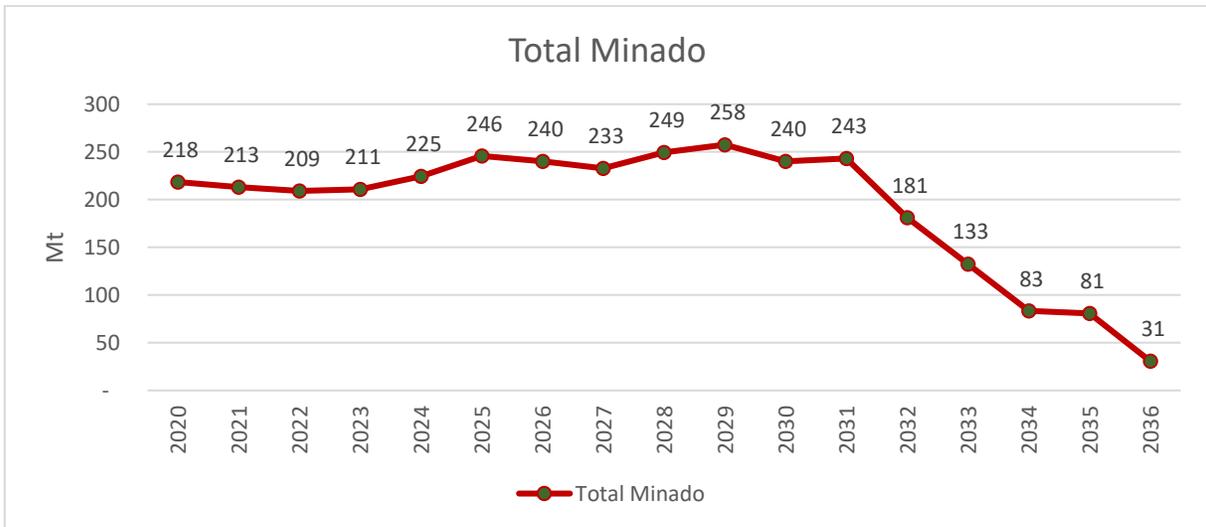


Figura 13: Minado total del plan minero.

Fuente: Elaboración propia.

La tasa de alimentación objetivo es de 155 ktpd iniciando con 140 ktpd en el primer periodo y aumentando en los siguientes periodos de forma escalonada, el plan cuenta con una tasa de alimentación a planta promedio de 150 ktpd y un stripping ratio promedio de 4:1.

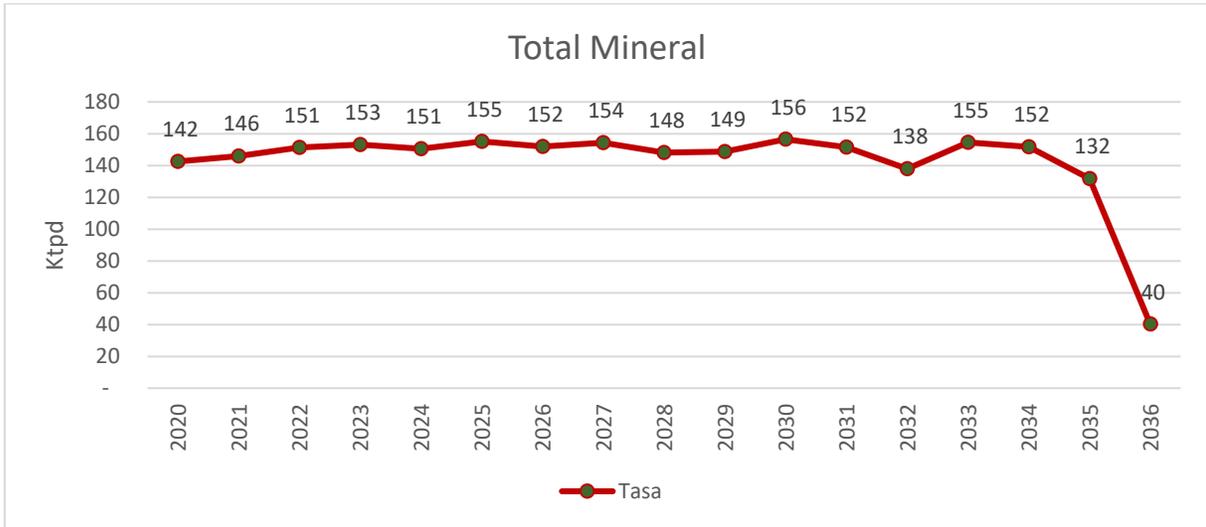


Figura 14: Tasa de alimentación a planta.

Fuente: Elaboración propia.

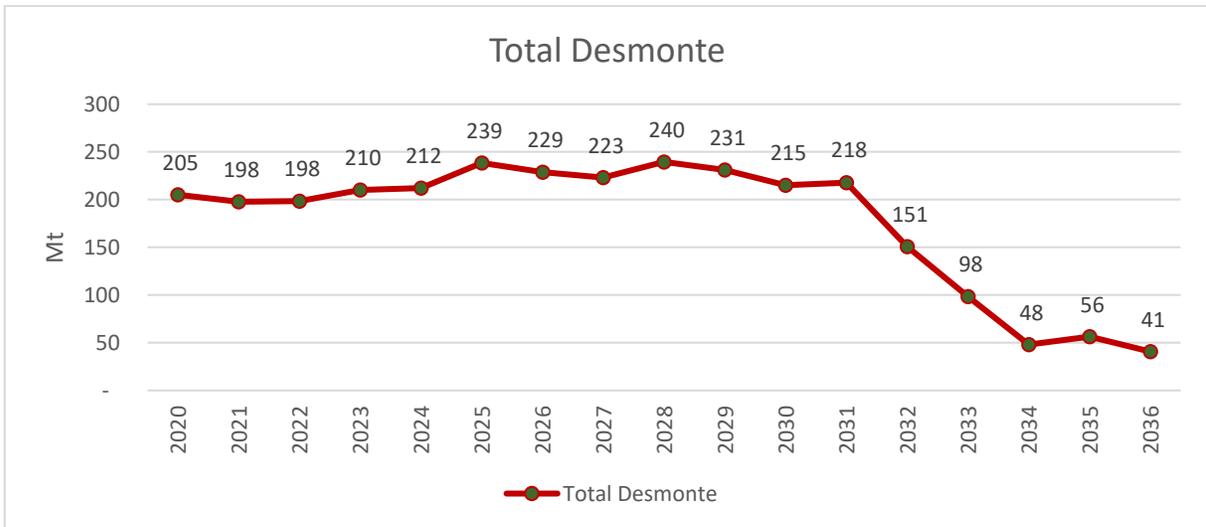


Figura 15: Desmante total del plan minero.

Fuente: Elaboración propia.

Se comprueba así que el desmonte se convierte ahora en un problema crítico del plan minero, puesto que la gran cantidad de material desmonte que se necesita extraer periodo a periodo para cumplir el plan minero ocasiona que los botaderos cercanos se llenen rápidamente por lo que las rutas de acarreo en cada periodo son mucho más largas.

4.3. CONFIGURACIÓN DE LOS PROYECTOS EN EL SOFTWARE MINEHAUL®

4.3.1. Datos de entrada requeridos para la simulación

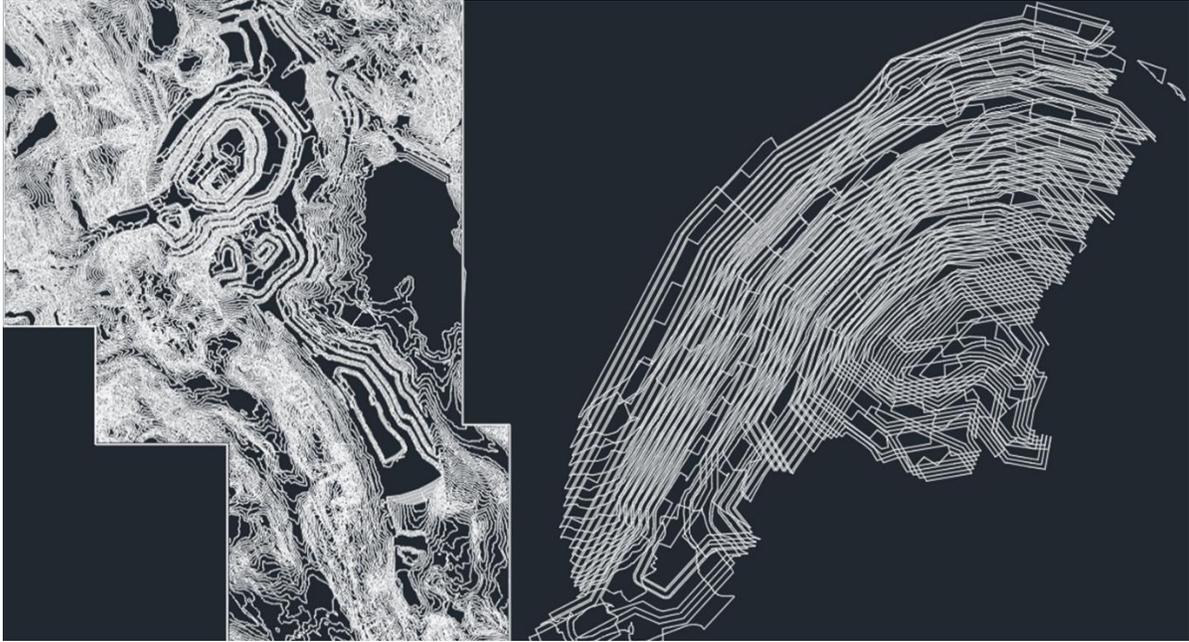
Primero debemos preparar nuestra información del plan de minado para visualizarlo en el software MineHaul®, necesitamos resumir el plan minero con un formato adecuado para poder cargarlo en el programa. Se requiere listar los periodos, fases, bancos, tipo y grupo de material, su tonelaje y densidad, en la Figura 16 se puede observar el formato adecuado:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Cut Code	Period	Phase	Bench	Mat Group	Mat Type	Tonnes	Dens (t/m3)		
2	F10a-4703	2019	F10a	4703	HG_SREM	Ore	0	2.73		
3	F10a-4703	2019	F10a	4703	WC	Waste	731926	2.73		
4	F10a-4688	2019	F10a	4688	WC	Waste	1446002	2.73		
5	F10a-4688	2019	F10a	4688	WRemaDt	Waste	5089604	2.73		
6	F10a-4673	2019	F10a	4673	WC	Waste	1979768	2.73		

Figura 16: Plan de Producción *csv para MineHaul®.

Fuente: Elaboración propia.

Para actualizar los gráficos de la simulación se requiere preparar la topografía inicial y los cortes del plan en formato *dxf. Se pueden utilizar líneas medias como se observa a continuación



*Figura 17: Topografía inicial y cortes de minado en formato *dxf para MineHaul®.*

Fuente: Elaboración propia.

4.3.2. Configuración del proyecto y carga del plan minero

Se configuró el proyecto MineHaul de acuerdo a las restricciones de Antamina y el plan minero, se ingresan los periodos y su duración en días. También debemos configurar las fases activas y los materiales presentes en el plan minero.

Las fases deben estar ordenadas según su precedencia de minado y los materiales diferenciados para la descarga en sus respectivos destinos. Es importante tener diferenciados las categorías de desmonte, ya que por razones de cuidado ambiental y compromisos de la minera tiene botaderos selectivos con el tipo de material que reciben como es el caso del botadero Tucush.

Se deben de configurar las características de los camiones disponibles en el plan minero, capacidades, velocidades cargados o vacíos, su utilización y disponibilidad por año.

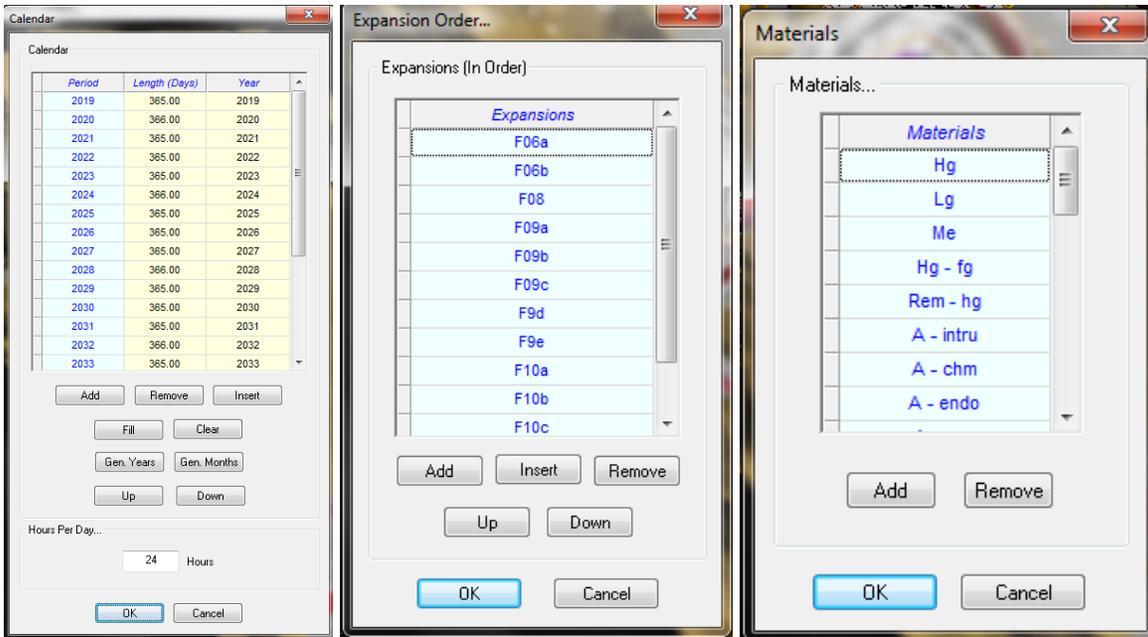


Figura 18: Configuración de Periodos, Fases y Materiales.

Fuente: Elaboración propia.

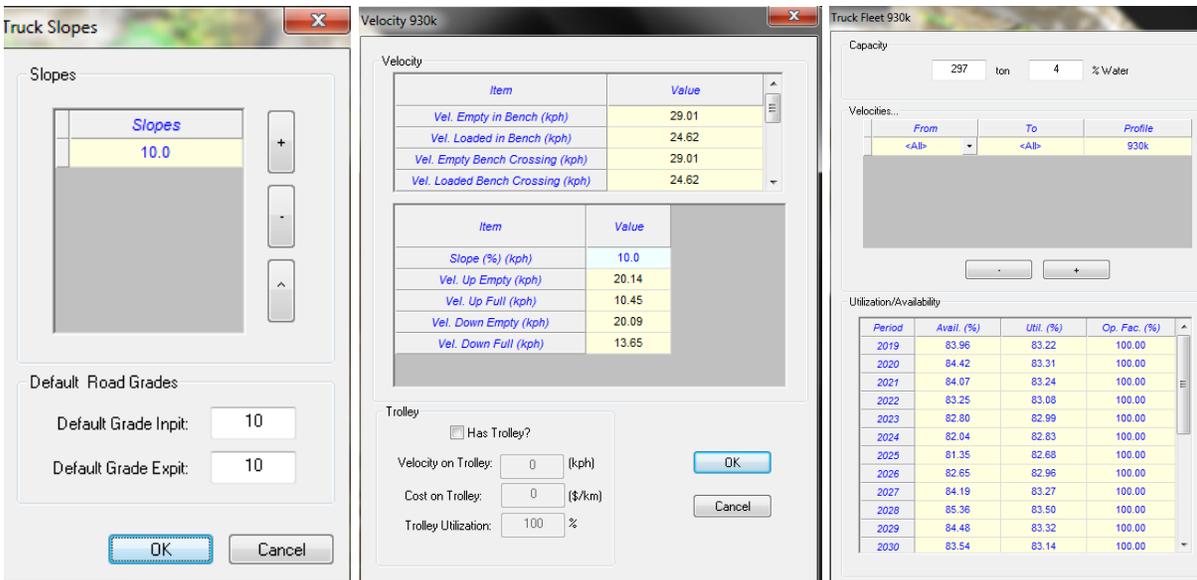


Figura 19: Configuración de pendiente y camiones (velocidad, capacidad, disponibilidad y utilización).

Fuente: Elaboración propia.

Luego de configurar el proyecto completamente, se carga el plan minero, la topografía y las lunas.

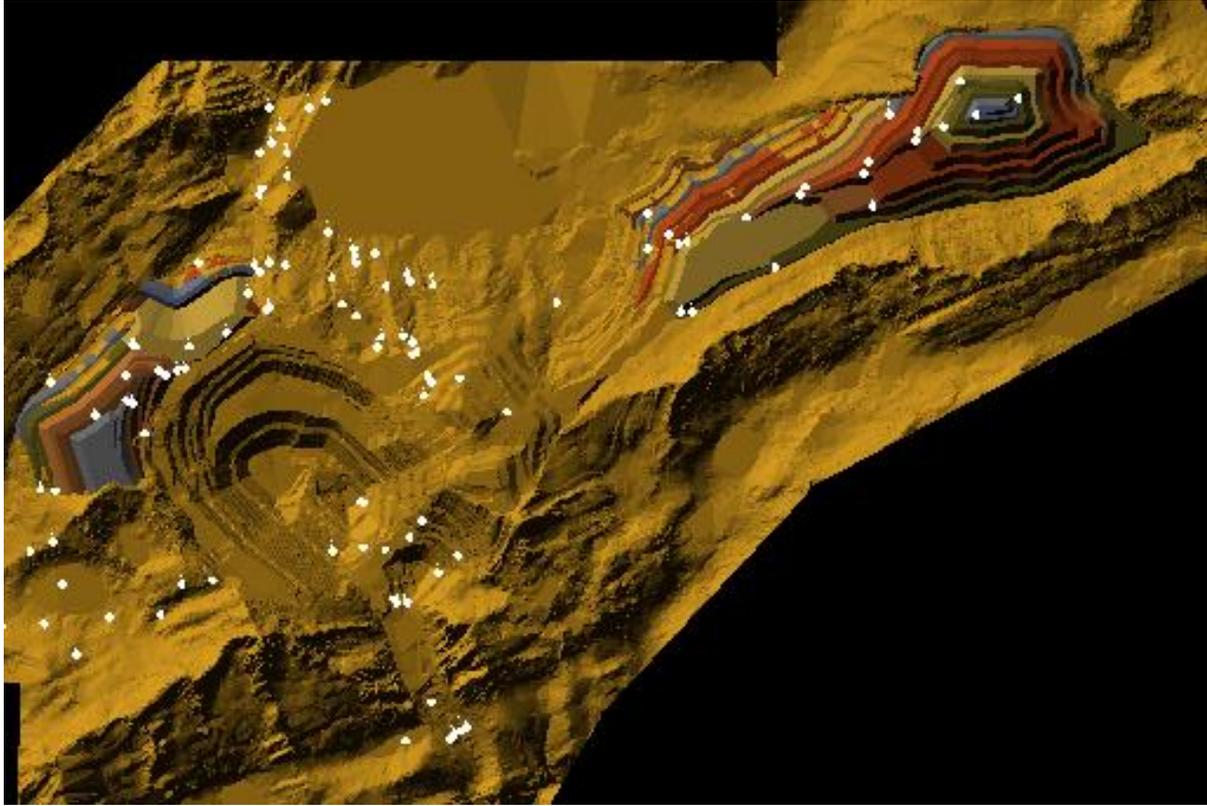


Figura 20: Vista de Diseño MneHaul®.

Fuente: Elaboración propia.

Con la topografía cargada al programa podemos triangularla, debemos configurar los botaderos disponibles y los nodos de descarga, es decir, configurar el periodo de inicio, materiales aceptados y restricciones de capacidad para los botaderos gráficos y chancadoras.

Los cortes y el plan minero permiten visualizar la secuencia de minado lo cual ayuda a dibujar nuestras rutas de acarreo desde cada origen hasta cada destino con un mejor criterio.

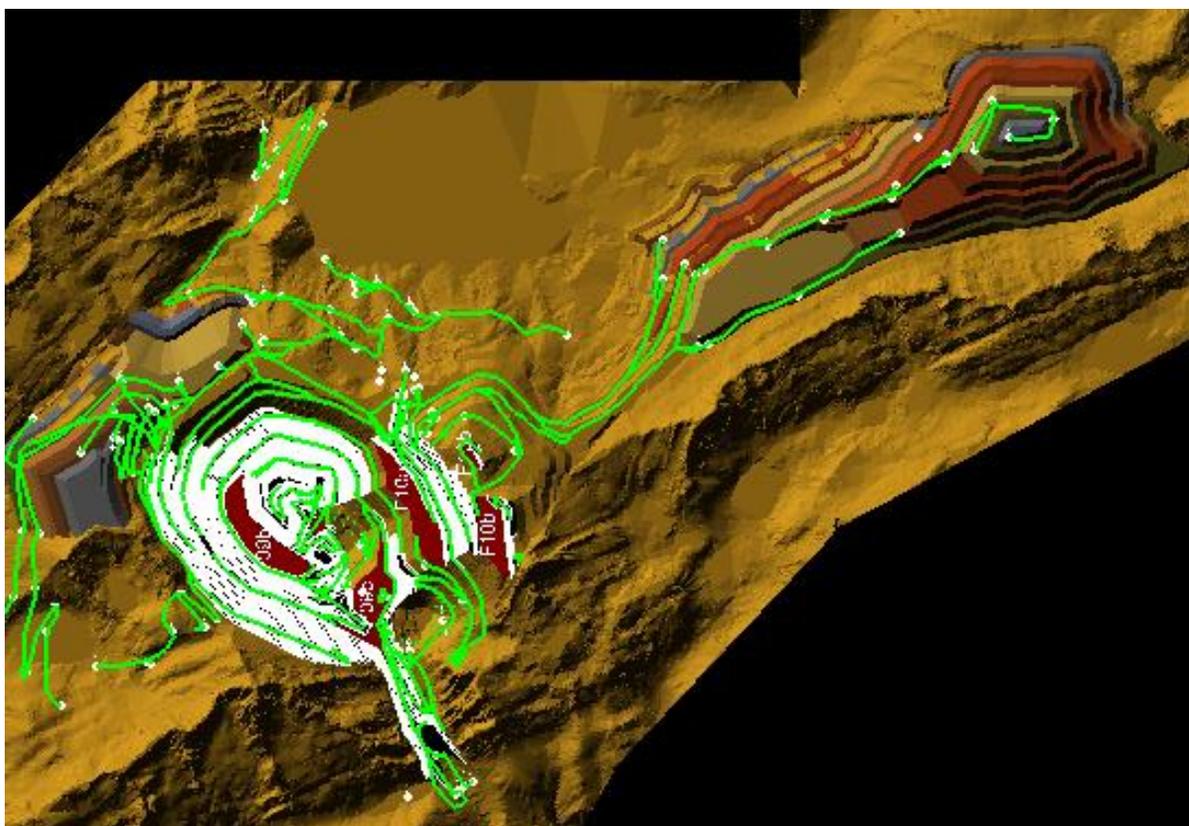


Figura 21: Red de rutas de acarreo y faja transportadoras en MineHaul®. Caso Test 2025.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 21 se observa el fin del periodo 2025 con las rutas de acarreo activas en el Caso Test.

El software MineHaul® calcula el tiempo en ruta con los camiones configurados desde cada origen a cada destino, cumpliendo las restricciones que se le otorgue por el usuario, ya sea en la configuración de los destinos como sus capacidades anuales, tonelajes objetivos, tiempos de descarga y secuenciamiento de módulos, o configuración en las rutas de acarreo que permite limitar el tonelaje que puede transitar por una ruta, bloquear la ruta por periodos, o incluso ser más específico y bloquear un determinado material de un origen único para que pueda ser llevado por otra ruta. El programa funciona con prioridades en cada una de sus restricciones, lo cual permite

realizar muchas modificaciones al usuario según sea la preferencia del estudio. En la presente investigación, se modificaron las restricciones para que el Caso Test con sistema de acarreo sólo camiones cumpla el plan de minado correctamente y se obtuvo el perfil de camiones con un máximo de 149 camiones, el plan considera 119 camiones existentes en el primer periodo y un plan de bajas para los camiones CAT793 y Komatsu 930, mientras que el incremento y reemplazo de camiones se realiza con camiones Komatsu 980.

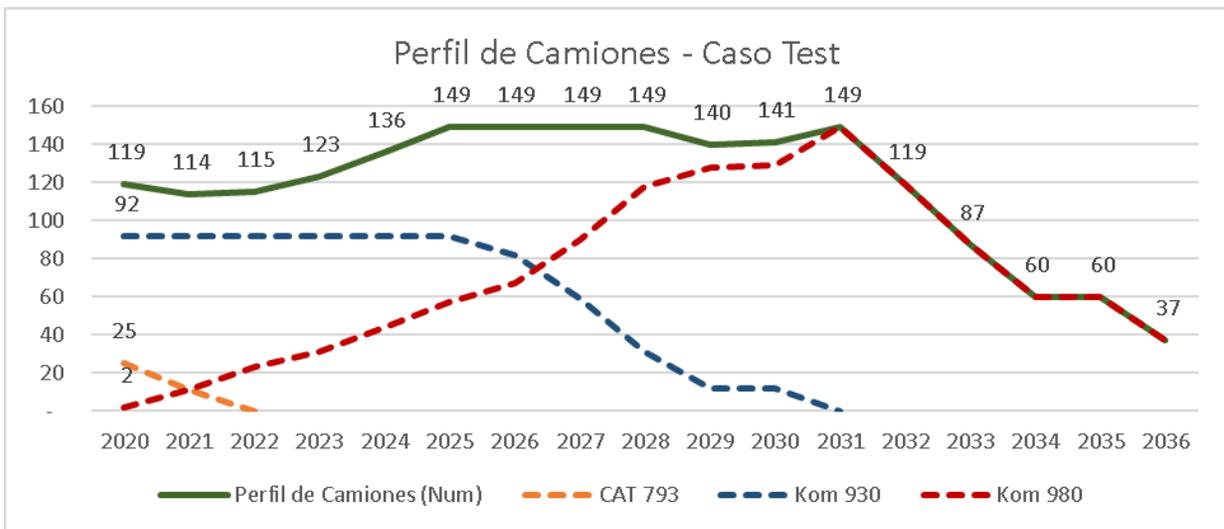


Figura 22: Perfil de Camiones del Caso Test (Acarreo sólo camiones).

Fuente: Elaboración propia.

Se tomó como base los resultados obtenidos por el Caso Test, configuración y restricciones, a partir de este caso inicial se agregó la ubicación de la chancadora y fajas transportadoras para cada uno de los casos a evaluar (A, B y C), es decir, los resultados obtenidos son efecto directo de añadir el sistema de fajas y chancado y variar su ubicación en la topografía.

Para la presente investigación se utilizó una nueva herramienta del software, la faja transportadora (como tipo de ruta) que permite simular el uso de fajas transportadoras en un sistema de acarreo complejo, su configuración consiste en la ubicación de entrada (chancado) y

descarga (spreader), materiales aceptados, periodos de funcionamiento y capacidades máximas por año.

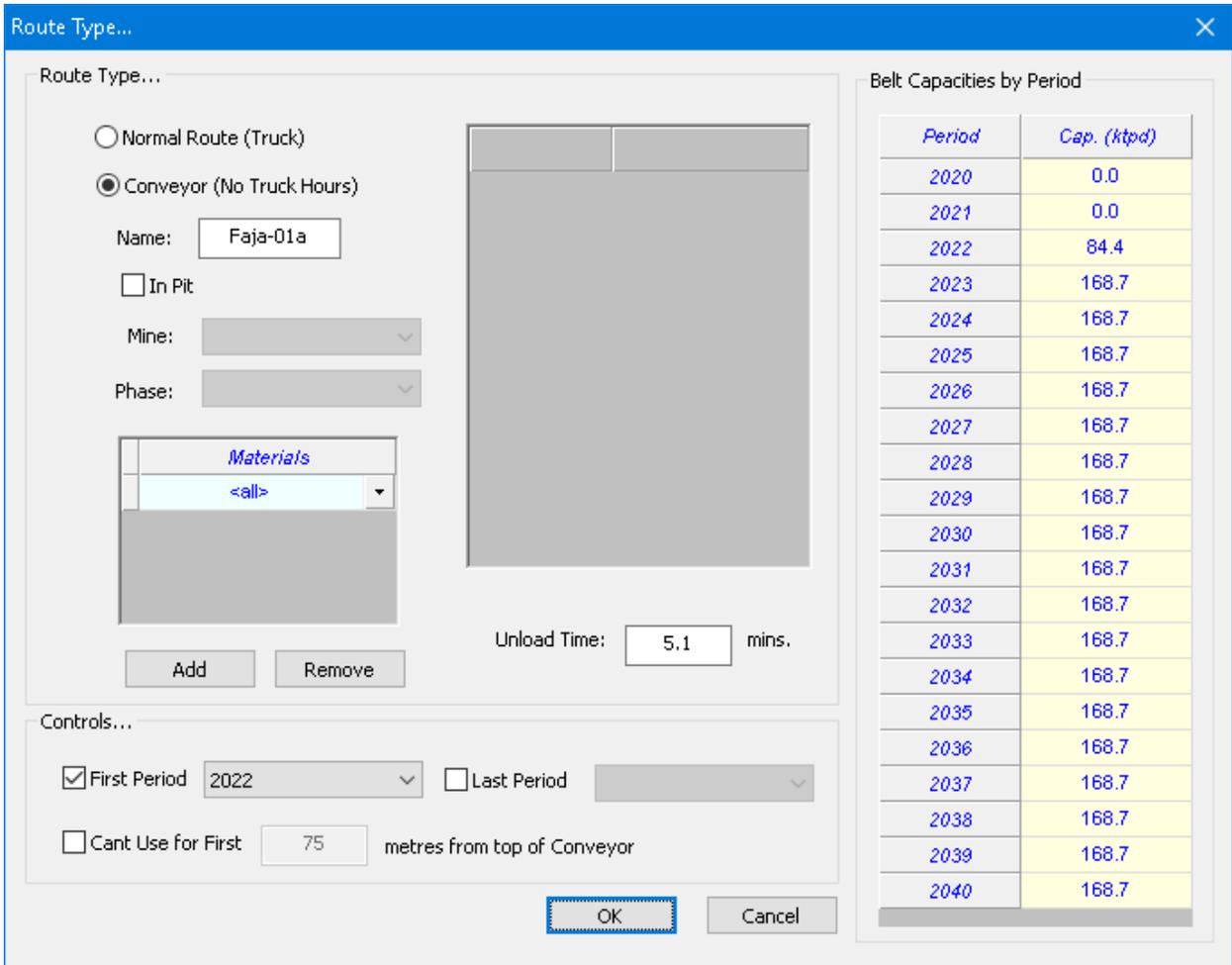


Figura 23: Configuración de Fajas Transportadoras como Tipo de Ruta.

Fuente: Elaboración propia.

Para los casos en estudio se consideró diferentes ubicaciones de la chancadora de desmonte y fajas transportadoras con una capacidad de 62 Mt por año, a continuación, se observará cada uno de los casos evaluados y sus resultados.

4.4. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

4.4.1. Caso Test

Caso inicial de prueba para nuestros resultados, no considera la inversión en un sistema de chancado y fajas transportadoras en el acarreo de desmonte para la mina. El acarreo del desmonte se realiza con el sistema tradicional de camiones.

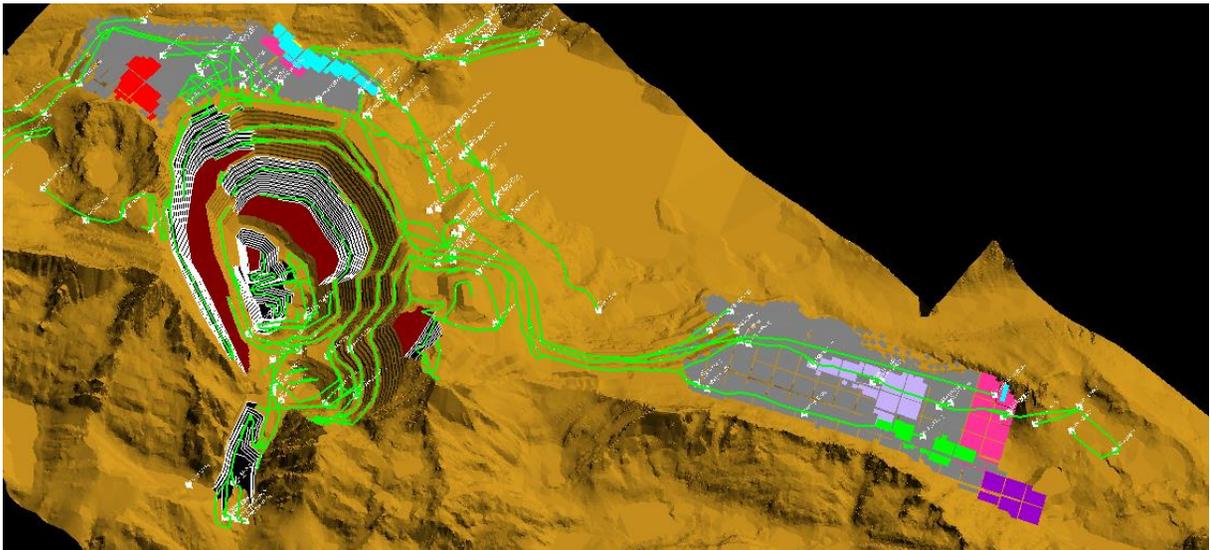


Figura 24: Simulación Caso Test periodo 2022.

Fuente: Elaboración propia.

Con el transcurrir de los periodos se agota la capacidad de los botaderos cercanos al pit como Tucush y se debe de transportar el desmonte al botadero Yanacancha que es más lejano, esto incrementa las horas de acarreo de los camiones. Como resultado de la simulación se requiere de compras adicionales de camiones en los primeros años para poder cumplir con el plan de minado satisfactoriamente a pesar de que el total movido es constante. El incremento de equipos de acarreo en la mina puede provocar congestión o tráfico en las principales rutas de acarreo lo cual

incrementa los tiempos fijos del sistema. El perfil de horas camión final se muestra en la siguiente figura:

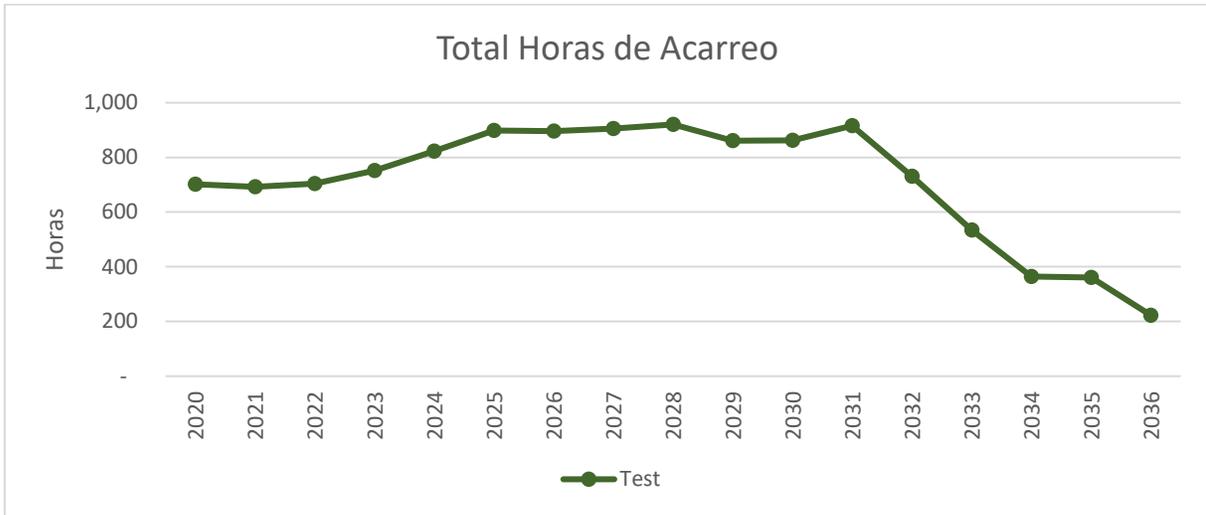


Figura 25: Horas de acarreo total - Caso Test.

Fuente: Elaboración propia.

Con respecto a la productividad (toneladas por hora efectiva) de los camiones se puede observar la siguiente figura:

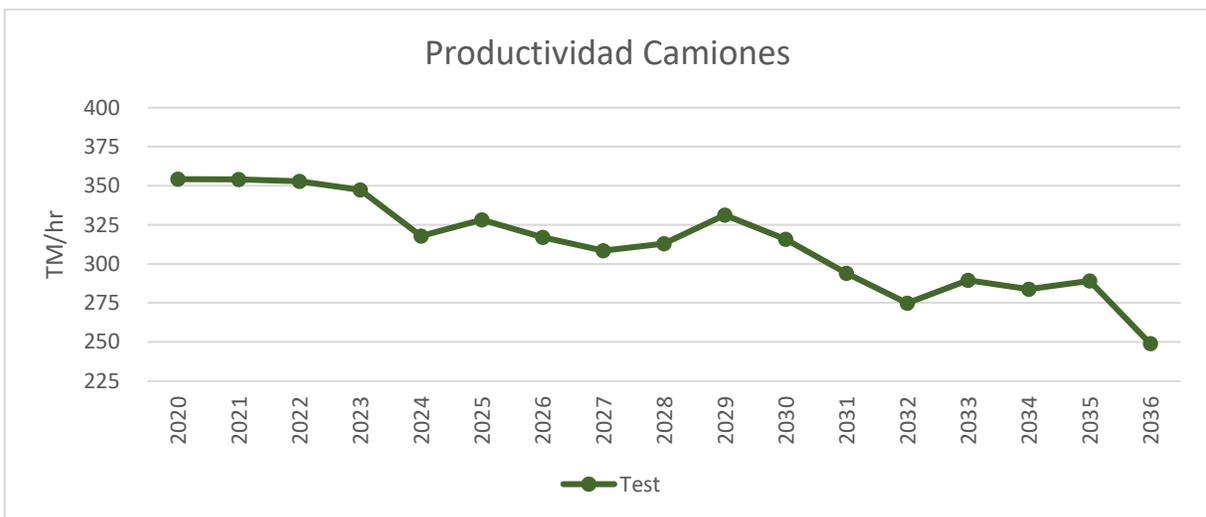


Figura 26: Productividad de camiones – Caso Test.

Fuente: Elaboración propia.

La productividad de los camiones empieza a descender desde el periodo 2022, eso demuestra que el sistema de acarreo no está funcionando correctamente por las condiciones presentadas en la secuencia de minado, esto motiva a buscar alguna alternativa que nos permita incrementar la productividad de nuestro sistema, es por eso que el periodo 2022 se ha seleccionado para comprobar la oportunidad de implementar el sistema de chancado y fajas transportadoras adicional a los camiones para optimizar el acarreo de desmonte.

La evaluación económica del Caso Test en la Tabla 7.

Tabla 7: Evaluación Económica - Caso Test.

Caso Test		
Ingresos	US\$M	60422
Cargos de Realización	US\$M	-6989
OPEX	US\$M	-15207
CAPEX	US\$M	-4449
Impuesto	US\$M	-13540
Costos de Cierre	US\$M	133
Capital de Trabajo	US\$M	232
Flujo de Efectivo Neto	US\$M	20602

Fuente: Elaboración propia.

El Caso Test es el punto de inicio, nos permitirá conocer los efectos por la implementación de las fajas transportadoras y confirmar la hipótesis planteada.

El resumen de los resultados obtenidos por la estimación de flota y costos de acarreo se detallan en la Tabla 8.

Tabla 8: Resumen de acarreo - Caso Test.

Caso Test		
Perfil de Camiones	(Num)	149
CAT 793	(Num)	25
Kom 930	(Num)	92
Kom 980	(Num)	149
Total Horas de Acarreo	(K Hrs)	12147.72
TM/hr		312.95
kmeq cargado		324.54
kmeq vacio		171.41
kmeq total		495.95
Mt		3857.24
MTM		0
km		134.98
ciclo(min)		1107.87
Factor de Carga		334.67
Velocidad Eq		26.87
Costo de acarreo (sólo Camiones)	M\$	4373.18
Costo de acarreo (Chancadora/Fajas)	M\$	0.00
Costo de Acarreo Total	M\$	4373.18
Costo de acarreo total/Tn Total Movido	\$/t	1.16
TKPH		5565.55

Fuente: Elaboración propia.

4.4.2. Caso A

El botadero Tucush es un destino corto para los camiones que transportan desmonte desde el pit, pero Tucush no puede recibir todo tipo de desmonte, el material A no puede ser depositado en este botadero por compromisos ambientales, por lo tanto, como primera alternativa se tiene una chancadora de desmonte al sur del botadero Tucush, cerca de una de las principales salidas del pit. La ubicación de la chancadora A requiere de 7.2 km de faja extensible hasta el punto de descarga en el botadero Yanacancha, el Spreader. La inversión estimada para la implementación del sistema en esta ubicación es de US\$ 85 M de inversión inicial y US\$ 110 M repartidos en los primeros

años del plan, incluyendo el costo de implementación por las fajas extensibles que se requiera, el costo es de US\$ 1 M por kilómetro de faja (ver Figura 27).

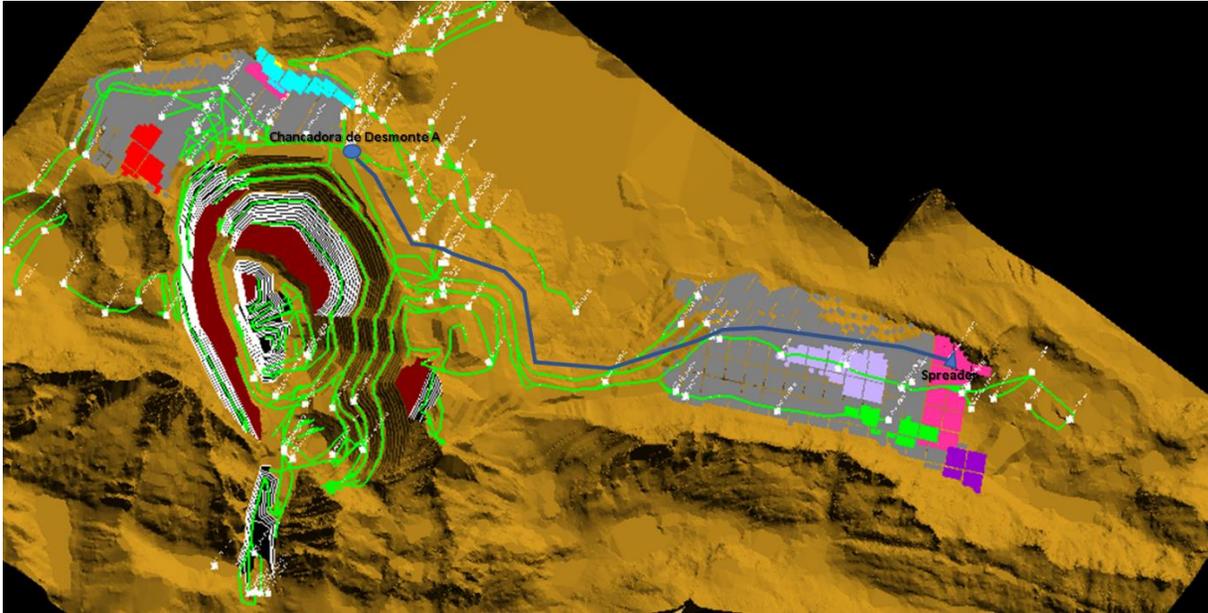


Figura 27: Simulación Caso A periodo 2022. Ubicación de la chancadora A y sus fajas transportadoras.

Fuente: Elaboración propia.

Satisfactoriamente el uso de la faja transportadora ha disminuido las horas de acarreo de los camiones otorgando un nuevo destino cercano y disminuyendo la compra de camiones.

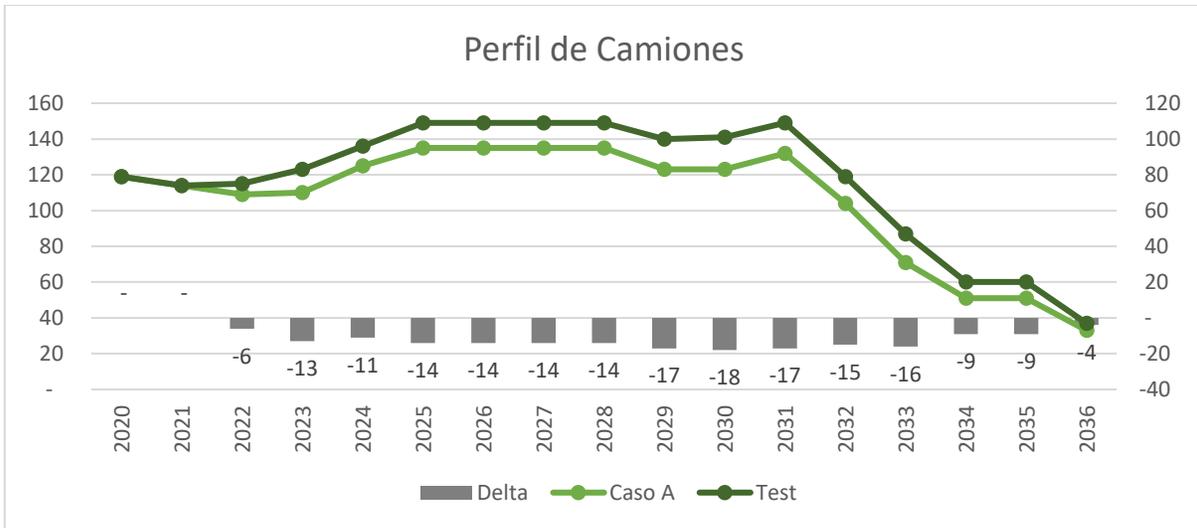


Figura 28: Perfil de camiones. Caso A - Caso Test.

Fuente: Elaboración propia.

Si consideramos US\$ 6.5 M el precio de un camión Komatsu 980, se ahorró US\$ 111 M en compra de camiones, considerando la inversión por el proyecto de US\$ 195 M, la inversión en el proyecto descontando el ahorro en camiones es de US\$ 84 M.

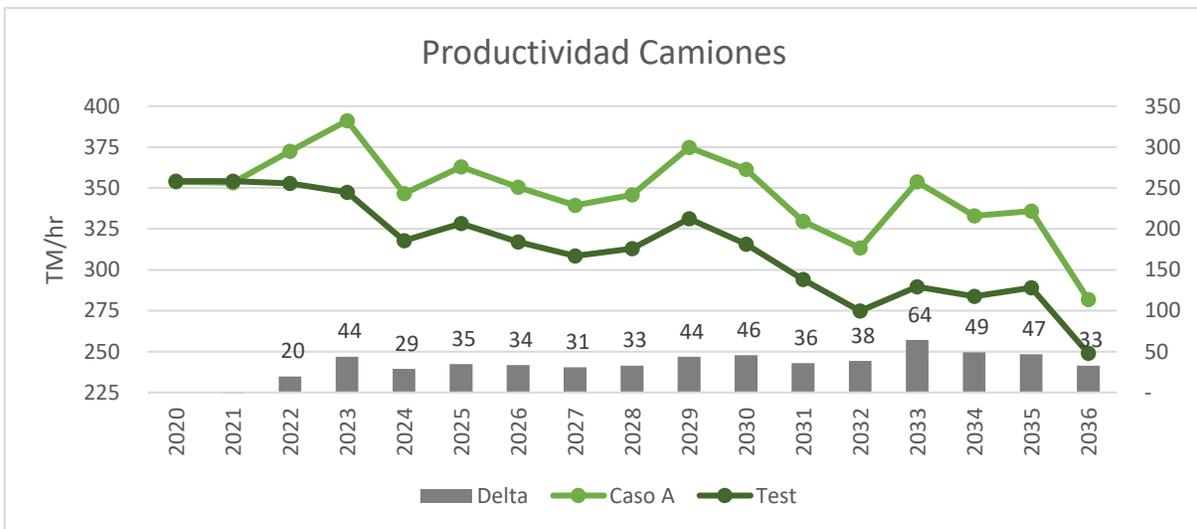


Figura 29: Productividad de camiones. Caso A - Caso Test.

Fuente: Elaboración propia.

Por lo expuesto en la figura, claramente se puede comprobar que desde el periodo en que inicia el funcionamiento de la chancadora de desmonte y fajas transportadoras incrementa la productividad de los camiones, este incremento es aproximadamente 11%.

La evaluación económica del Caso A en la Tabla 9.

Tabla 9: Evaluación económica – Caso A.

Caso A	
Ingresos	US\$M 60422
Cargos de Realización	US\$M -6989
OPEX	US\$M -14970
CAPEX	US\$M -4533
Impuesto	US\$M -13540
Costos de Cierre	US\$M 133
Capital de Trabajo	US\$M 232
Flujo de Efectivo Neto	US\$M 20754

Fuente: Elaboración propia.

Este caso presenta un flujo de efectivo neto superior al caso Test en US\$ 152 M.

El resumen de los resultados obtenidos por la estimación de flota y costos de acarreo se detallan en la Tabla 10.

Tabla 10: Resumen de acarreo – Caso A

Caso A		
Perfil de Camiones	(Num)	135
CAT 793	(Num)	25
Kom 930	(Num)	92
Kom 980	(Num)	132
Total Horas de Acarreo	(K Hrs)	10993.93
TM/hr		347.03
kmeq cargado		283.77
kmeq vacio		146.12
kmeq total		429.89
Mt		3857.24
MTM		0
km		112.98
ciclo(min)		986.25
Factor de Carga		332.70
Velocidad Eq		26.23
Costo de acarreo (sólo Camiones)	M\$	3957.81
Costo de acarreo (Chancadora/Fajas)	M\$	178.70
Costo de Acarreo Total	M\$	4136.51
Costo de acarreo total/Tn Total Movido	\$/t	1.09
TKPH		5464.89

Fuente: Elaboración propia.

4.4.3. Caso B

El botadero Yanacancha es el único botadero disponible que puede recibir cualquier tipo de desmonte (A, AO, B y C), todos los años se extrae material reactivo (A y AO) por eso Yanacancha es el principal botadero para la vida de la mina. Este botadero tiene aproximadamente 5 km de largo y al pasar los años e incrementar las descargas de desmonte, las rutas largas hacia Yanacancha provocan congestión en los accesos para camiones del botadero, es por este motivo que la ubicación para el Caso B se presenta en el ingreso al botadero Yanacancha, en un área amplia con la intención de descongestionar las vías principales de la mina, las fajas tienen una longitud de 3.5 km (ver Figura 30).

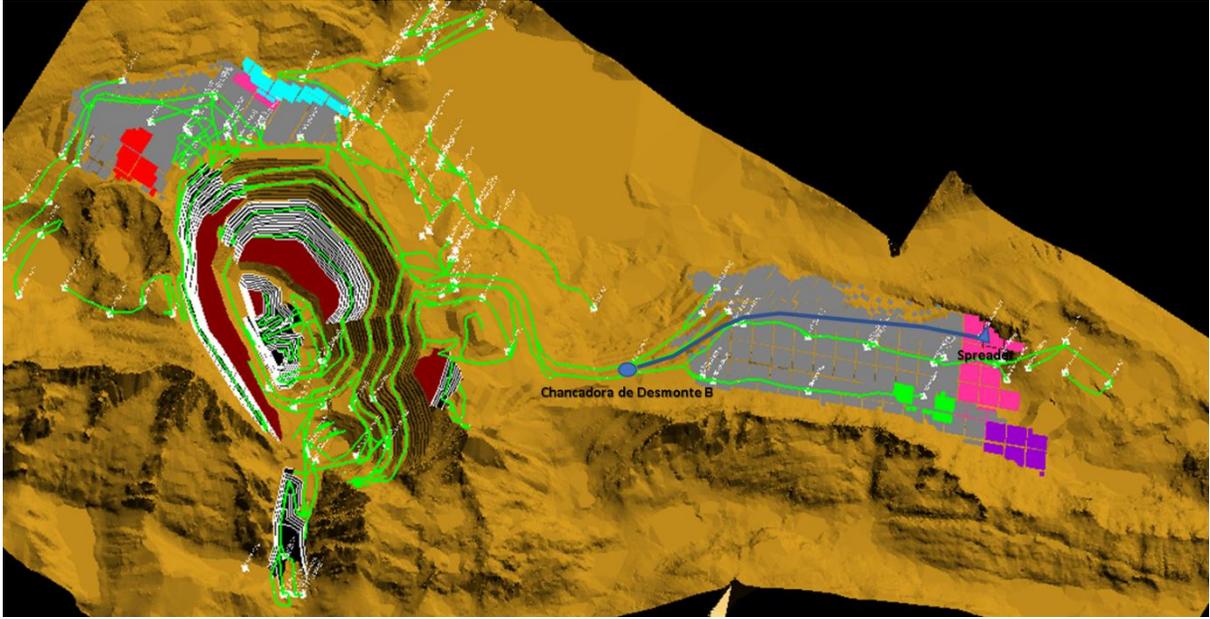


Figura 30: Simulación Caso B periodo 2022. Ubicación de la chancadora y fajas transportadoras.

Fuente: Elaboración propia.

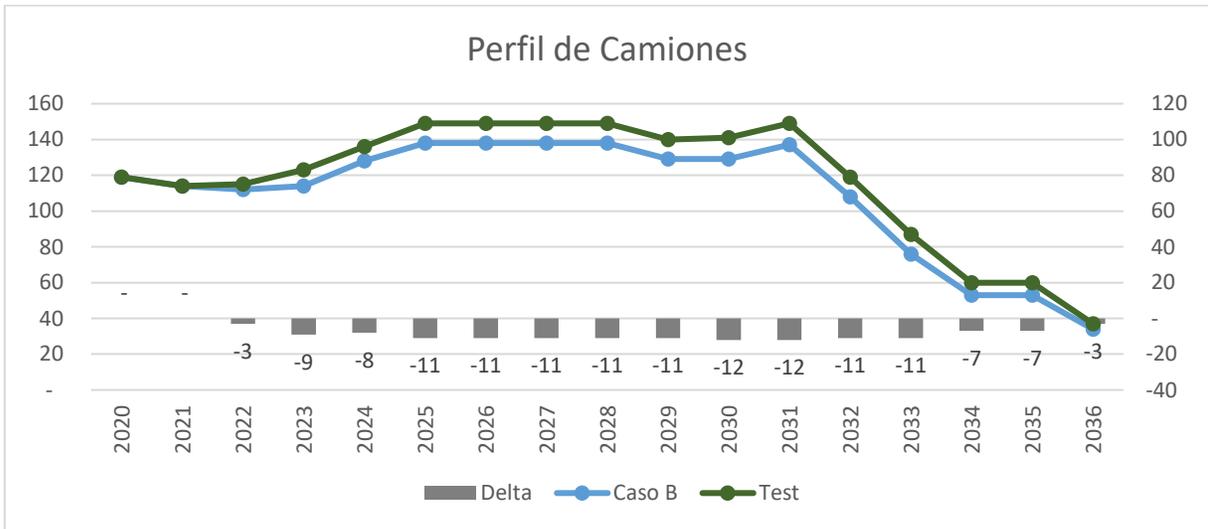


Figura 31: Perfil de camiones. Caso B - Caso Test.

Fuente: Elaboración propia.

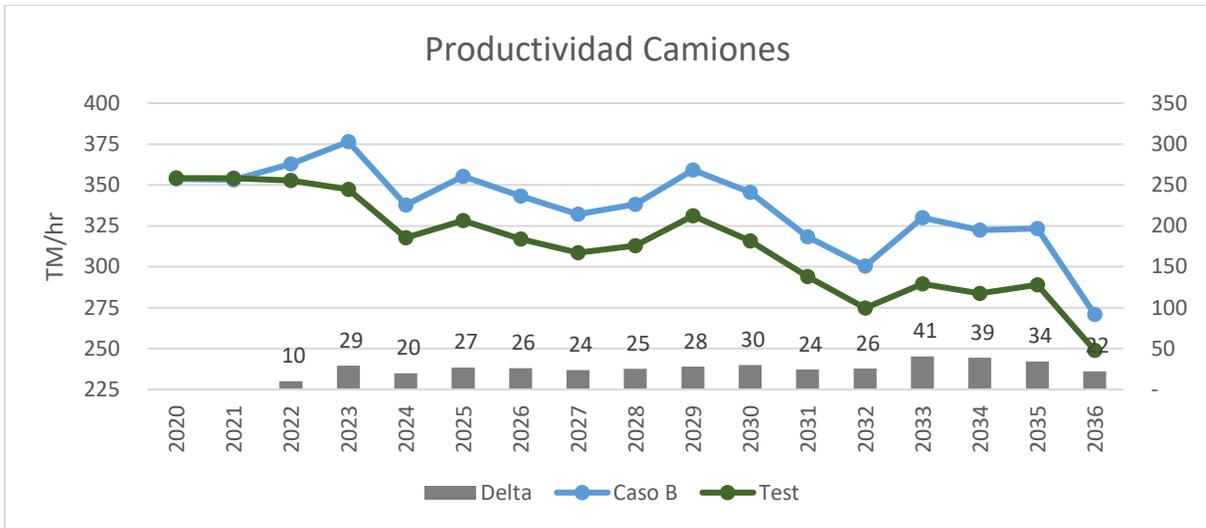


Figura 32: Productividad de camiones. Caso B - Caso Test.

Fuente: Elaboración propia.

La reducción de compras de camiones genera un ahorro de US\$ 78 M, con una inversión inicial de US\$ 36 M y repartidos en los primeros años del plan en proyectos complementarios e instalación de las fajas extensibles US\$ 110 M, es decir, la inversión por el sistema de chancado y fajas es US\$ 146 M, descontando el ahorro en camiones finalmente se obtiene que US\$ 68 M es el Capex adicional.

Así mismo, reubicando la chancadora y fajas incrementa la productividad de los camiones con respecto al Caso Test, este incremento es aproximadamente 8%.

La evaluación económica y el resumen de la simulación del Caso B en la Tabla 11 y Tabla 12.

Tabla 11: Evaluación económica Caso B.

Caso B		
Ingresos	US\$M	60422
Cargos de Realización	US\$M	-6989
OPEX	US\$M	-15086
CAPEX	US\$M	-4517
Impuesto	US\$M	-13540
Costos de Cierre	US\$M	133
Capital de Trabajo	US\$M	232
Flujo de Efectivo Neto	US\$M	20655

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 12: Resumen de acarreo. Caso B - Caso Test.

Caso B		
Perfil de Camiones	(Num)	138
CAT 793	(Num)	25
Kom 930	(Num)	92
Kom 980	(Num)	137
Total Horas de Acarreo	(K Hrs)	11315.15
TM/hr		336.65
kmeq cargado		293.31
kmeq vacio		153.85
kmeq total		447.16
Mt		3857.24
MTM		0
km		120.22
ciclo(min)		1020.08
Factor de Carga		333.35
Velocidad Eq		26.36
Costo de acarreo (sólo Camiones)	M\$	4073.45
Costo de acarreo (Chancadora/Fajas)	M\$	178.70
Costo de Acarreo Total	M\$	4252.15
Costo de acarreo total/Tn Total Movido	\$/t	1.12
TKPH		5470.55

Fuente: Elaboración propia.

Este caso presenta un flujo de efectivo neto superior al caso Test en US\$ 53 M.

4.4.4. Caso C

La última ubicación se encuentra en una zona intermedia para ambos botaderos, en otra de las salidas principales del pit. La faja tiene una longitud aproximada de 5.7 km desde la chancadora hasta la descarga en el spreader (ver Figura 33).

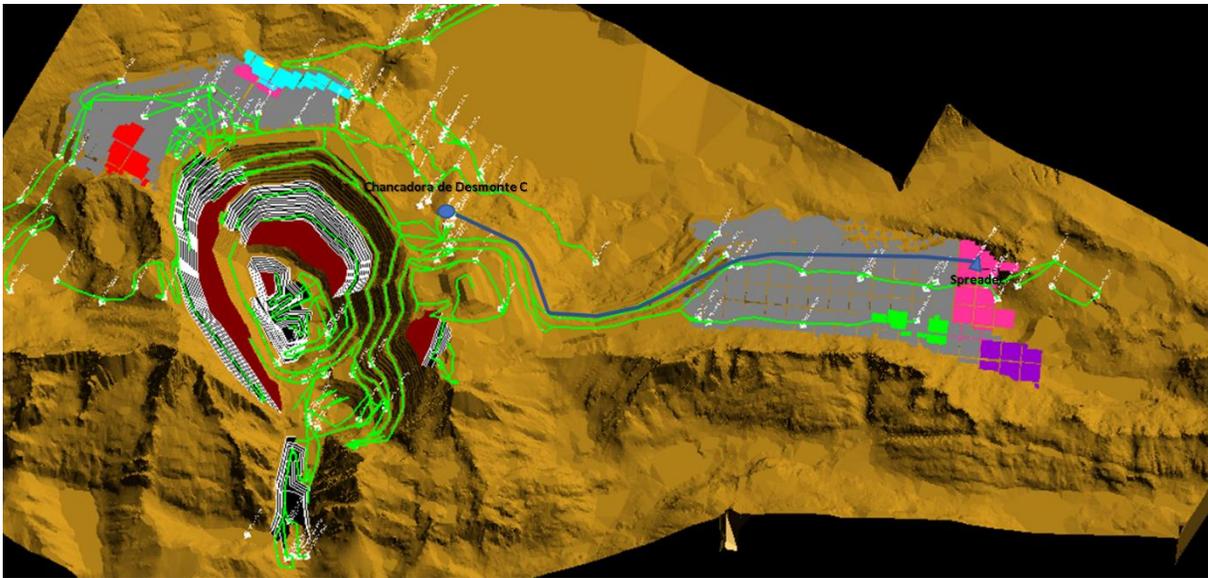


Figura 33: Simulación Caso C periodo 2022. Ubicación de la chancadora y fajas transportadoras.

Fuente: Elaboración propia.

La ubicación tiene una amplia área para el funcionamiento de la chancadora e ingreso de camiones a su descarga, no interfiere con la ruta de camiones hacia Yanacancha puesto que está ubicada en un desvío de la vía.

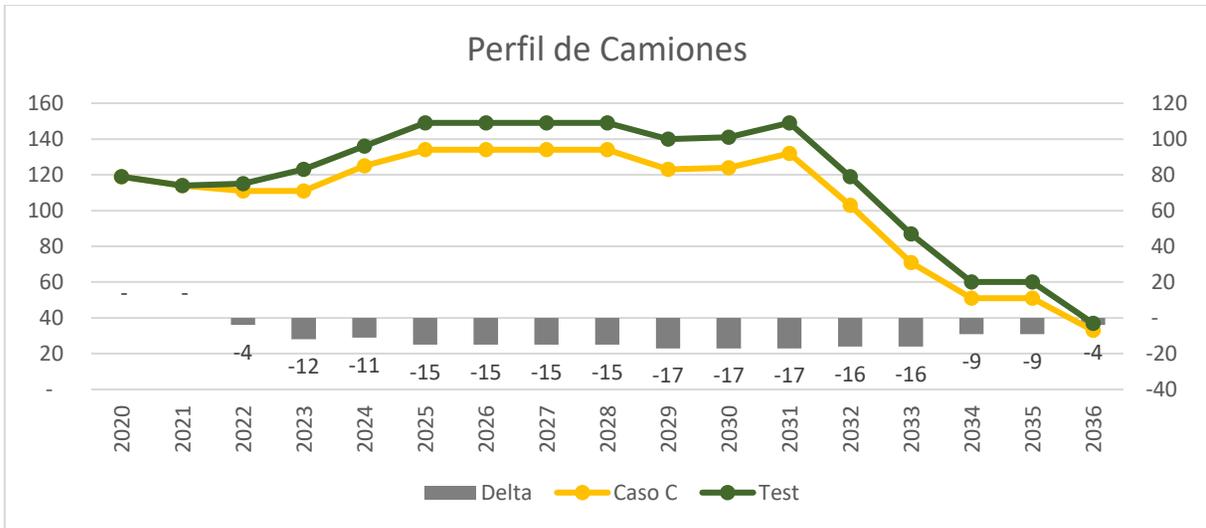


Figura 34: Perfil de camiones. Caso C – Caso Test.

Fuente: Elaboración propia.

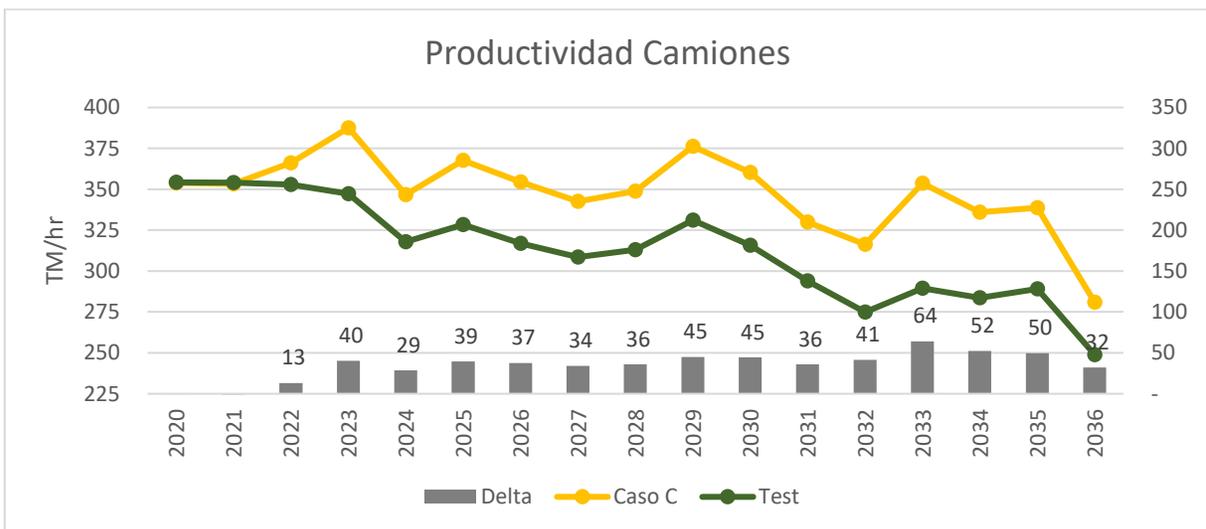


Figura 35: Productividad de camiones. Caso C – Caso Test.

Fuente: Elaboración propia.

La reducción de compras de camiones genera un ahorro de US\$ 111 M, con una inversión inicial de US\$ 50 M y adicionales por extensión de la faja y proyectos complementarios un monto de US\$ 110 M, es decir, la inversión por proyecto del sistema de chancado y fajas es US\$ 119 M que descontando el ahorro de camiones significa US\$ 49 M adicionales de Capex.

Así mismo, reubicando la chancadora y fajas incrementa la productividad de acarreo aproximadamente 11%.

La evaluación económica y el resumen de la simulación del Caso C en la Tabla 13 y Tabla 14.

Tabla 13: Evaluación económica Caso C.

Caso C		
Ingresos	US\$M	60422
Cargos de Realización	US\$M	-6989
OPEX	US\$M	-14960
CAPEX	US\$M	-4507
Impuesto	US\$M	-13540
Costos de Cierre	US\$M	133
Capital de Trabajo	US\$M	232
Flujo de Efectivo Neto	US\$M	20791

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14: Resumen de acarreo Caso C.

Caso C		
Perfil de Camiones	(Num)	134
CAT 793	(Num)	25
Kom 930	(Num)	92
Kom 980	(Num)	132
Total Horas de Acarreo	(K Hrs)	10965.97
TM/hr		347.80
kmeq cargado		282.80
kmeq vacío		145.88
kmeq total		428.69
Mt		3857.24
MTM		0
km		113.00
ciclo(min)		983.39
Factor de Carga		332.62
Velocidad Eq		26.23
Costo de acarreo (sólo Camiones)	M\$	3947.75
Costo de acarreo (Chancadora/Fajas)	M\$	178.70
Costo de Acarreo Total	M\$	4126.45
Costo de acarreo total/Tn Total Movido	\$/t	1.08
TKPH		5451.17

Fuente: Elaboración propia.

Este caso presenta un flujo de efectivo neto superior al caso Test en US\$ 188 M.

4.5. ANÁLISIS DE LOS CASOS

En resumen, el caso base, es decir, el Caso Test ha sido manipulado con la variable de la ubicación de una chancadora de desmonte y fajas transportadoras, esto se ha representado tanto en la simulación de acarreo del plan minero objetivo como en la evaluación económica para su comparación. Los resultados obtenidos muestran la siguiente tendencia:

4.5.1. Capex

El cálculo del capital de inversión contiene una gran variedad de proyectos que permiten que el plan minero utilizado pueda llevarse a cabo, como nuestro caso base (Caso Test) ha tomado los valores iniciales del plan minero debemos separar la inversión realizada por la compra de camiones, que es afectada directamente por el acarreo, para luego obtener los efectos de cambiar el sistema de acarreo. El Capex base considerado para el plan es de US\$ 3,494 M el cual incluye compra de equipos de carguío, perforación y auxiliares que son necesarios para cumplir el plan minero, inversiones en la presa de relaves, proyectos de expansión como son nuevos componentes del plan (botaderos, proyectos de mejora continua e innovación) e infraestructuras de mina, campamento, planta y mantenimiento.

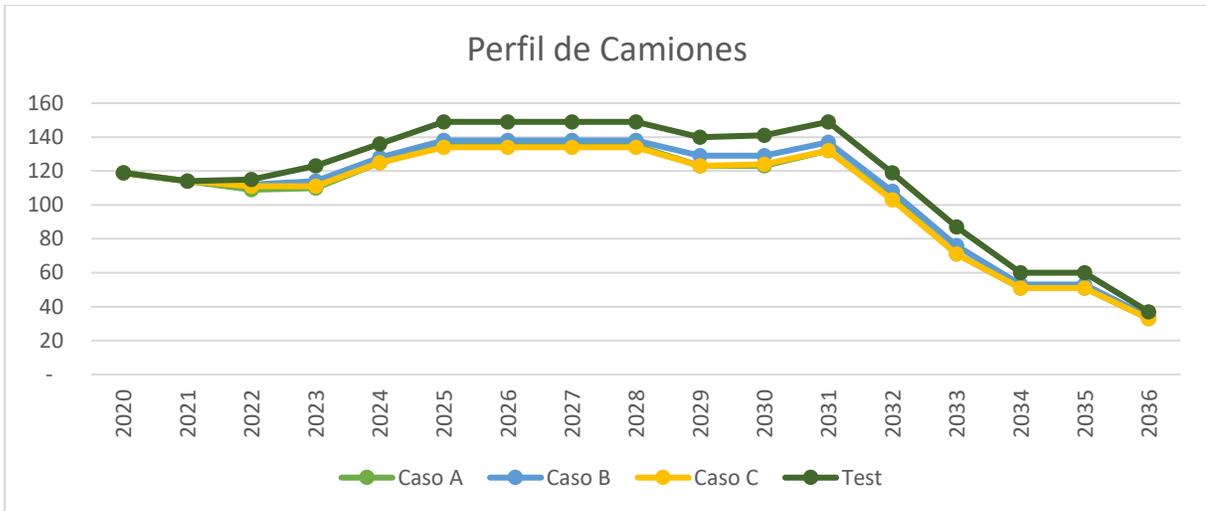


Figura 36: Perfil de camiones. Comparación de casos.

Fuente: Elaboración propia.

Para los casos A, B y C se ha considerado el inicio de funcionamiento de un sistema de chancado con fajas transportadoras desde el periodo 2022, como se observa en la Figura 36 el perfil de camiones mantiene la reducción con respecto al caso base. Las compras de camiones Komatsu 980 se han reducido entre 8% y 12% con respecto al caso base. Esto se traduce en un ahorro de Capex por compras de camiones.

Tabla 15: Compras de camiones Komatsu 980.

	Compras K980	Delta		Ahorro (M US\$)
Caso Test	147	-	-	-
Caso A	130	-17	-12%	-\$110.5
Caso B	135	-12	-8%	-\$78.0
Caso C	130	-17	-12%	-\$110.5

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 16: Inversión en compras de camiones.

	CAPEX Camión	
Test	US\$M	955.5
Caso A	US\$M	845.0
Caso B	US\$M	877.5
Caso C	US\$M	845.0

Fuente: Elaboración propia.

La variable del sistema de acarreo de chancadora y fajas transportadoras requiere de una inversión de capital, tenemos la inversión para cada uno de los casos para evaluar su efecto lo podemos comparar con el ahorro que se obtuvo en la compra de camiones (ver Tabla 17).

Tabla 17: Resumen de Capex.

	CAPEX Proyecto	Ahorro CAPEX Camión	CAPEX Adicional
Caso A	US\$M 194.8	US\$M -110.5	US\$M 84.3
Caso B	US\$M 146.0	US\$M -78.0	US\$M 68.0
Caso C	US\$M 168.8	US\$M -110.5	US\$M 58.3

Fuente: Elaboración propia.

Entonces, el capital de inversión considerado para cada uno de los casos ha sido resumido en la Tabla 17 y Figura 37, el delta de capital adicional es el que se presenta en la última columna. Desde la perspectiva de los inversionistas estos resultados deben de ser sustentados por mejoras en el Opex o valor agregado a la operación (ambiental, social o eficiencia) que buscan generar confianza para continuar con los estudios a detalle y aplicar la inversión.

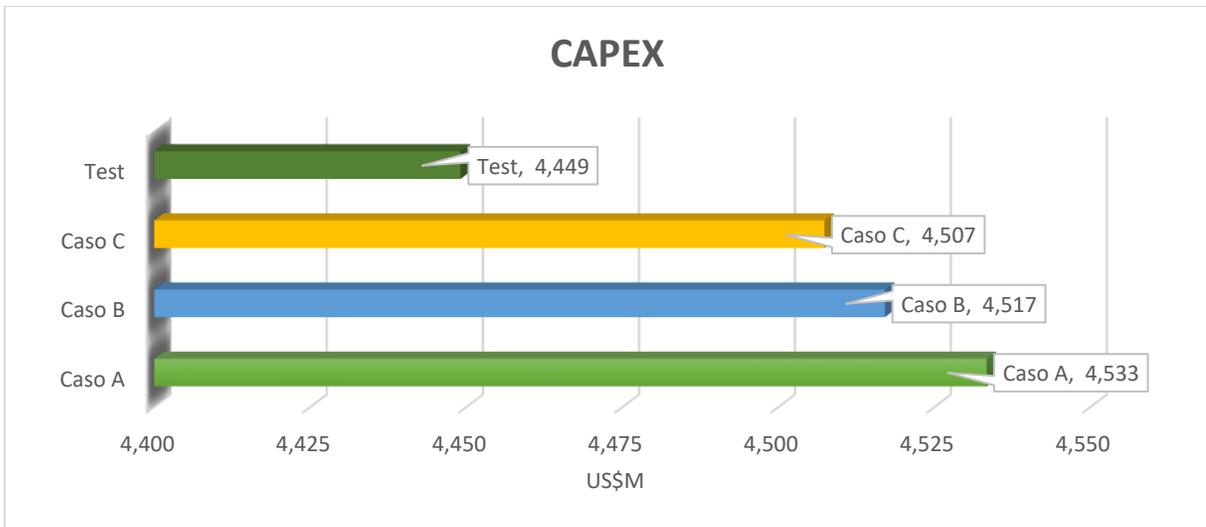


Figura 37: Resumen de Capex - Comparación.

Fuente: Elaboración propia.

4.5.2. Opex

Para un proyecto de gran inversión es necesario demostrar que los efectos positivos se verán a largo plazo, y por lo tanto el costo de inversión será recuperado en próximos periodos por el ahorro en los costos operativos. Para cumplir el plan de minado se considera el costo operativo de carguío, perforación y voladura agrupado en el costo Opex Mina, es decir, el costo de acarreo se ha separado del total de operaciones mina para ser evaluado en la presente investigación.

Para el cálculo del Opex total del plan minero también se ha separado el costo operativo de procesamiento en planta y el costo de soporte, a continuación, la Tabla 18 presenta el resumen de los costos operativos.

Tabla 18: Resumen Opex del plan minero.

OPEX Plan		
Costo Mina*	US\$M	3401
Costo Procesamiento	US\$M	4496
Costo Soporte	US\$M	2936
Total	US\$M	10834

*No considera costo de acarreo.

Fuente: Elaboración propia.

Para el cálculo del Opex de acarreo se consideran las horas efectivas de operación simuladas en el software MineHaul®.

Tabla 19: Horas de acarreo total estimadas en MineHaul®.

Horas total estimadas		
Test	k Hrs	12,148
Caso A	k Hrs	10,994
Caso B	k Hrs	11,315
Caso C	k Hrs	10,966

Fuente: Elaboración propia.

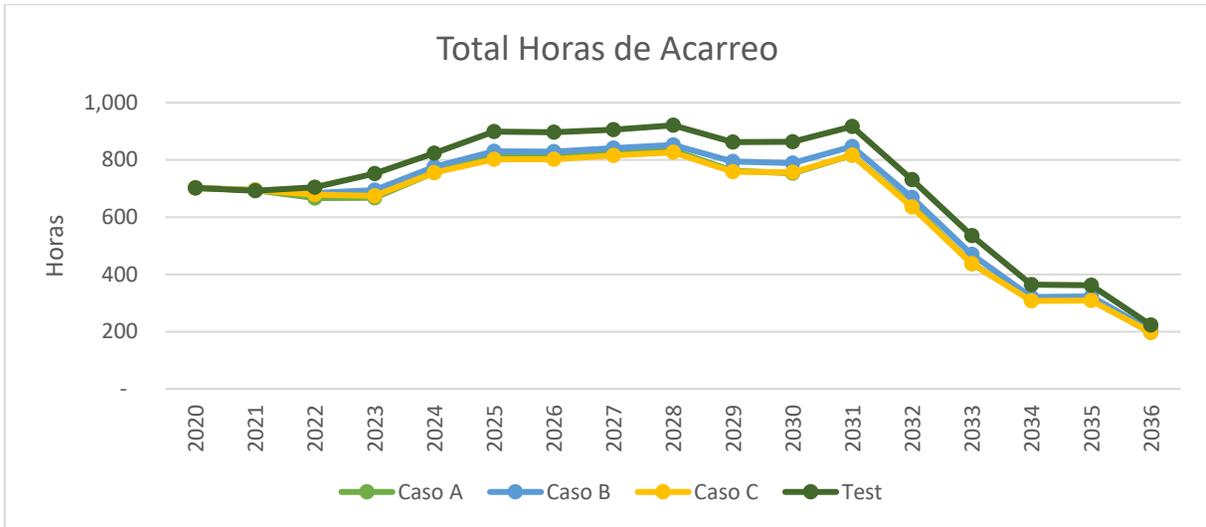


Figura 38: Comparación del total de horas de acarreo estimadas.

Fuente: Elaboración propia.

Por la estimación de horas de acarreo necesarias para cada caso en las simulaciones realizadas en el software MineHaul®, calculamos el costo total de acarreo. El costo por cada mil horas de acarreo (k Hrs) es de US\$ 0.36 considerado para todos los periodos y para calcular el costo de chancado y acarreo el costo unitario por tonelada / kilómetro de faja es US\$ 0.23. A continuación, en la Tabla 20 el resumen de Opex de acarreo obtenido por cada caso:

Tabla 20: Resumen de costo operativo de acarreo.

	Opex de acarreo (camiones) (Chancado y Fajas)		Total	Delta	
Test	US\$M 4,373	US\$M -	US\$M 4,373.2	US\$M -	-
Caso A	US\$M 3,958	US\$M 179	US\$M 4,136.5	US\$M -	236.7 -5.72%
Caso B	US\$M 4,073	US\$M 179	US\$M 4,252.2	US\$M -	121.0 -2.85%
Caso C	US\$M 3,948	US\$M 179	US\$M 4,126.4	US\$M -	246.7 -5.98%

Fuente: Elaboración propia.

El costo operativo de las fajas para los casos A, B y C es el mismo debido a que el plan requiere de enviar el mismo tonelaje por las fajas transportadoras.

Tabla 21: Tonelaje enviado por el sistema de chancado y fajas transportadoras de desmante.

Periodos	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036
Mat. Chancadora y Fajas (Mt)	30.8	61.6	61.7	61.6	61.6	61.6	61.7	61.6	61.6	61.6	61.7	61.6	25.8	29.1	13.4

Fuente: Elaboración propia.

Se puede comprobar que la inversión en el proyecto del sistema de chancado y transporte por fajas para el desmante genera un ahorro considerable en el costo operativo de acarreo (ver Figura 39). El reducir los costos operativos significa que la inversión en el proyecto ha generado impactos económicos positivos, convirtiendo el acarreo más eficiente cuando se implementa la chancadora y fajas transportadoras de desmante.

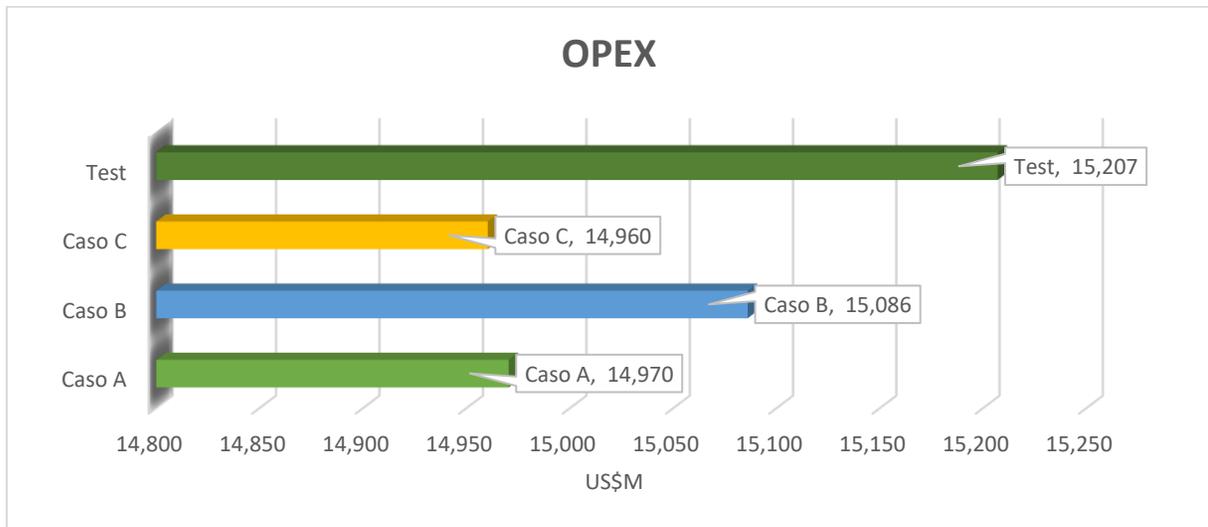


Figura 39: Resumen de Opex- Comparación.

Fuente: Elaboración propia.

4.5.3. Evaluación económica

En el análisis de los casos se han definido los resultados del Capex y Opex específicamente debido a que sus resultados han sido afectados directamente por la variable en estudio, la ubicación de la chancadora e implementación de fajas transportadoras. Pero para poder analizar el valor real de nuestro proyecto debemos considerar el flujo efectivo neto de cada caso, como se ha

considerado un mismo plan minero para todos los casos, los ingresos, cargos de realización, impuestos, costos de cierre y capital de trabajo utilizados han sido definidos desde el caso base.

Tabla 22: Ingresos e impuestos del plan.

Ingresos	US\$M	60,422
Cargos de Realización	US\$M -	6,989
Impuesto	US\$M -	13,540
Costos de Cierre	US\$M	133
Capital de Trabajo	US\$M	232

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se desarrolla el detalle de la evaluación económica para cada caso evaluado.

Tabla 23: Evaluación económica de los casos desarrollados. Resumen.

			2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028									
Test	Ingresos	US\$M	-	3,884	3,859	3,710	3,503	3,483	3,910	4,241	3,752	3,847									
	Cargos de Realización	US\$M	-	-	572	-	507	-	443	-	402	-	370	-	512	-	448	-	388	-	415
	OPEX	US\$M	-	-	897	-	902	-	913	-	941	-	950	-	1,031	-	1,028	-	1,027	-	998
	CAPEX	US\$M	-	-	624	-	490	-	399	-	463	-	372	-	301	-	530	-	492	-	248
	Impuesto	US\$M	-	-	895	-	924	-	888	-	792	-	788	-	810	-	942	-	884	-	834
	Costos de Cierre	US\$M	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-								
	Capital de Trabajo	US\$M	-	-	7	-	26	-	11	-	18	-	9	-	32	-	26	-	36	-	21
	Flujo de Efectivo Neto	US\$M	-	-	903	-	1,011	-	1,077	-	924	-	995	-	1,224	-	1,267	-	998	-	1,330

			2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037									
Test	Ingresos	US\$M	3,851	4,335	3,645	3,017	3,651	3,774	3,047	915	-									
	Cargos de Realización	US\$M	-	427	-	458	-	377	-	373	-	514	-	423	-	282	-	78	-	
	OPEX	US\$M	-	1,006	-	1,008	-	1,009	-	873	-	815	-	713	-	674	-	411	-	13
	CAPEX	US\$M	-	127	-	230	-	105	-	27	-	10	-	-	-	-	-	13	-	19
	Impuesto	US\$M	-	822	-	954	-	898	-	572	-	637	-	882	-	836	-	259	-	76
	Costos de Cierre	US\$M	-	-	-	-	3	25	30	20	25	30								
	Capital de Trabajo	US\$M	-	8	-	56	-	81	-	50	-	71	-	37	-	63	-	207	-	46
	Flujo de Efectivo Neto	US\$M	-	1,460	-	1,629	-	1,337	-	1,224	-	1,629	-	1,748	-	1,338	-	387	-	120

			2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028										
Caso A	Ingresos	US\$M	-	3,884	3,859	3,710	3,503	3,483	3,910	4,241	3,752	3,847										
	Cargos de Realización	US\$M	-	-	572	-	507	-	443	-	402	-	370	-	512	-	448	-	388	-	415	
	OPEX	US\$M	-	-	897	-	903	-	907	-	925	-	939	-	1,014	-	1,011	-	1,011	-	981	
	CAPEX	US\$M	-	75	-	624	-	516	-	406	-	476	-	353	-	302	-	530	-	492	-	229
	Impuesto	US\$M	-	-	895	-	924	-	888	-	792	-	788	-	810	-	942	-	884	-	834	
	Costos de Cierre	US\$M	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-									
	Capital de Trabajo	US\$M	-	-	7	-	26	-	11	-	18	-	9	-	32	-	26	-	36	-	21	
	Flujo de Efectivo Neto	US\$M	-	75	-	903	-	985	-	1,077	-	927	-	1,024	-	1,240	-	1,283	-	1,013	-	1,366

		2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	
Caso A	Ingresos	US\$M	3,851	4,335	3,645	3,017	3,651	3,774	3,047	915	-
	Cargos de Realización	US\$M	- 427	- 458	- 377	- 373	- 514	- 423	- 282	- 78	-
	OPEX	US\$M	- 984	- 983	- 987	- 855	- 794	- 700	- 662	- 404	- 13
	CAPEX	US\$M	- 121	- 237	- 105	- 27	- 10	-	-	- 13	- 19
	Impuesto	US\$M	- 822	- 954	- 898	- 572	- 637	- 882	- 836	- 259	76
	Costos de Cierre	US\$M	-	-	-	3	25	30	20	25	30
	Capital de Trabajo	US\$M	- 8	- 56	81	50	- 71	- 37	63	207	46
	Flujo de Efectivo Neto	US\$M	1,488	1,647	1,358	1,242	1,650	1,762	1,350	394	120

		2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	
Caso B	Ingresos	US\$M	-	3,884	3,859	3,710	3,503	3,483	3,910	4,241	3,752	3,847
	Cargos de Realización	US\$M	-	- 572	- 507	- 443	- 402	- 370	- 512	- 448	- 388	- 415
	OPEX	US\$M	-	- 897	- 903	- 913	- 934	- 946	- 1,020	- 1,017	- 1,018	- 987
	CAPEX	US\$M	- 30	- 624	- 535	- 409	- 469	- 352	- 302	- 530	- 492	- 249
	Impuesto	US\$M	-	- 895	- 924	- 888	- 792	- 788	- 810	- 942	- 884	- 834
	Costos de Cierre	US\$M	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Capital de Trabajo	US\$M	-	7	26	11	18	9	32	26	36	21
	Flujo de Efectivo Neto	US\$M	- 30	903	965	1,068	924	1,017	1,234	1,277	1,006	1,340

		2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	
Caso B	Ingresos	US\$M	3,851	4,335	3,645	3,017	3,651	3,774	3,047	915	-
	Cargos de Realización	US\$M	- 427	- 458	- 377	- 373	- 514	- 423	- 282	- 78	-
	OPEX	US\$M	- 996	- 995	- 998	- 865	- 805	- 704	- 667	- 407	- 13
	CAPEX	US\$M	- 121	- 230	- 105	- 27	- 10	-	-	- 13	- 19
	Impuesto	US\$M	- 822	- 954	- 898	- 572	- 637	- 882	- 836	- 259	76
	Costos de Cierre	US\$M	-	-	-	3	25	30	20	25	30
	Capital de Trabajo	US\$M	- 8	- 56	81	50	- 71	- 37	63	207	46
	Flujo de Efectivo Neto	US\$M	1,477	1,641	1,348	1,232	1,639	1,758	1,345	391	120

		2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	
Caso C	Ingresos	US\$M	-	3,884	3,859	3,710	3,503	3,483	3,910	4,241	3,752	3,847
	Cargos de Realización	US\$M	-	- 572	- 507	- 443	- 402	- 370	- 512	- 448	- 388	- 415
	OPEX	US\$M	-	- 897	- 902	- 911	- 927	- 939	- 1,010	- 1,008	- 1,009	- 978
	CAPEX	US\$M	- 50	- 624	- 529	- 398	- 469	- 347	- 302	- 530	- 492	- 235
	Impuesto	US\$M	-	- 895	- 924	- 888	- 792	- 788	- 810	- 942	- 884	- 834
	Costos de Cierre	US\$M	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Capital de Trabajo	US\$M	-	7	26	11	18	9	32	26	36	21
	Flujo de Efectivo Neto	US\$M	- 50	903	972	1,081	931	1,030	1,244	1,286	1,016	1,363

		2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	
Caso C	Ingresos	US\$M	3,851	4,335	3,645	3,017	3,651	3,774	3,047	915	-
	Cargos de Realización	US\$M	- 427	- 458	- 377	- 373	- 514	- 423	- 282	- 78	-
	OPEX	US\$M	- 983	- 984	- 987	- 853	- 794	- 699	- 661	- 405	- 13
	CAPEX	US\$M	- 128	- 230	- 105	- 27	- 10	-	-	- 13	- 19
	Impuesto	US\$M	- 822	- 954	- 898	- 572	- 637	- 882	- 836	- 259	76
	Costos de Cierre	US\$M	-	-	-	3	25	30	20	25	30
	Capital de Trabajo	US\$M	- 8	- 56	81	50	- 71	- 37	63	207	46
	Flujo de Efectivo Neto	US\$M	1,483	1,653	1,358	1,244	1,650	1,763	1,350	394	120

Fuente: Elaboración propia.

El resumen del flujo de efectivo neto obtenido en cada caso en la Figura 40.

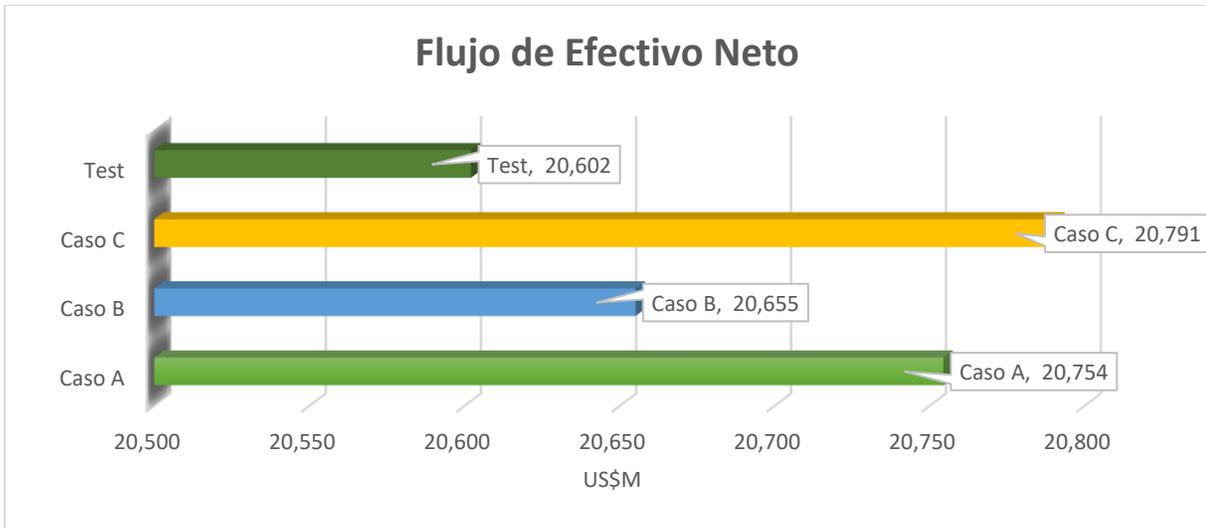


Figura 40: Resumen de Flujo de Efectivo Neto - Comparación.

Fuente: Elaboración propia.

De la Figura 40 podemos concluir que todos los casos con implementación de chancadora y fajas transportadoras para desmonte tienen más valor que el caso base, pero aún debemos comprobar esta afirmación con los indicadores financieros, más aún si se tratan de proyectos que requieren de una gran inyección de capital en los primeros años.

Como este proyecto consiste en la implementación de una tecnología para la mejora de una operación minera que ya presenta ganancias no podemos obtener un Valor Actual Neto del flujo de efectivo neto de cada caso por separado, se debe evaluar la diferencia con respecto al caso sin proyecto (Caso Test) así se obtendrán los resultados directos por la inversión y su mejora, si es factible su implementación en la operación.

Caso A – Caso Test:

Tabla 24: Flujo de efectivo incremental. Caso A - Caso Test.

A-Test	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037
Flujo de Efectivo Incremental	US\$M - 75	- 0	- 27	- 0	3	29	16	16	15	37	28	18	21	18	21	13	11	6	-
Flujo Acumulado Descontado	US\$M - 75	- 75	- 102	- 102	- 99	- 70	- 54	- 37	- 22	15	43	61	82	100	121	135	146	152	152

Fuente: Elaboración propia.

Para conocer el valor del proyecto aplicamos los indicadores:

VAN (8%) = US\$ 22.49 M

TIR = 11%

Payback = 7mo año de operación de la chancadora y fajas transportadoras.

Caso B – Caso Test:

Tabla 25: Flujo de efectivo incremental. Caso B - Caso Test.

B-Test	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	
Flujo de Efectivo Incremental	US\$M	- 30	- 0	- 46	- 10	0	23	10	10	9	10	16	12	11	8	9	10	7	3	-
Flujo Acumulado Descontado	US\$M	- 30	- 30	- 76	- 86	- 86	- 63	- 53	- 43	- 34	- 24	- 8	4	15	23	33	42	50	53	53

Fuente: Elaboración propia.

Indicadores económicos:

VAN (8%) = US\$ -10.44 M

TIR = 6%

Payback = 9no año de operación de la chancadora y fajas transportadoras.

Caso C – Caso Test:

Tabla 26: Flujo de efectivo incremental. Caso C - Caso Test.

C-Test	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	
Flujo de Efectivo Incremental	US\$M	- 50	- 0	- 40	3	7	35	20	19	18	33	22	24	21	20	21	14	12	6	-
Flujo Acumulado Descontado	US\$M	- 50	- 50	- 90	- 87	- 79	- 44	- 24	- 5	14	47	69	93	115	135	155	170	182	188	188

Fuente: Elaboración propia.

Indicadores económicos:

VAN (8%) = US\$ 51.61 M

TIR = 15%

Payback = 6to año de operación de la chancadora y fajas transportadoras.

Mediante esta evaluación podemos comparar cada una de las alternativas de ubicación, económicamente la mejor alternativa es el Caso C.

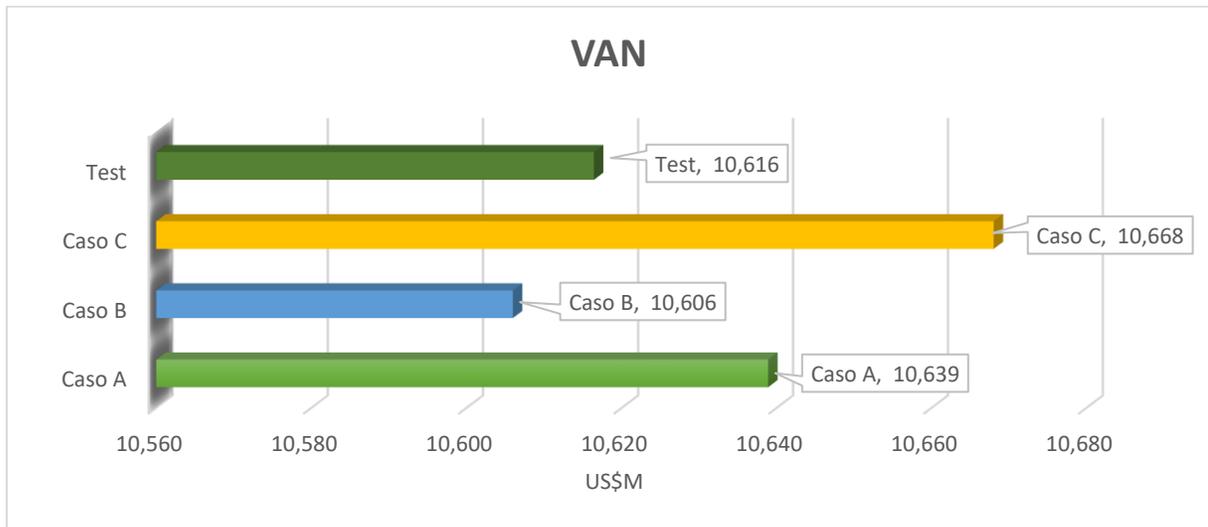


Figura 41: Resumen Valor Actual Neto - Comparación.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 27: Resumen de evaluación económica.

	Inversión	VAN	TIR	PAYBACK
Caso Test -	US\$M	10,616	-	-
Caso A	194.8 US\$M	22.5	11%	7 años
Caso B	146.0 US\$M	-10.4	6%	9 años
Caso C	168.8 US\$M	51.6	15%	6 años

Fuente: Elaboración propia.

4.5.4. Productividad de acarreo

Gracias a los resultados de la simulación conocemos los efectos en la productividad de acarreo, a partir del año en que inicia la operación de la chancadora de desmonte y las fajas transportadoras la productividad de acarreo se incrementa, pero esto es sólo parte del beneficio.

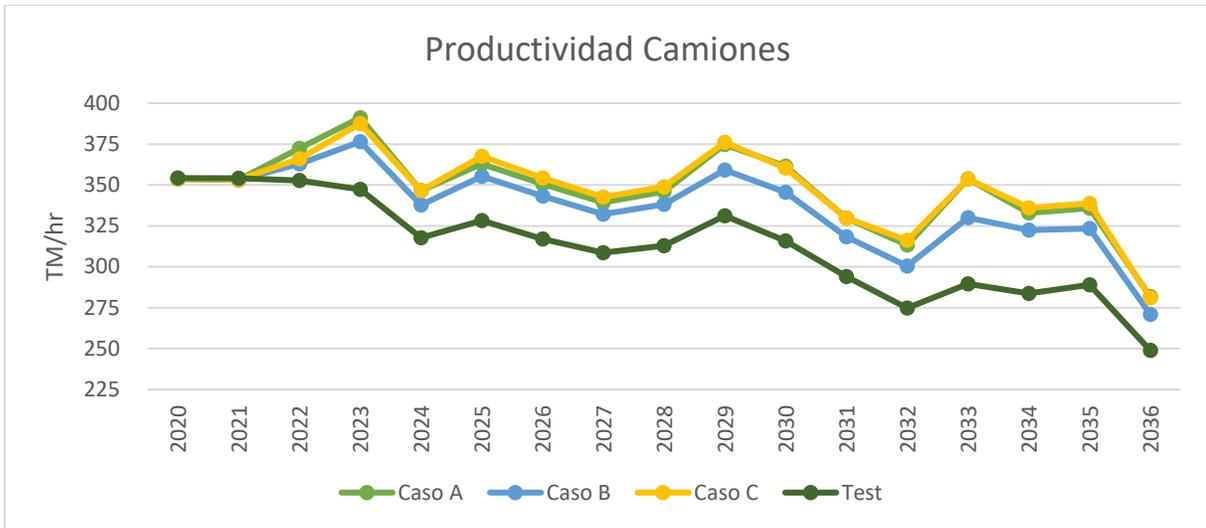


Figura 42: Productividad de acarreo - Comparación.

Fuente: Elaboración propia.

El incremento de productividad de acarreo nos permite transportar la misma cantidad de tonelaje con menos cantidad de camiones, lo cual se confirma en la reducción de compra de camiones, en mina al tener fases de producción activas (desde 3 hasta 5 por periodo) las vías de salida del pit se bloquean por parámetros de seguridad en el minado, lo cual impide el libre tránsito de los camiones, esto obliga a tener gran cantidad de camiones circulando por la misma ruta. Es por eso que otro objetivo primordial para Antamina es mantener su perfil de camiones lo más reducido que las tecnologías nos lo permitan. Reducir el número de camiones en producción también reduce la congestión que se genere en las vías principales e incluso su mantenimiento, que incluyendo las condiciones climáticas es un punto importante para la operación.

Entonces, mientras menor sea la distancia utilizada por los camiones, la operación será más segura.

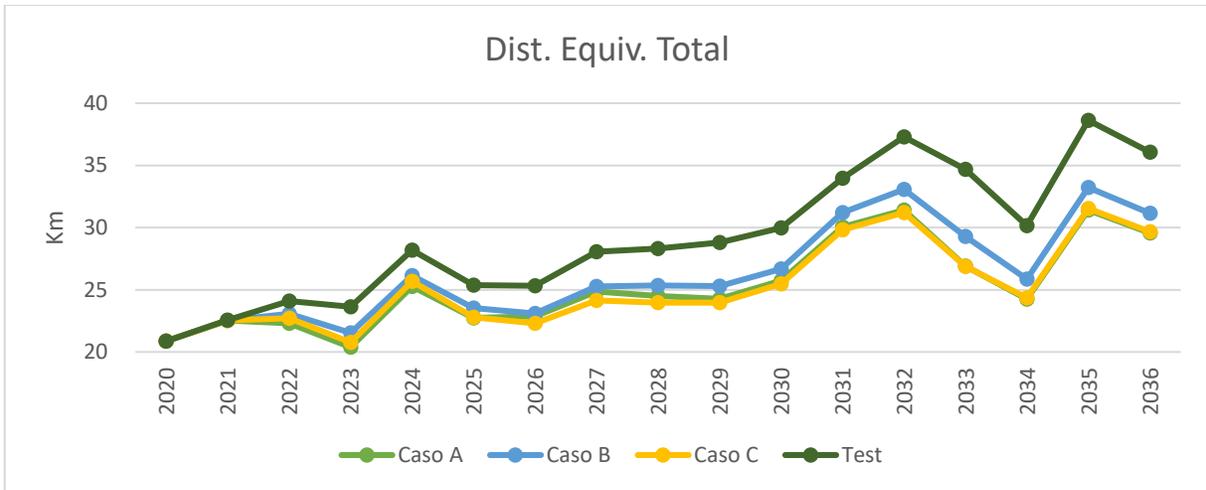


Figura 43: Distancia equivalente total - Comparación.

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, los tiempos de operación contienen demoras no programadas que dependen de las condiciones de los equipos y sus componentes o partes, el mantenimiento programado de los equipos se realiza después de una cantidad de horas operativas del equipo. Es decir, si se reducen las distancias recorridas, es menos probable que las demoras no programadas ocurran tan seguido, y al aumentar la productividad de los equipos su mantenimiento será menos frecuente.

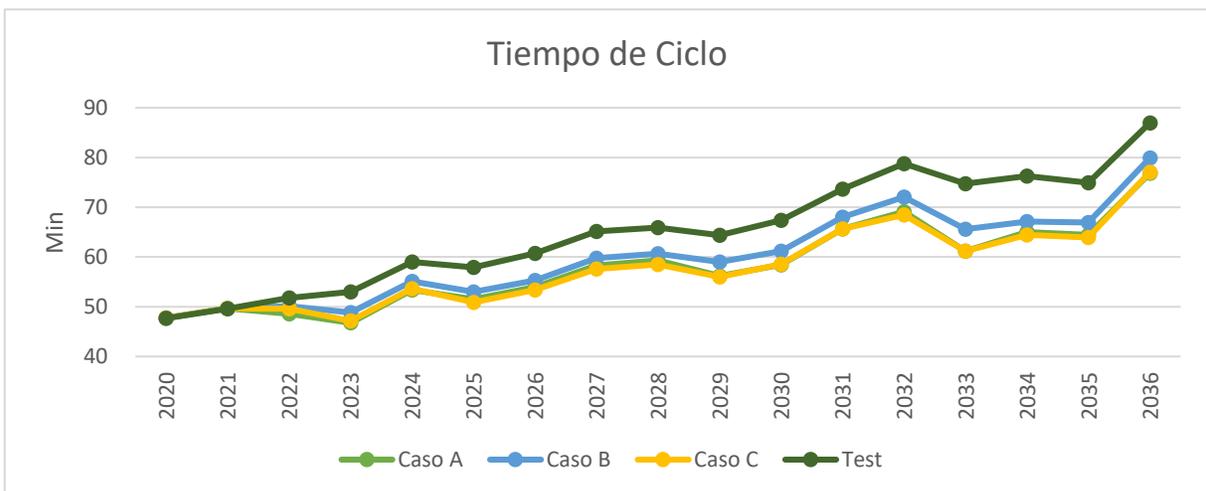


Figura 44: Tiempos de ciclo - Comparación.

Fuente: Elaboración propia.

El objetivo de toda empresa es demostrar la eficiencia de sus operaciones, esto se demuestra en el costo unitario de acarreo que se consigue con la implementación del proyecto, demuestra que se ha logrado el mismo plan (objetivo) con menores costos (recursos).

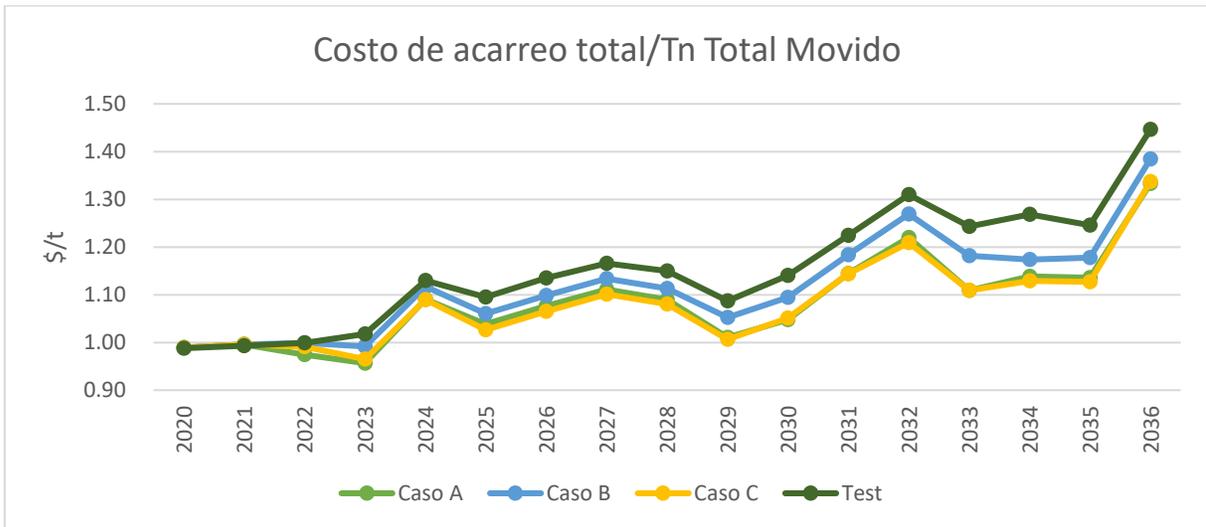


Figura 45: Costo unitario de acarreo - Comparación.

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO V: DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La implementación de un sistema de chancado de desmonte y fajas transportadoras como sistema de acarreo ha sido analizado mediante la simulación en el software MineHaul®, esto nos permite obtener los resultados necesarios para calcular la productividad de acarreo a través de la vida de mina de un plan minero. Se ha demostrado que la productividad se ha incrementado desde el periodo que inicia el funcionamiento del sistema de acarreo (2022). Para confirmar estadísticamente la hipótesis se presenta el ANOVA para la productividad.

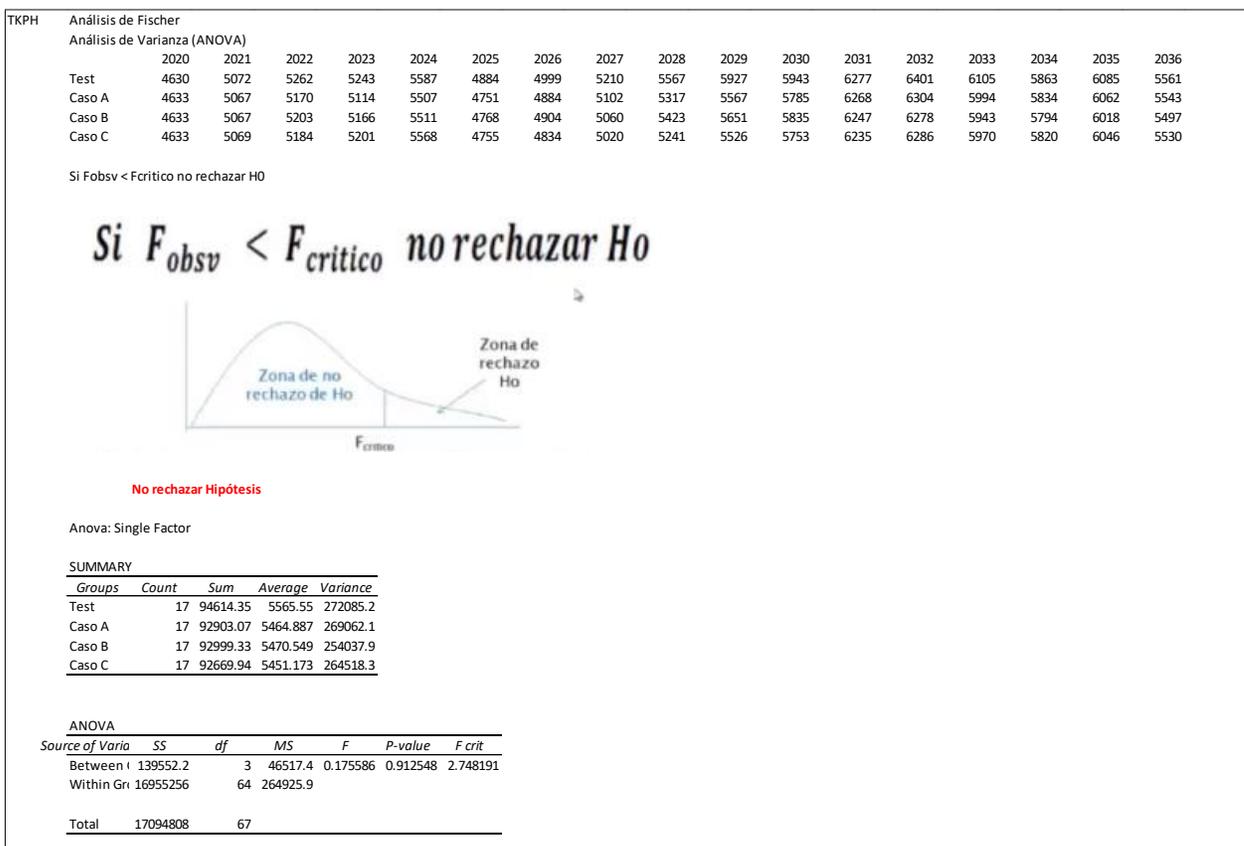


Figura 46: Análisis de varianza para la productividad toneladas/kilómetro.hora

Fuente: Elaboración propia.

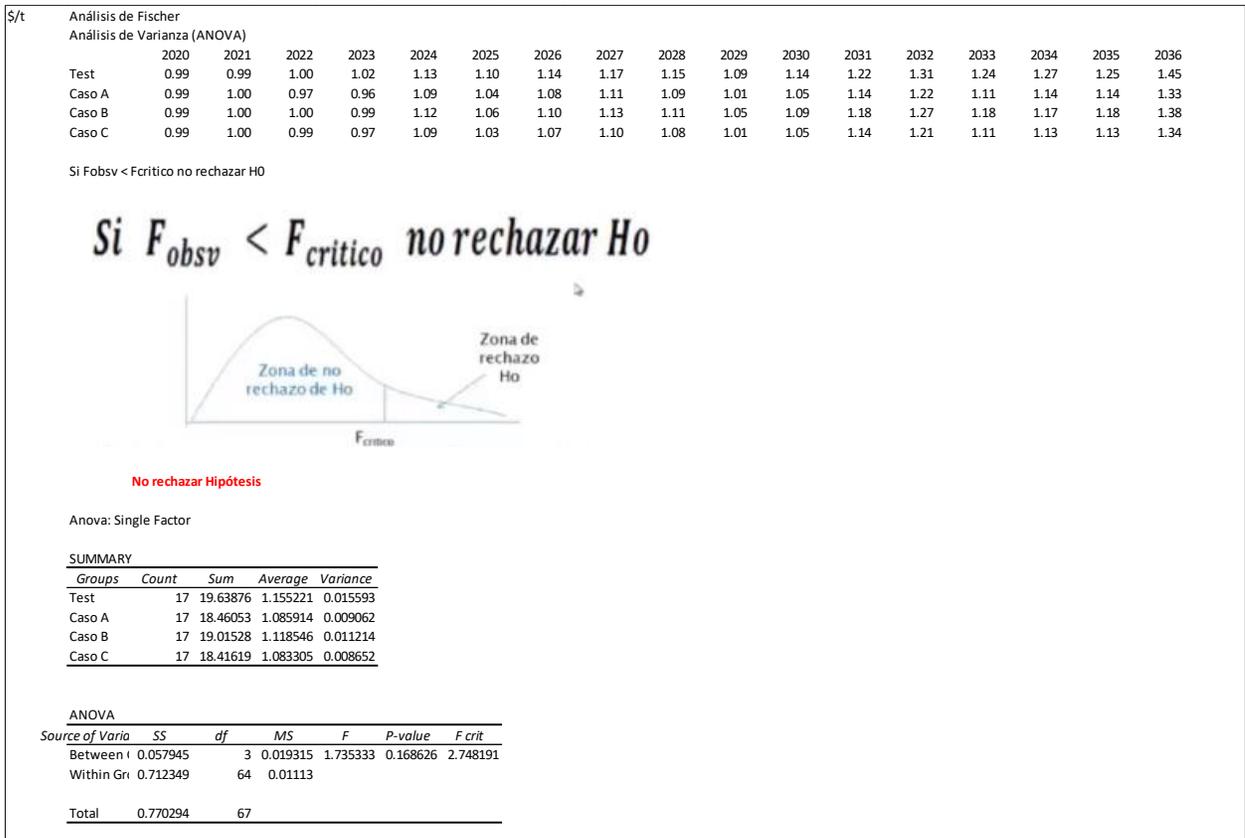


Figura 47: Análisis de varianza para costo de acarreo US\$/t.

Fuente: Elaboración propia.

Mediante los resultados presentados y el análisis de varianza realizado a estos resultados se confirma la hipótesis planteada, el sistema de acarreo incrementa la productividad de acarreo por lo tanto disminuye el costo unitario.

La ubicación del sistema también influye en los resultados obtenidos, con los resultados económicos se puede confirmar que el Caso C es el que tiene mayor valor económico, sin embargo, la productividad de acarreo se incrementa con mayores resultados en el Caso A y Caso C, siendo mayores que el Caso B, la diferencia es que tanto el Caso A y Caso C se encuentran en una ubicación más cercana al pit por lo cual confirma nuestra segunda hipótesis, mientras menor sea la distancia expit hacia la chancadora, será mayor el beneficio.

Finalmente podemos confirmar que todos los casos de implementación son económicamente, técnica y ambientalmente viables. Económicamente el Caso A y Caso C generan mayores beneficios a pesar de la inversión de los primeros años, eso se confirma con el VAN y TIR obtenido en cada caso, técnicamente incrementan la productividad de los equipos, optimizando tiempos y mantenimiento de equipos, ambientalmente el uso de energía eléctrica es más ecoamigable que el consumo de combustible e incluso la reducción de los camiones que genera el sistema de chancado y fajas transportadoras.

CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES

6.1. CONCLUSIÓN GENERAL

- Se concluye que al evaluar los tres casos afectados por la variable de la ubicación de la chancadora (A, B y C) con el software MineHaul® se obtuvo resultados favorables en la productividad de acarreo para todos los casos con respecto al caso base, que incrementan 10.89% (A), 7.57% (B) y 11.14%(C). Siendo las ubicaciones A y C las mejores opciones por el incremento de productividad obtenido.

6.2. CONCLUSIONES ESPECÍFICAS

- La mejor ubicación para el sistema de chancado y fajas transportadoras es la C, la cual se encuentra cerca de una de las salidas del pit, y está a una distancia de 5.7 km del punto de descarga en el botadero Yanacancha.
- Económicamente, no todos los casos son más viables que el caso base, puesto que el caso base tiene mejor valor actual neto que el caso B, esto se debe a la fuerte inversión que requiere la implementación del proyecto y el reducido ahorro en costo operativo que genera la ubicación seleccionada. Sin embargo, tanto el caso A como el C tiene mayor valor que el caso base evaluado, la tasa interna de retorno incremental obtenido para el caso A y C son mayores que el costo de oportunidad considerado (8%) y de los 15 años de operación de la chancadora y fajas transportadoras se logra pagar su inversión en la primera mitad de vida de los equipos. Estos resultados sólo consideran

las ganancias que genera la implementación del sistema de chancado y fajas frente a no realizar el proyecto.

Tabla 28: Conclusiones de los casos evaluados.

Casos		Test	A	B	C
Productividad	TM/H	312.95	347.03	336.65	347.8
VAN (8%)	US\$ M	10,616	10,639	10,606	10,668
TIR	%	-	11	6	15
PAYBACK	Año de operación	-	7	9	6

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO VII: RECOMENDACIONES

Antamina con más de 18 años de operación a cielo abierto tiende a incrementar su flota de acarreo por la profundización de sus fases y el agotamiento de la capacidad de sus botaderos cercanos, sin embargo, el incremento de camiones perjudica la seguridad y eficacia de sus operaciones. Por eso la búsqueda de alternativas de acarreo que permitan incrementar la productividad de sus operaciones es primordial para el área de planeamiento minero. El avance de las tecnologías e innovaciones a nivel mundial nos permiten evaluar muchas alternativas bajo diferentes escenarios hasta tomar la decisión más adecuada.

La implementación del sistema de chancado y fajas transportadoras para desmonte es una alternativa viable para Antamina tanto económica como técnica, que permite incrementar la productividad el proceso más costoso (acarreo) del flujo productivo de la mina. Aunque es necesaria realizar una inyección de capital muy fuerte los primeros periodos, el resultado que se obtiene por el ahorro en el acarreo paga la inversión e incluso genera mayores ganancias económicas, además permite a la operación minera disminuir su impacto ambiental al reducir su cantidad de camiones y por lo tanto consumo en combustible.

Mediante la metodología de evaluación, se utilizó un mismo plan minero para todas las evaluaciones para mantener la misma capacidad de carguío y perforación, este plan generó las mismas ganancias para que no se afectara indirectamente cada evaluación. Así se obtuvo como resultados diferencias en el costo operativo (OPEX) de acarreo y diferencias en el capital de

inversión (CAPEX) designado al proyecto de implementación y el incremento de camiones para completar el plan minero.

El software MineHaul® es una herramienta flexible, rápida y fácil de utilizar para la estimación de la flota de acarreo, permite al usuario tener el control y restringir o buscar objetivos de descargas en la secuencia, de esta forma se pueden simular todos los escenarios posibles que permitan comparar determinados factores o variables que puedan generar valor en el negocio. Gráficamente le permite analizar e interpretar al usuario los resultados obtenidos periodo a periodo y así comprender el funcionamiento del plan minero utilizado y su efecto en el acarreo.

Cuando se evalúan proyectos que requieren de grandes inversiones, es necesario analizar cada escenario posible sea positivo o negativo para la inversión, esto permite generar confianza en el proyecto, para la estimación de camiones se tienen muchos softwares reconocidos comercialmente, pero por tener poco tiempo para los estudios estos softwares demoran mucho generando los resultados a los problemas propuestos y no se logra terminar con todas las interrogantes que se tienen en los estudios. Por eso MineHaul® es una herramienta potente recomendada para el análisis estratégico de los proyectos que afecten el acarreo en minas a cielo abierto. Además, para estudios con implementación de fajas transportadoras es ideal con las nuevas herramientas que presenta el software, permite al usuario simular el uso de fajas transportadoras en cualquier ubicación y generando la secuencia de descarga como se requiera.

Se recomienda realizar un mayor análisis del capital inversión que se requiere para el proyecto y reevaluar su rentabilidad, ya que la inversión utilizada para la presente investigación ha sido tomada de supuestos en referencia a otros estudios realizados en otras minas. Sin embargo, los

costos operativos han sido evaluados a detalle con la data histórica y costo por chancado y faja de otras investigaciones.

Para obtener el valor de los casos en la presente investigación se ha tomado el método del valor de efecto en el perfil de camiones, sin embargo, también se podría reevaluar los casos incrementando el minado y obteniendo mayor valor con el plan minero, así mismo, aprovechar la mejor productividad que otorga el sistema de chancado y fajas transportadoras.

El incremento de camiones se podría reducir si se implementara una segunda chancadora de desmonte y su sistema de fajas transportadoras en el periodo 2024 o 2025, esta es una alternativa de evaluación para la investigación.

CAPÍTULO VIII: BIBLIOGRAFÍA

Alfaro, C. (2012). Metodología de investigación científica aplicado a la ingeniería. Informe final de proyecto de investigación). Facultad de ingeniería eléctrica y electrónica. Universidad Nacional del Callao.

Banda, N. (2016). Evaluation of two different mechanized earth moving technologies truck and shovel and IPCC for handling material from a large open pit mine using requisite design and operational conditions, efficiency, cost, skills and safety as criteria using sishen iron ore mine as a case study (Doctoral dissertation).

Conde, M., & Casimiro, A. (2008). Análisis de sistemas de extracción y planeamiento estratégico de profundización de mina.

Cueva, E., Mostacero, J. A., & Aguilar, J. C. (2017) Geología y Alcances Generales del Yacimiento Minero de Antamina, Perú.

Darling, P. (Ed.). (2011). SME mining engineering handbook (Vol. 1). SME.

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2010). Metodología de la investigación (Vol. 3). México: McGraw-Hill.

INGEMMET (2017). GEOCATMIN: Sistema de Información Geológico y Catastral Minero para el Desarrollo del País. Recuperado de <http://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/>

- Lopes, J. R. (2010). Viabilização técnica e econômica da lavra contínua de minério de ferro com o uso de sistema de britagem móvel “in pit” auto propelido.
- Lozada, L., Espinoza J. (2010). Technical Report Mineral Reserves And Resources, Antamina Deposit, Perú 2010
- Mete, M. R. (2014). Valor actual neto y tasa de retorno: su utilidad como herramientas para el análisis y evaluación de proyectos de inversión. Fides et Ratio-Revista de Difusión cultural y científica de la Universidad La Salle en Bolivia, 7(7), 67-85.
- MINEM (2016). Decreto Supremo N° 024-2016-EM: Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería. Diario El Peruano.
- Morriss, P. Turnbull, D. and Hill, J. (2008). Sishen Mine IPCC Review Scoping Study- In-pit Waste Crushing and Conveying.
- Munier, N. (2011). Procedimiento fundamentado en la programación lineal para la selección de alternativas en proyectos de naturaleza compleja y con objetivos.
- Percca, L., & Eduardo, E. (2016). Modelo de estimación y comparación de velocidades reales vs simuladas de los camiones komatsu 930E en MINERA LOS PELAMBRES–Antofagasta Minerals Chile.
- Reyes, C., & Del Cisne, M. (2017). Proyecto de inversión en base a la aplicación de Payback y Van.

Ribeiro, B. G. C. (2013). Estudo de viabilidade econômica para a implantação de correias transportadoras de Rom de minério de ferro: estudo de caso da Mina Fábrica em Congonhas, Estado de Minas Gerais.

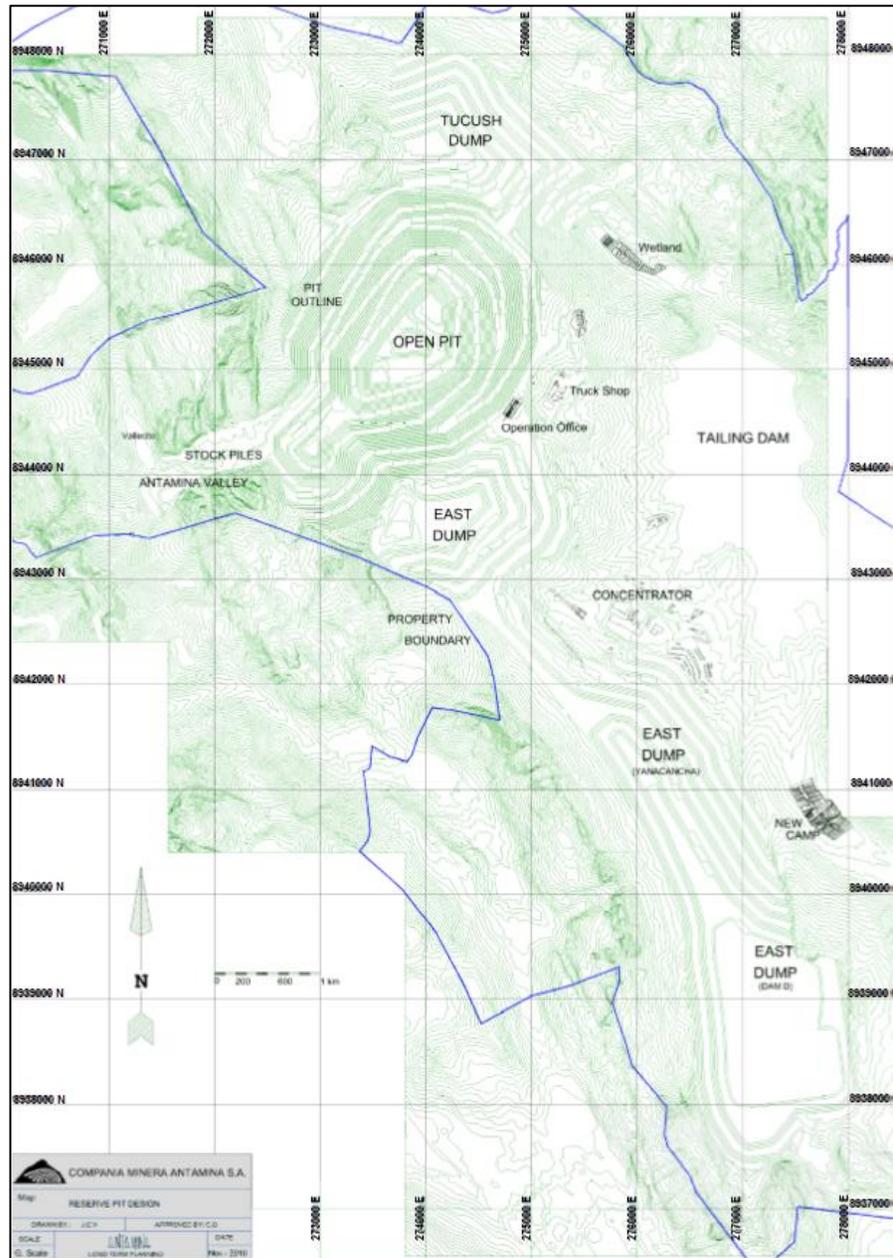
Ribeiro, B. G. C., Sousa, W. T. D., & Luz, J. A. M. D. (2016). Feasibility project for implementation of conveyor belts in an iron ore mine. Study case: Fabrica Mine in Minas Gerais State, Brazil. *Rem: Revista Escola de Minas*, 69(1), 79-83.

Runge, I. C. (1998). *Mining economics and strategy*. SME.

Tutton, D., & Streck, W. (2009). The application of mobile in-pit crushing and conveying in large, hard rock open pit mines. In *Mining Magazine Congress*, Canada.

CAPÍTULO IX: ANEXOS

Anexo A: Plano de ubicación



Fuente: Estimated Mineral Reserves and Resources, Antamina Deposit, Perú S.A. 2010.

Anexo B: Plan de producción

		2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028
Cut Off Grade (COG)		6	30	10	10	6	20	20	35	6
Mineral Minado a Planta > COG	Mt	50.39	53.29	55.23	55.87	50.24	56.64	55.43	56.35	48.78
Mineral Minado a Stock > COG	Mt	-	0.03	0.50	0.28	-	-	0.25	0.65	-
Mineral Minado a Stock LG < COG	Mt	-	3.28	0.42	0.16	-	0.54	0.69	3.52	-
Total Mineral Minado	Mt	50.39	56.59	56.15	56.31	50.24	57.17	56.37	60.52	48.78
Mineral de Stock HG a Planta	Mt	1.76	-	-	-	4.85	-	-	-	0.90
Mineral de Stock MG a Planta	Mt	-	-	-	-	-	-	-	-	4.50
Total Mineral Alimentado	Mt	52.15	53.29	55.23	55.87	55.09	56.64	55.43	56.35	54.18
Tasa de Alimentación	ktpd	144.87	148.02	153.42	155.18	153.03	157.33	153.96	156.52	150.51
Total Desmonte Minado	Mt	167.91	156.49	152.84	154.43	174.27	188.75	183.79	172.20	200.54
Total Minado (Producción)	Mt	218.29	213.08	208.99	210.73	224.51	245.93	240.16	232.72	249.32
Total No Producción	Mt	37.49	37.72	44.19	54.90	37.91	49.87	44.72	47.08	38.98
Total Movido	Mt	255.78	250.81	253.18	265.64	262.42	295.79	284.88	279.80	288.30

		2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036
Cut Off Grade (COG)		6	30	6	6	45	30	30	50
Mineral Minado a Planta > COG	Mt	54.27	57.12	51.43	50.12	56.41	55.36	48.07	14.73
Mineral Minado a Stock > COG	Mt	-	0.86	-	-	-	-	-	0.38
Mineral Minado a Stock LG < COG	Mt	-	2.12	-	-	7.75	2.22	3.55	2.16
Total Mineral Minado	Mt	54.27	60.09	51.43	50.12	64.16	57.58	51.62	17.26
Mineral de Stock HG a Planta	Mt	-	-	0.50	0.36	-	-	-	-
Mineral de Stock MG a Planta	Mt	-	-	3.41	-	-	-	-	-
Total Mineral Alimentado	Mt	54.27	57.12	55.34	50.48	56.41	55.36	48.07	14.73
Tasa de Alimentación	ktpd	150.76	158.66	153.73	140.22	156.69	153.77	133.54	40.91
Total Desmonte Minado	Mt	203.27	180.11	191.62	131.10	68.41	25.78	29.09	13.44
Total Minado (Producción)	Mt	257.54	240.20	243.06	181.22	132.57	83.36	80.71	30.70
Total No Producción	Mt	27.66	32.61	26.96	19.62	21.69	19.18	22.98	23.48
Total Movido	Mt	285.21	272.81	270.02	200.84	154.25	102.54	103.70	54.19

Fuente: Elaboración propia con fines de investigación.