

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**INCREMENTO DE VALOR DE UNA OPERACIÓN A TAJO ABIERTO MEDIANTE  
LA INCORPORACIÓN DE SISTEMAS DE CHANCADO Y FAJAS IN PIT (IPCCS)  
PARA EL TRANSPORTE DE DESMONTE**

**Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero de Minas**

**AUTORA:**

Carolina Yessenia Campos Valverde

**Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero de Minas**

**AUTOR:**

Alvaro Frank Rodriguez Tincopa

**ASESOR:**

Msc. Raúl Edgardo Espinoza Noriega


Lima, octubre de 2023

## Informe de Similitud

Yo, **Raul Edgardo Espinoza Noriega**, docente de la **Facultad de Ciencias e Ingeniería** de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor(a) de la tesis/el trabajo de investigación titulado: **Incremento de valor de una Operación a Tajo Abierto mediante la incorporación de Sistemas de Chancado y Fajas In Pit (IPCCS) para el transporte de Desmonte**, de los(as) autores(as) **CAROLINA YESSENIACAMPOS VALVERDE, ALVARO FRANK RODRIGUEZ TINCOPA**, dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de **8%**. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el **13/07/2022**.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de Suficiencia Profesional, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha: Lima Perú, 22 Junio del 2023

Apellidos y nombres del asesor / de la asesora: Espinoza Noriega, Raul Edgardo	
DNI: 09953022	 Firma
ORCID: 19941057	



## **RESUMEN**

La presente tesis evalúa la implementación de los sistemas *Inpit Crushing and Conveying (IPCCS)* como alternativa al sistema convencional pala-camión para el acarreo de desmonte en una operación minera a tajo abierto ubicado en la zona norte del Perú. Esta operación, debido a sus características geológicas, requiere desbrozar fases con un alto stripping ratio para exponer el mineral. Además, los botaderos de esta operación están localizados en puntos lejanos, generando distancias largas para el transporte del desmonte.

Los principales problemas que presenta el sistema convencional a largo plazo son: el incremento del costo de acarreo de material, el aumento de número de camiones, y el impacto negativo en el medio ambiente y la sociedad generadas por las emisiones de monóxido de carbono provenientes de los camiones mineros. Las razones mencionadas intervienen en la decisión de optar por sistemas semi mecanizados o mecanizados (IPCCS) en busca de minimizar costos y aumentar el valor de la operación, tanto económica como ambiental y socialmente.

Como punto de partida se desarrolla un plan de minado optimizado a largo plazo y se evalúa el número de sistemas a incorporar y las posibles ubicaciones de los sistemas IPCCS en la operación. Seguido, se realizan tres escenarios: el primer escenario con sistema convencional, el segundo escenario incorporando un sistema IPCCS y un tercer escenario incorporando dos sistemas IPCCS. Esto nos permite analizar el impacto que los sistemas generan durante la vida de la operación minera.

Finalmente, con los escenarios desarrollados, se realiza un caso de negocio que nos permite identificar el escenario que brinda una mayor rentabilidad a la operación.

*DEDICATORIA*

*A mis padres Silvia y Arnulfo, por todo el esfuerzo que pusieron en mi y por servirme de inspiración constante para ser una mejor persona cada día. A mis hermanos Jean, Tephy y Lety, que me enseñaron que la vida es mejor si estas acompañado.*

*DEDICATORIA*

*A mi madre Leda Tincopa y hermana Milagritos Rodriguez, por su motivación y apoyo incondicional durante mis años de vida; a mis queridos abuelos Iván y Nelly por cuidarme desde pequeño y finalmente a todos mis amigos.*

*En memoria de mi amado padre, Santos Alvaro Rodriguez Quispe, quien me acompaña desde el cielo y guía todos mis pasos.*

## Contenido

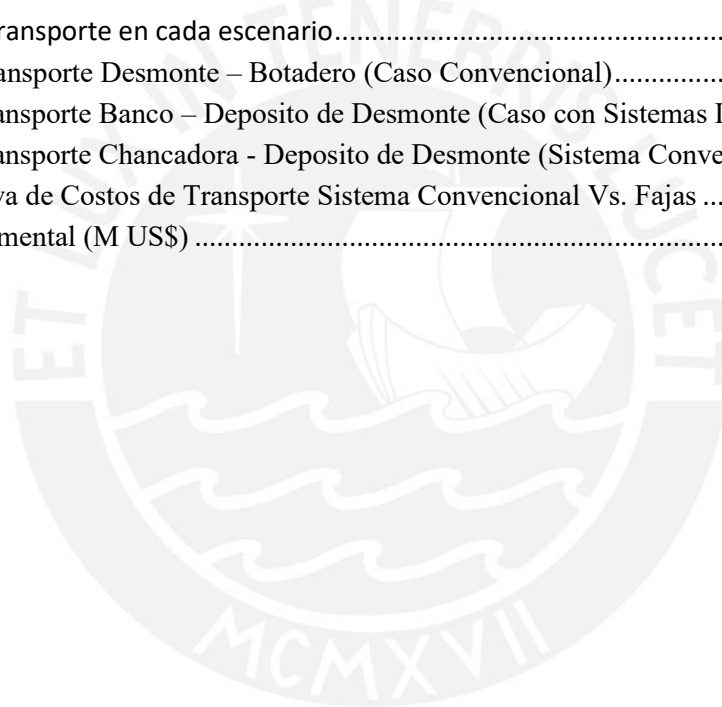
<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b>DESCRIPCIÓN GENERAL .....</b>	<b>2</b>
1.1.1	Entorno Geológico.....	2
1.1.2	La Operación .....	3
<b>1.2</b>	<b>DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....</b>	<b>4</b>
<b>1.3</b>	<b>ANTECEDENTES.....</b>	<b>7</b>
<b>1.4</b>	<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>14</b>
1.4.1	Objetivo General .....	14
1.4.2	Objetivos Específicos .....	14
<b>1.5</b>	<b>HIPOTESIS .....</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>15</b>
<b>2.1</b>	<b>PLANEAMIENTO DE MINADO.....</b>	<b>15</b>
2.1.1	Planeamiento estratégico .....	15
2.1.2	Horizontes de Planificación.....	16
<b>2.2</b>	<b>OPERACIONES UNITARIAS.....</b>	<b>17</b>
2.2.1	Perforación .....	17
2.2.2	Voladura .....	17
2.2.3	Carguío .....	18
2.2.4	Acarreo .....	18
<b>2.3</b>	<b>In Pit Crushing And Conveying System.....</b>	<b>20</b>
2.3.1	Configuraciones del sistema IPCCS.....	20
2.3.2	Criterios de Selección de un sistema IPCCS .....	24
2.3.3	Factores a considerar al implementar un sistema IPCCS .....	25
<b>2.4</b>	<b>MÉTODOS PARA LA EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE LOCALIZACIÓN .....</b>	<b>25</b>
<b>2.5</b>	<b>PROCESO DE TOMA DE DECISIONES.....</b>	<b>27</b>
2.5.1	VAN .....	27
2.5.2	TIR.....	27
2.5.3	Periodo de retorno .....	27
<b>3</b>	<b>METODOLOGÍA DE TRABAJO .....</b>	<b>28</b>
<b>3.1</b>	<b>PLAN DE MINADO OPTIMIZADO.....</b>	<b>29</b>
<b>3.2</b>	<b>ESCENARIO CON SISTEMA CONVENCIONAL .....</b>	<b>29</b>
<b>3.3</b>	<b>ANÁLISIS PARA APLICACIÓN DE SISTEMAS IPCCS .....</b>	<b>30</b>
3.3.1	Cantidad de sistemas IPCCS .....	30

3.3.2	Ubicación de los sistemas IPCCS.....	30
3.4	ESCENARIOS IMPLEMENTANDO SISTEMAS IPCCS.....	31
3.5	EVALUACIÓN ECONÓMICA .....	31
4	RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA .....	33
4.1	PLAN DE MINADO OPTIMIZADO.....	33
4.1.1	Situación actual .....	33
4.1.2	Diseño de Fases Optimizado .....	35
4.1.3	Secuencia de Minado.....	40
4.1.4	Resultados del Plan de Minado.....	45
4.2	ESCENARIO CON SISTEMA CONVENCIONAL .....	50
4.3	ANÁLISIS PARA APLICACIÓN DE SISTEMAS IPCCS .....	53
4.3.1	Potencial de la Utilización de los Sistemas de Chancado .....	54
4.3.2	Localización Óptima de los Sistemas de Chancado .....	56
4.3.3	Trazo de las Fajas Transportadoras .....	61
4.4	ESCENARIO CON UN SISTEMA DE CHANCADO Y TRANSPORTE DE DESMONTE .....	64
4.5	ESCENARIO CON DOS SISTEMAS DE CHANCADO Y TRANSPORTE DE DESMONTE .....	67
5	ANÁLISIS ECONÓMICO.....	70
5.1	CAPEX.....	70
5.2	OPEX .....	73
5.3	RESULTADOS FINANCIEROS .....	78
6	CONCLUSIONES.....	81
	BIBLIOGRAFÍA.....	82

## Lista de Figuras

Figura 1 Sección NW-SE de la Geología del Yacimiento con características similares .....	2
Figura 2 Distribución del Costo de Minado de Desmonte.....	5
Figura 3 Sierrita Copper Mine. Fuente: The Center for Land Use Interpretation.....	7
Figura 4 Bingham Canyon Copper Mine.....	8
Figura 5 Island Copper Mine.....	9
Figura 6 Highland Valley Mine.....	10
Figura 7 Configuración Mina Chuquicamata.....	11
Figura 8 Tajo Escondida BHP.....	12
Figura 9 Tajo Antamina.....	13
Figura 10 Chancadora Móvil Sandvik PF300.....	21
Figura 11 Chancadora Semi móvil. Fuente: (Tavakoli Mohammadi, Seyed, & Moosakazemi, 2011) .....	22
Figura 12 Chancadora Fija. Fuente: (Tavakoli Mohammadi, Seyed, & Moosakazemi, 2011).....	23
Figura 13 Metodología de trabajo. Fuente: Elaboración propia.....	28
Figura 14 Topografía de inicio. Elaboración propia .....	34
Figura 15 Fase 6.....	36
Figura 16 Fase 8.....	37
Figura 17 Fase 09.....	38
Figura 18 Fase 10.....	39
Figura 19 Fase 11.....	40
Figura 20 Secuencia de Minado Año 2020.....	41
Figura 21 Secuencia de Minado Año 2022.....	41
Figura 22 Secuencia de Minado Año 2025.....	42
Figura 23 Secuencia de Minado Año 2026.....	42
Figura 24 Secuencia de Minado Año 2030.....	43
Figura 25 Secuencia de Minado Año 2035.....	43
Figura 26 Secuencia de Minado Año 2037.....	44
Figura 27 Total Producción Mina .....	46
Figura 28 Producción por fase de minado .....	47
Figura 29 Flota de Perforación.....	48
Figura 30 Flota de Carguío .....	49
Figura 31 Alimentación a Planta.....	50
Figura 32 Perfil de camiones Escenario Base.....	51
Figura 33 Tonelaje de Mineral y Desmonte (Plan Optimizado).....	51
Figura 34 Horas de Acarreo Total (Escenario Base) .....	52
Figura 35 Camiones Adicionales (Escenario Base).....	52
Figura 36 Distribución de horas de acarreo según tipo de material (Escenario Base).....	53
Figura 37 Potencial uso de Sistemas IPCCS.....	56
Figura 38 Tonelaje de Desmonte por bancos en el Tajo.....	57
Figura 39 Elevación óptima por periodo.....	59
Figura 40 Alternativas de ubicación para los Sistemas de chancado.....	60

Figura 41 Botaderos disponibles en la operación .....	62
Figura 42 Secuencia de Desmonte depositado en Botaderos.....	63
Figura 43 Perfil de Camiones - Sistema Convencional vs Sistema W1.....	64
Figura 44 Distancia Equivalente - Sistema Convencional vs Sistema W1 .....	65
Figura 45 Productividad Camiones - Sistema Convencional vs Sistema W1.....	66
Figura 46 Costo de acarreo - Sistema Convencional vs Sistema W1 .....	66
Figura 47 Perfil de Camiones - Sistema Convencional vs Sistema W1+ W2.....	67
Figura 48 Distancia Equivalente - Sistema Convencional vs Sistema W1 + W2.....	68
Figura 49 Productividad Camiones - Sistema Convencional vs Sistema W1 + W2.....	69
Figura 50 Costo de acarreo - Sistema Convencional vs Sistema W1 + W2 .....	69
Figura 51 Comparación de perfil de camiones .....	71
Figura 52 Capex incremental (descontado) .....	72
Figura 53 Reducción de OPEX.....	73
Figura 54 Costos de transporte en cada escenario.....	74
Figura 55 Rutas de transporte Desmonte – Botadero (Caso Convencional).....	76
Figura 56 Ruta de Transporte Banco – Deposito de Desmonte (Caso con Sistemas IPCCS) .....	77
Figura 57 Ruta de Transporte Chancadora - Deposito de Desmonte (Sistema Convencional) .....	77
Figura 58 Comparativa de Costos de Transporte Sistema Convencional Vs. Fajas .....	78
Figura 59 VAN incremental (M US\$) .....	80





## Lista de Tablas

Tabla 1 Inventario por Fases de Minado.....	35
Tabla 2 Producción Mina.....	45
Tabla 3 Mineral por fase.....	47
Tabla 4 Alimentación a Planta.....	49
Tabla 5 Capacidad de la Chancadora.....	55
Tabla 6 Compra de camiones por caso (sin descontar).....	71
Tabla 7 Capex detallado por caso (sin descontar) .....	72
Tabla 8 Costos de Transporte Banco - Botadero con sistema convencional .....	76
Tabla 9 Costo de Transporte Chancadora - Botadero (Sistema convencional) .....	78
Tabla 10 Detalle del VAN por componentes .....	79



## 1 INTRODUCCIÓN

---

La presente tesis denominada “Incremento de valor de una Operación a Tajo Abierto mediante la incorporación de Sistemas de Chancado y Transporte de Desmante In Pit (IPCCS)” se desarrolla con el objetivo de buscar alternativas tecnológicas que reemplacen al sistema convencional de pala – camión. El principal problema que presenta el sistema convencional a largo plazo es el incremento del costo de acarreo de material. Entre los factores que afectan este costo en la operación se encuentran: el incremento de tonelaje de desmante a transportar cuando se requiere desbrozar fases de grandes dimensiones para exponer el mineral, mayores distancias de acarreo hacia los botaderos debido a la secuencia de descarga, disponibilidad de botaderos cercanos, disminución de productividad de los equipos debido a su antigüedad, restricción del número de equipos disponible, entre otros. Las razones mencionadas intervienen en la decisión de optar por sistemas semi mecanizados o mecanizados (IPCCS) en busca de minimizar costos y aumentar el valor de la operación.

Los Sistemas de Chancado y Transporte de Desmante In Pit (IPCCS) se han convertido en una alternativa ideal para la optimización del sistema de acarreo convencional en operaciones a tajo abierto, debido a que, si bien requieren de una gran inversión inicial, el impacto positivo que genera a lo largo de su vida de uso es considerable económicamente y motiva a incorporar los sistemas IPCCS a la operación.

Entre las decisiones más importantes a tomar en cuenta al utilizar los sistemas IPCCS se tienen: la ubicación y la cantidad de los sistemas, pues el impacto estratégico y el costo indican cuan significativos son los sistemas. Una correcta elección de la ubicación rentabiliza el uso de los sistemas; mientras que, un sistema mal localizado podría afectar el periodo de retorno del capital

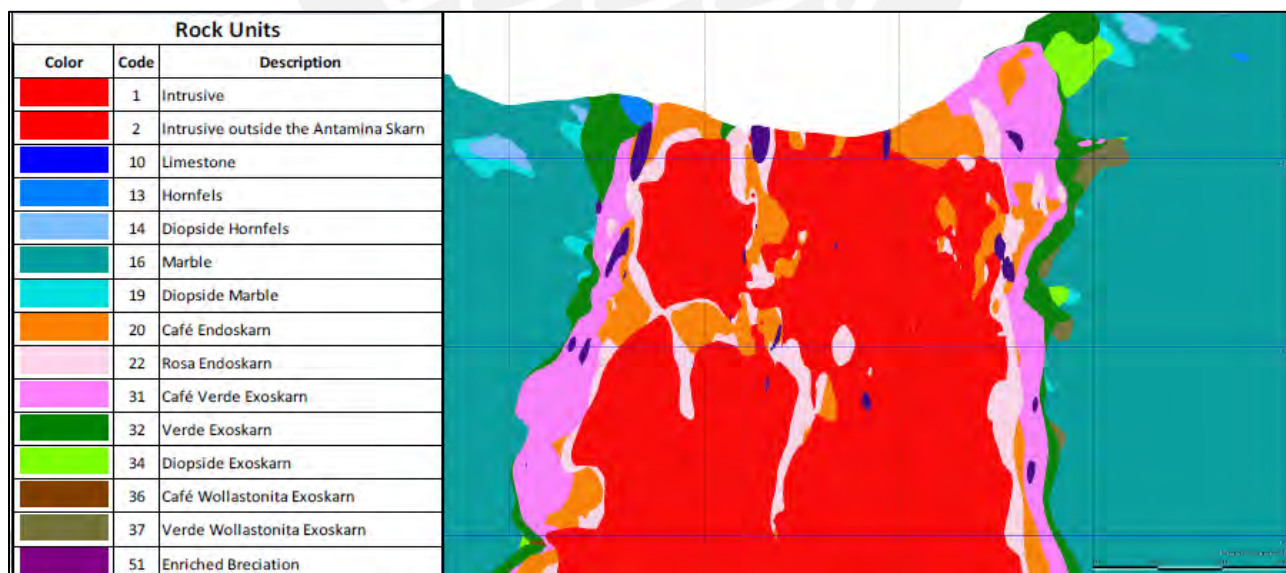
invertido, y por tanto afectar la viabilidad de los sistemas. El resultado del proceso de elección de la cantidad y ubicación de los sistemas IPCCS será aquella que brinde un menor costo operativo respecto al resto, mejores condiciones en la operación y ofrezca mayor rentabilidad.

## 1.1 DESCRIPCIÓN GENERAL

La operación minera de estudio se encuentra localizada en la provincia de Ancash, distrito de San Marcos, alcanzando una altitud promedio de 4,300 msnm. Sus principales concentrados producidos son: cobre, zinc, molibdeno y subproductos de plata y plomo.

### 1.1.1 ENTORNO GEOLÓGICO

El yacimiento en estudio es un depósito de skarn con contenido de cobre, zinc, plata, molibdeno y bismuto formado a partir del intrusivo conformado por cuarzo monzonita en calizas. El depósito cuenta con una longitud aproximada de 3 km de largo en dirección NE y una longitud de 1.5 km de ancho (Rios, 2018). En la Figura 1 se aprecia un yacimiento con características similares.



**Figura 1** Sección NW-SE de la Geología del Yacimiento con características similares  
Fuente: (Rios, 2018)

### *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. (Lozada & Espinoza, 2010)

### *Geología Local*

El yacimiento 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. Además, de acuerdo con 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 sub paralelas pero que se caracterizan por ser fallas de sobre escurrimiento acompañados de pliegues con orientación NW. (Lozada & Espinoza, 2010)

#### **1.1.2 LA OPERACIÓN**

---

La mina en evaluación opera a tajo abierto y lleva a cabo la producción de cobre mediante movimiento de tierras, chancado de mineral, y procesamiento del mineral a través de flotación para finalmente obtener concentrados de cobre. El movimiento de tierras antes mencionado se lleva a cabo a través de una secuencia de minado que obedece al diseño de fases realizado por el área de planeamiento.

Las principales características de la operación que definen el diseño de la mina son:

- Altura del banco: 15 m.
- Ancho de minado mínimo: 80 m.
- Gradiente de rampa: 10%

- Berma geotécnica: 30 m.
- Ancho de rampa: 40 m.

Siguiente, el mineral es dirigido a la chancadora primaria de mineral que alimenta a la concentradora por una faja de 3.3 km a través de un túnel de 2.7 km de longitud.

La planta concentradora fue diseñada para procesar minerales a través de un circuito de molienda SAG y bolas, y recuperar los diferentes tipos de minerales mediante un circuito de flotación. Después, el concentrado es transportado mediante un mineroducto al puerto, ubicado a una distancia aproximada de 280 km al norte de Lima, para su posterior comercialización.

Cabe resaltar que la planta procesa principalmente tres tipos de minerales, entre ellos minerales de CuMo, CuZn y Bornitas en campañas secuenciales. Las campañas para cada mineral se programan por separado de acuerdo con el plan de minado y a la mezcla de diferentes tipos de minerales, adaptándose a los requerimientos de molienda y flotación de la concentradora.

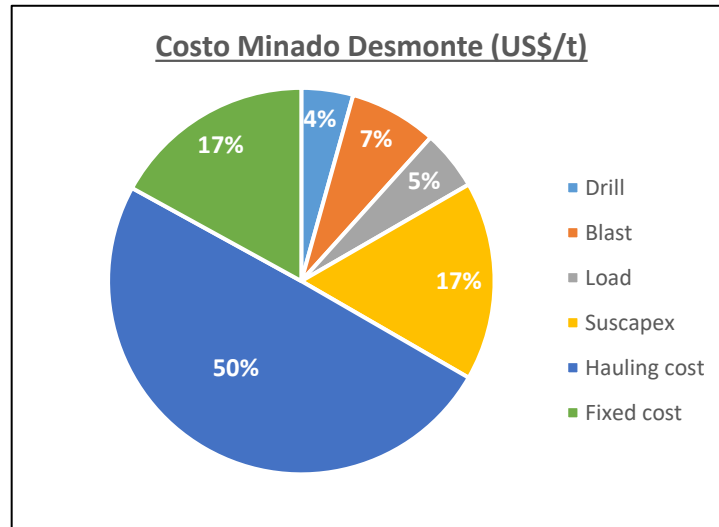
## **1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA**

---

Hoy en día las operaciones mineras a tajo abierto se encuentran en constante búsqueda de mejorar las actividades unitarias como son la perforación, voladura y acarreo. El desarrollo de esta tesis se enfoca en el problema que presenta el acarreo de material de desmonte a lo largo de la vida de la mina.

Como se observa en la Figura 2, el costo de acarreo en una mina a tajo abierto representa aproximadamente el 50% del costo total operativo, y aumenta conforme pasan los años debido a la profundización de la mina, las grandes cantidades de material a transportar, la distancia de recorrido hacia los botaderos, la no disponibilidad de botaderos cercanos, y el desbroce de fases

con grandes dimensiones. Para poder sostener un plan de minado la flota de camiones tiende a incrementarse debido a las razones señaladas. Adicionalmente, en un escenario real se puede tener otras restricciones como es el número de operadores, lo cual limita la flota de camiones.



**Figura 2 Distribución del Costo de Minado de Desmonte**

Al contar con restricciones que afecten de manera negativa un plan de minado por la falta de camiones, es necesario contar con una solución que permita aumentar el tonelaje de producción y a su vez no exceder el número de camiones disponibles. Es así como nace la idea de la implementación de los sistemas IPCCS, los cuales además ayudan a disminuir la emisión de dióxido de carbono, congestión de las vías principales, el ciclo de acarreo y por consecuencia los costos.

Sin embargo, contar con sistemas IPCCS necesita de una gran inversión inicial y una configuración adecuada de los botaderos como es el tener un ancho y longitud suficiente para que las fajas no estén en constante movimiento y se pueda realizar un uso correcto de estos sistemas, logrando reducir al máximo los costos operativos.

Al optar por el uso de sistemas IPCCS, es necesario saber las ubicaciones posibles y compararlas entre ellas para obtener como resultado la mejor o mejores ubicaciones dentro de un rango de opciones. Además, se tiene como objetivo poder determinar la cantidad de sistemas a utilizar, el cual será determinado de acuerdo con la capacidad de minado de la operación.



### 1.3 ANTECEDENTES

---

Los sistemas IPCCS vienen siendo utilizados por varias minas alrededor del mundo, demostrando que son sistemas eficientes y viables técnica y económicamente. A continuación, se describen diversas operaciones que han empleado o emplean este tipo de sistemas exitosamente.

#### *Sierrita Copper Mine*

Mina ubicada en Sahuarita, Arizona. Durante 1982-1983, esta mina pasó de tener una chancadora fija de mineral dentro del tajo a desarrollar un sistema móvil de chancado con fajas extensibles para mineral y desmante. Este nuevo sistema está compuesto por 3 chancadoras giratorias de 1.5 x 2.2 m, apiladores móviles y fajas con extensión de 7.3 km a una potencia instalada de 14,000 kW. La inversión de capital fue estimada en 32 M\$, ahorrándose en promedio 0.32 \$/t y llegando a alcanzar un costo de minado de 1.10 \$/t. Con el uso de los sistemas IPCCS se logró reducir la flota de camiones en 25%, además el requerimiento de camiones nuevos se redujo en 37%, lo cual eliminó la inversión de capital durante los siguientes 10 años. Para esta mina se estimó que para una profundización de 30 m se puede ahorrar 1 M\$ anuales en costos operativos por cada chancadora. (Tavakoli Mohammadi, Seyed, & Moosakazemi, 2011)



**Figura 3 Sierrita Copper Mine. Fuente: The Center for Land Use Interpretation**  
Fuente: Land Use Database, [The Center for Land Use Interpretation \(clui.org\)](http://clui.org)



### *Bingham Canyon Copper Mine*

Mina ubicada en Utah, USA. En 2011 realizó un proceso de modernización para lograr una producción de 70,000 t/d de mineral usando un sistema IPCCS. El sistema está conformado por una chancadora giratoria semi móvil de 1.5 x 2.7 m y 6 fajas transportadoras. La chancadora pesa 1,200 toneladas y está ubicada en cimientos de concreto dentro del tajo en un banco donde se tiene conexión con el portal del túnel por donde pasan las fajas transportadoras. El mineral es transportado con camiones de 154 t y alimentan a la chancadora mediante dos bahías. La altura total de la estructura es de 30 m. El mineral es reducido hasta un tamaño de 250 mm a una tasa de 9,000 t/h. En total las 6 fajas transportadoras cuentan con una longitud de 8.5 km, la faja más extensa es de 6 km y atraviesa el túnel que conecta el tajo con una salida a superficie para luego llevarlo hasta la planta concentradora. Todas las fajas tienen un ancho de 1.8 m y en conjunto se utiliza una potencia de 12,900 kW. (Tavakoli Mohammadi, Seyed, & Moosakazemi, 2011)



**Figura 4 Bingham Canyon Copper Mine.**  
Fuente: ([Doc Searls](#) / Flickr)

### *Island Copper Mine*

Mina ubicada en Port Hardy, British Columbia (Canadá). Produce 43,000 t/d de mineral de cobre con un ratio de desmonte/mineral de 2:1. El sistema IPCCS implementado cuenta con una chancadora móvil y una faja transportadora que lleva el mineral chancado a través de un túnel hasta la planta concentradora. El desmonte es acarreado por camiones. La inversión de capital fue estimada en 20 M\$, y el Opex se redujo en 0.19 \$/t. El periodo de retorno de la inversión fue de 4 años y la flota de camiones descendió de 25 a 14 unidades. (Tavakoli Mohammadi, Seyed, & Moosakazemi, 2011)



**Figura 5 Island Copper Mine.**

**Fuente: (1989 Annual Environmental Assessment Report Volume 1, June 1990, Island Copper Mine fonds (AR340), Accession 2000-069, Box 4, Section 4.10.1)**

### *Highland Valley Copper Mine*

Mina ubicada en British Columbia (Canadá). Produce 120,000 toneladas de cobre y molibdeno por día proveniente de dos tajos. Esta operación tiene instalado dos Chancadoras Giratorias In Pit para el chancado de mineral, cada una de esta cuenta con una capacidad de 6,0000 t/h y disponen de su propio sistema de transporte por fajas y conducen a un molino ubicado a 2.5 km de distancia. (Tavakoli Mohammadi, Seyed, & Moosakazemi, 2011)

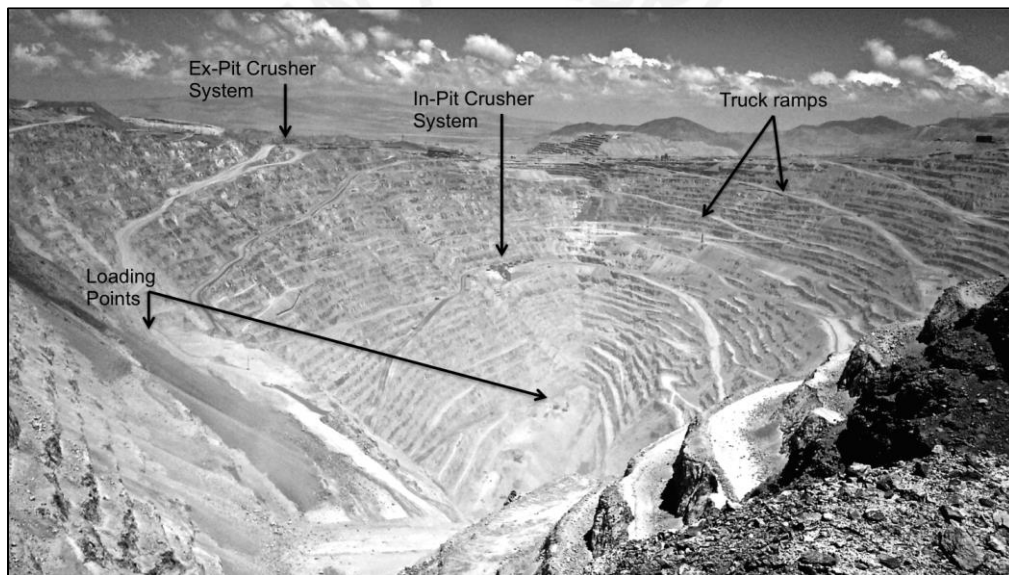


**Figura 6 Highland Valley Mine.**

**Fuente: The Highland Valley copper mine is in south-central B.C. PHOTO BY HANDOUT /PNG**

## *Mina Chuquicamata*

Chuquicamata es una mina de cobre y oro a tajo abierto que comenzó su operación en 1915, se encuentra ubicada a 15 km al norte de Calama, en la Región de Antofagasta. En 1992 la operación contó con un sistema IPCCS para el desmonte, el cual estuvo conformado por una chancadora semi móvil con una capacidad nominal de 100 kt/d y un conjunto de fajas que recibía el material y contaba con 5 km de largo hasta el botadero, donde se ubicaba el esparcidor o "Spreader", encargado de distribuir el material. (Corporación Nacional del Cobre de Chile, n.d.)



**Figura 7 Configuración Mina Chuquicamata.**

**Fuente: Yarmuch, Rafael Epstein, Raúl Cancino & Juan Carlos Peña (2017) Evaluating crusher system location in an open pit mine using Markov chains, International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 31:1, 24-37, DOI:10.1080/17480930.2015.1105649**

### *Mina Escondida*

Mina ubicada en la región de Antofagasta, Chile y que se dedica a la extracción de cobre, siendo la mina a tajo abierto con la mayor producción de cobre. Inició operaciones en 1990. El sistema IPCCS implementado en esta operación es de una chancadora semi móvil para el desmante con una capacidad de 9,600 t/h, esta operación antes de la instalación del sistema IPCCS contaba con rampas circulares, lo cual generaba que el transporte de materiales sea costoso. Con la implementación de Fajas y "Spreaders", la mina ha logrado reducir significativamente sus costos de operación.



**Figura 8 Tajo Escondida BHP.**  
Fuente: [Escondida | BHP](#)

### *Mina Antamina*

Minera Peruana que está ubicada en el distrito de San Marcos, provincia de Huarí en la Región Ancash, a 200 km. de la ciudad de Huaraz y a una altitud promedio de 4,300 msnm. Se encuentra entre los mayores productores peruanos de concentrados de cobre y zinc. El sistema IPCCS incorporado en esta operación es una Chancadora Fija para el chancado de mineral y su respectivo transporte hacia Planta Concentradora. La capacidad de la chancadora es de 10,000 t/h y cuenta con una faja transportadora de 5 km que pasa bajo la superficie. La implementación de este sistema ha logrado hacer sostenible la operación debido a la larga distancia que existe entre el tajo y la planta concentradora; además, de la continua profundización del tajo. (Compañía Minera Antamina, n.d.)



**Figura 9 Tajo Antamina.**  
Fuente: [Galería de Fotos | Antamina](#)

## 1.4 OBJETIVOS

---

### 1.4.1 OBJETIVO GENERAL

---

- Evaluar el aumento de valor de una operación minera a tajo abierto mediante la correcta elección de la cantidad y ubicación de Sistemas de Chancado y Transporte de Desmote In Pit (IPCCS).

### 1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

---

- Determinar la cantidad adecuada de Sistemas IPCCS a incorporar en una operación minera a tajo abierto en marcha.
- Determinar las ubicaciones óptimas de los Sistemas IPCCS.
- Realizar el cálculo de flota de camiones para cada escenario, según las configuraciones combinadas de cantidad y ubicación de los Sistemas IPCCS.
- Demostrar los beneficios económicos y técnicos que brinda la incorporación de sistemas mecanizados en una mina a tajo abierto.

## 1.5 HIPOTESIS

---

El uso de Sistemas IPCCS genera una mayor rentabilidad con respecto a un sistema tradicional de pala camión debido a la reducción de distancias de acarreo y costos asociados al transporte de desmote.

## **2 MARCO TEÓRICO**

---

### **2.1 PLANEAMIENTO DE MINADO**

---

El proceso de planeamiento de minado se dedica a predecir y prevenir los problemas futuros de la operación minera con la finalidad de alcanzar los objetivos de la empresa dadas las restricciones en la operación (presupuesto, inversiones futuras, reservas, equipos y otros).

En un proyecto minero, el equipo de planeamiento mina se encarga de realizar los planes de minado de la operación en diferentes horizontes: largo plazo, mediano plazo y corto plazo. Dichos planes tienen como entregables la secuencia de minado de la operación, cantidad y selección de equipos, así como mineral a procesar, obteniéndose la cifra final de concentrados que servirán para la estimación económica de la operación. Para la realización de este plan será necesario contar con los inputs y estrategias que tienen las diferentes áreas involucradas, entre estas áreas se encuentran el área de geotecnia, medio ambiente, planta, operaciones, asuntos sociales, etc.

#### **2.1.1 PLANEAMIENTO ESTRATÉGICO**

---

El planeamiento estratégico busca responder la mejor forma de explotar los recursos geológicos, de tal modo que se maximice el retorno esperado y las metas establecidas de la compañía. En minería, este plan abarca desde la fase conceptual y sirve de guía para realizar las siguientes etapas de estudio.

El planeamiento estratégico debe ser actualizado continuamente con la información obtenida de la operación minera al transcurrir de los años, esto con la finalidad de adaptarse a las coyunturas políticas, económicas y ambientales que están en constante cambio. (Loli Morales, 2016)



## 2.1.2 HORIZONTES DE PLANIFICACIÓN

---

La planificación minera generalmente se divide en tres categorías:

### *Planificación a Largo Plazo*

Según Johnson, la planificación a largo plazo define el límite económico final, o límite óptimo del tajo. Es decir, define el tamaño y forma del tajo hasta el final de su vida. El plan a largo plazo sirve de ayuda en la evaluación del potencial económico de un depósito mineral y es donde se establece la estrategia global de la empresa, usualmente para un horizonte superior a 5 años. Este análisis es esencial en la planificación de instalaciones de superficie, tales como plantas de tratamiento, vertedero de residuos, estanques de residuos y otros elementos complementarios para la operación. (Thys B., 1968)

### *Planificación a Mediano Plazo*

En el horizonte de planificación a mediano plazo se abarca comúnmente de uno a cinco años, dependiendo del tamaño de la operación y/o las políticas de la empresa. Esta actividad sigue los objetivos delimitados por la planificación a largo plazo y además incorpora las limitaciones actuales que tenga la operación. Así, luego de ser afinada se inserta al plan de largo plazo, siendo la base de la estimación y evaluación económica de la empresa, puesto que al abarcar los primeros años de la operación influyen de manera muy importante en el valor económico. (Delgado Vega, 2007)

### *Planificación a Corto Plazo*

La planificación a corto plazo es una actividad cuyo horizonte abarca un año o menos, por lo que su realización está fuertemente condicionada por la realidad de la operación y toma a detalle todas

las actividades que se realizarán durante ese año, tomando como guía la planificación realizada por mediano plazo. Comúnmente este plan anual se revisa trimestralmente y suele dividirse en la realización de planes mensuales, semanales y diarios. (Delgado Vega, 2007)

## **2.2 OPERACIONES UNITARIAS**

---

Las operaciones unitarias son los procesos secuenciales que se siguen en la operación minera para poder explotar el material. Cada una de estas actividades influye en los costos de mina y se explican a continuación:

### **2.2.1 PERFORACIÓN**

---

La finalidad de esta operación es la de crear un espacio o una cavidad en la roca que se busca remover, para luego en estos hoyos colocar el explosivo que más adelante será detonado. La ubicación y características geométricas del hoyo a realizar (tamaño, longitud, dirección, etc.) son predeterminadas bajo un diseño de ingeniería que permita que el explosivo se aloje adecuadamente y pueda fracturar la roca. Este proceso se realiza con equipos diseñados para este fin como: perforadoras (rotativas, DTH) y equipos auxiliares como compresores, captadores de polvo, entre otros. (Vásquez, Galdames, & Le-Feaux, 2009)

### **2.2.2 VOLADURA**

---

La finalidad de esta operación es la de fracturar la roca mediante el uso de explosivos para lograr a una granulometría adecuada que permita su posterior manejo (carguío, transporte, chancado o botaderos). En ese sentido, un buen diseño de perforación y voladura permite un correcto uso del material volado para su posterior manipulación en los siguientes proceso productivos. (Vásquez, Galdames, & Le-Feaux, 2009)

### 2.2.3 CARGUÍO

---

Esta actividad tiene como finalidad desprender el mineral volado de la superficie y trasladarlo hacia los equipos de acarreo, generalmente se define como un selector de destinos. El carguío del material volado se puede realizar con variados equipo como es el caso de palas eléctricas, palas hidráulicas, cargadores frontales, retroexcavadoras, etc. Los equipos de carguío juegan un rol muy importante dentro de una operación minera, debido a que son los encargados de realizar el movimiento de material de toda la mina y una falla en ellos se traduce en una baja en la producción, por lo que es importante mantener un disponibilidad adecuada con el objetivo de alcanzar las metas de producción. (Vásquez, Galdames, & Le-Feaux, 2009)

### 2.2.4 ACARREO

---

Esta actividad es generalmente la operación unitaria con mayor costo en una mina a tajo abierto. El objetivo principal del proceso de acarreo es transportar los distintos tipos de materiales que se tiene en la mina hacia los diferentes destinos ya sea chancadora de mineral, chancadora de desmonte, botaderos, presa de relaves, etc. Los equipos de acarreo que se utilicen en una operación minera deben hacer “match” con los equipos de carguío, por regla general una pala debe cargar a un camión en 3 o 4 pases.

#### *Cálculo de flota de camiones*

El dimensionamiento de equipos en una operación es muy importante para poder estimar de manera adecuada los costos e inversiones que se van a tener al largo de la vida de la mina, por esta razón el cálculo de camiones debe tener datos de entrada que reflejen el estado actual de la mina

en estudio. Datos como las velocidades, disponibilidad, utilización y factor de carga tienen que ser revisados detalladamente, debido a que influyen directamente en el número de camiones a calcular.

### *Software MineHaul*

MineHaul, es un software de simulación que permite calcular las horas operativas y número de camiones para un plan determinado en formato fase-banco, tomando como datos de entrada velocidades a diferentes pendientes (subida, bajada y plano), disponibilidad, utilización, factor de carga, % de humedad y resistencia a la rodadura. El software de acuerdo con su algoritmo trata de buscar las rutas cortas disponibles para cada año del plan, trabajando siempre con distancias equivalentes al tener como dato las velocidades a diferentes pendientes. Las ventajas del uso del MineHaul son: la facilidad de introducir restricciones operativas, tiempo de simulación relativamente corto y visualización en 3D del plan de minado, rutas de acarreo y secuencia de descarga en botaderos. Por otro lado, una desventaja es la falta de implementación de las curvas rimpull como datos de entrada.

## 2.3 IN PIT CRUSHING AND CONVEYING SYSTEM

---

Este sistema es conocido desde hace unas décadas en la industria minera. La idea de este se originó el año 1956 en Alemania y hoy en día más de 200 de estos sistemas han sido introducidos alrededor del mundo con el objetivo de reducir los costos de transporte. El sistema consiste en brindar una alternativa diferente a la convencional de camiones y de esta manera disminuir los costos asociados al transporte de material en las operaciones a cielo abierto.

Esta alternativa para el transporte de materiales es utilizada tanto para el manejo de mineral y desmonte de la mina. El sistema consiste en incorporar una chancadora primaria, diseñada para encajar en distintos espacios dentro del tajo; y un sistema continuo de transporte, fajas transportadoras, que se dirigirán directamente al botadero o planta de procesamiento, dependiendo del material movido. Cuando se trata de desmonte estas van acopladas a un “Spreader” que se encarga de verter el material en los respectivos botaderos de residuos. (Turnbull & Cooper, 2009).

### 2.3.1 CONFIGURACIONES DEL SISTEMA IPCCS

---

El sistema IPCCS tiene tres principales de configuraciones para la chancadora primaria: totalmente móvil (fully mobile), semi móvil (semi mobile) y fija.

#### *Móviles*

Los sistemas IPCCS totalmente móviles usan una chancadora que es fácilmente portátil y sigue el frente de trabajo para ser alimentada directamente por los cargadores, por lo que elimina la necesidad de camiones para el acarreo. Esta configuración se ha limitado a minas no metálicas debido a que adquiere bajas productividades con rocas de alta dureza (metálicas).

Las chancadoras móviles modernas usan orugas, y siguen la pala alrededor del tajo abierto. Un accesorio transportador portátil que se puede conectar a la chancadora móvil es el puente desde la chancadora hasta el sistema transportador. La movilidad de las chancadoras restringe la maquinaria y la capacidad de chancado del sistema IPCCS; sin embargo, los avances tecnológicos han progresado en el rendimiento de chancado totalmente móvil a aproximadamente 8000 t / h. alimentado directamente por los cargadores. (Tonge, 2017)

Las fajas de alto ángulo se pueden usar para evitar correas demasiado largas para transportar material desde el tajo.



**Figura 10 Chancadora Móvil Sandvik PF300**

Fuente: [Mobile crushers and screens — SRP \(rockprocessing.sandvik\)](http://rockprocessing.sandvik.com)

### *Semi-móvil*

La chancadora semi móvil utiliza tanto operaciones convencionales de pala-camión como IPCCS para el carguío y transporte de materiales. En lugar de transportar el material del tajo con camiones hasta su destino final, los camiones descargan el material excavado en chancadoras semi móviles, que alimentan el material a las fajas transportadoras para su posterior transporte (Tavakoli Mohammadi, Seyed, & Moosakazemi, 2011)

Así, los camiones realizan recorridos cortos y reducen los costos operativos. La chancadora se reubica usualmente una vez cada 3 a 10 años, a menudo utilizando una oruga de transporte. Se ha encontrado que esta colaboración de transporte continuo y discontinuo es efectiva en minas de roca dura a cielo abierto. (Tonge, 2017)



**Figura 11 Chancadora Semi móvil. Fuente: (Tavakoli Mohammadi, Seyed, & Moosakazemi, 2011)**

### *Fijos o Semi- fijos.*

Los sistemas Fijos no se mueven desde donde son instalados durante toda la vida útil de la operación. La chancadora estacionaria permite una trituración más grande y productiva dentro del tajo y, por lo tanto, mayores capacidades de alimentación; sin embargo, la flexibilidad reducida del posicionamiento de la chancadora significa que el sistema requiere más camiones. (Tonge, 2017)

Este método de chancado dificulta la planificación de la mina, ya que la mina tiene que girar alrededor de las estaciones fijas y la expansión de la mina se vuelve difícil. Debido a esto, estos sistemas son también ubicados fuera del pit y se enfocan en reducir la distancia de transporte al botadero o planta concentradora.

Los sistemas semi-fijos pueden estar en el tajo, pero fijados dentro de una etapa de la mina. Estos sistemas están montados en una plataforma de acero, lo que reduce la necesidad de una base de hormigón permanente. Cualquier reubicación planificada no será por menos de 10 años. (Tavakoli Mohammadi, Seyed, & Moosakazemi, 2011)



**Figura 12 Chancadora Fija. Fuente: (Tavakoli Mohammadi, Seyed, & Moosakazemi, 2011)**



### 2.3.2 CRITERIOS DE SELECCIÓN DE UN SISTEMA IPCCS

---

Lo que se debe tener en cuenta al incorporar los Sistemas IPCCS en una operación, es que estos buscan principalmente cumplir lo siguiente:

1. La chancadora debe tener la capacidad de procesar el material proveniente de la operación (mineral o desmonte) para luego suministrar, mediante las fajas transportadoras, los diferentes tipos destinos según el tipo de material (planta procesadora o depósito de desmonte). (Loli Morales, 2016)
2. Optimizar los costos de acarreo frente a un sistema convencional, puesto que las fajas transportadoras agilizan el acarreo de la operación conforme la operación profundiza y a la vez reducen los costos en uso de combustible, dado que se disminuye el número de camiones al optar por esta nueva tecnología. (Loli Morales, 2016)

Finalmente, es importante tener en cuenta dos puntos: el tipo de material y la configuración propuesta. El tipo de material a transportar debe ser compatible con los equipos a incorporar para no tener futuros problemas en el proceso y transporte. La configuración propuesta debe ser óptima, una mala configuración en la localización de chancadoras móviles y fajas transportadoras puede disminuir la utilización de los equipos y afectar todo el sistema de carguío y acarreo. (Loli Morales, 2016)

### 2.3.3 FACTORES A CONSIDERAR AL IMPLEMENTAR UN SISTEMA IPCCS

---

- Tasa de movimiento anual de material.
- La factibilidad del sistema será posible si logra reemplazar la cantidad de camiones suficientes que justifiquen su inversión inicial.
- Operaciones con una vida de mina prolongada (mayores a 15 años)
- Dureza del material.
- Variabilidad del yacimiento.

### 2.4 MÉTODOS PARA LA EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE LOCALIZACIÓN

---

Según la recomendación de Render, B. y Heizer, J. (2009) existen cuatro principales métodos para definir localización más adecuada: método de calificación de factores, análisis del punto de equilibrio costo-volumen de la localización, método del centro de gravedad, y modelo de transporte.

#### *Método de calificación de factores*

Se identifican los factores clave para la decisión de la ubicación y se realiza una ponderación.

Consta de los siguientes pasos:

- Lista de factores relevantes.
- Asignación de un peso a cada factor según su importancia.
- Calificación de cada factor.
- Realizar la suma ponderada por cada factor.
- Recomendación basada en la calificación de mayor puntaje.

### *Análisis costo-volumen de la localización*

Análisis que compara económicamente las alternativas brindadas de localización. Se identifican los costos fijos y variables y se grafican para cada localización, así se determina cual genera menores costos. (Heizer & Render, 2009)

Este análisis se realiza siguiendo los pasos a continuación:

- Estimar en cada localización los costos fijos y variables.
- Para cada localización propuesta, realizar una gráfica Costos vs. Volumen Anual según intervalos de tiempo.
- Optar por la localización que, según el volumen esperado a producir, genere el menor costo total.

### *Método del centro de gravedad*

Según Render, B. y Heizer, J. (2009), este método matemático busca reducir los costos de transporte mediante la búsqueda de una localización óptima del centro de distribución. Para esto, se tiene como información requerida la ubicación de los destinatarios, el volumen de producto que se trasladara a los puntos de destino, y el costo de transporte de cada ruta, con la finalidad de que el centro de distribución sea el más conveniente para todos.

### *Modelo de transporte*

El modelo de transporte tiene como meta decidir el mejor orden de prioridad de los embarques dado diversos puntos de suministro (orígenes) hacia los diferentes destinos donde se requiere el material, el objetivo en este modelo es disminuir los costos en la producción y transporte. (Heizer & Render, 2009)

## **2.5 PROCESO DE TOMA DE DECISIONES**

---

Para la evaluación de proyectos de inversión es necesario tener en cuenta ciertos indicadores para tomar una correcta decisión. Estos indicadores generalmente son de carácter financiero, aunque también pueden ser políticos, sociales o ambientales. En la presente tesis se va a hacer uso de los indicadores financieros como factores de la toma de decisiones.

### **2.5.1 VAN**

---

En la estimación económica, el valor actual neto (VAN) está definido por los flujos efectivos netos de un proyecto traídos al valor presente. Un flujo de efectivo neto hace referencia a la diferencia entre los ingresos y los egresos en un tiempo determinado. Para traer a valor presente los flujos netos futuros, se hace uso de una tasa de descuento brindada por el inversionista, la cual representa el rendimiento mínimo esperado. (Mete, 2014)

### **2.5.2 TIR**

---

Se define como la tasa de descuento que iguala el valor presente de los ingresos del proyecto con 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, 2014)

### **2.5.3 PERIODO DE RETORNO**

---

El Periodo de Retorno se define como el tiempo exacto que requiere una empresa para recuperar su inversión inicial en un proyecto. Se estima a partir de las entradas de efectivo. (Canales Salinas, 2015)

### 3 METODOLOGÍA DE TRABAJO

Para la solución de la problemática en la presente tesis se requiere de una metodología de trabajo, la cual debe seguir un orden y criterio adecuado para la correcta solución y entrega de resultados que confirmen la hipótesis planteada. El proceso para seguir en la metodología se resume en la Figura 13 y se detalla en las siguientes líneas.

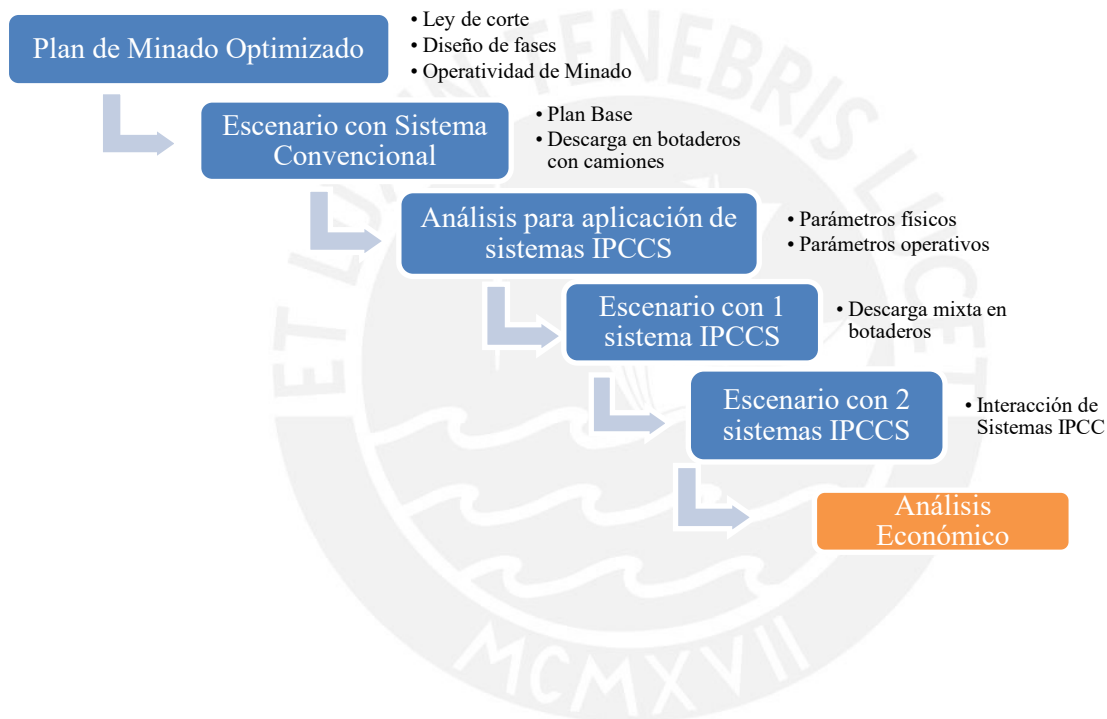


Figura 13 Metodología de trabajo. Fuente: Elaboración propia.

### **3.1 PLAN DE MINADO OPTIMIZADO**

---

Antes de evaluar la oportunidad de mejora que puedan generar los sistemas IPCCS, es necesario elaborar un plan de minado optimizado que se adecue a la situación que se desea plantear, en este sentido se genera un diseño de fases que se adapte a todos los escenarios futuros y que además maximice los ingresos de la operación utilizando políticas de ley de corte variable y una correcta secuencia de minado que permita tener mineral expuesto en todo momento para no perjudicar la alimentación a planta. El plan de minado optimizado es el primer paso y sirve para evaluar diferentes sistemas de acarreo partiendo de una misma base y alcanzando el mismo objetivo, en otras palabras, sin favorecer ninguno de los casos que se van a desarrollar en lo que respecta a ingresos.

### **3.2 ESCENARIO CON SISTEMA CONVENCIONAL**

---

Este escenario simula a la operación sin ningún sistema IPCCS y sirve como base para realizar las comparaciones en temas de Capex, Opex y VAN. Para esta simulación se hace uso del software MineHaul, el cual según las rutas hacia los diferentes destinos se calcula las horas que consumen cada flota de camiones que se tiene en la mina. En este caso, no se tiene restricciones del número de camiones, es decir, la flota necesaria para cumplir con un plan de minado optimizado.

Al no contar con las chancadoras de desmonte, se espera que en este caso base los camiones recorran mayor distancia hacia los botaderos y por ende el ciclo de acarreo sea mayor. Si bien es cierto, en temas de Capex, este caso no es tan agresivo debido a que la compra de camiones no se realiza en un solo año, sino que se reparte a lo largo de la vida de la mina; por otro lado, el Opex es un tema muy crítico económicamente debido al peso que tiene el costo de acarreo dentro del total del costo de minado.

### 3.3 ANÁLISIS PARA APLICACIÓN DE SISTEMAS IPCCS

---

#### 3.3.1 CANTIDAD DE SISTEMAS IPCCS

---

Si bien es cierto se pueden utilizar varios sistemas IPCCS, es necesario estimar el número adecuado para maximizar la utilización y balancear el Capex que estos sistemas pueden generar para no sobrecargar las inversiones. La cantidad de sistemas IPCCS se define en base a los siguientes factores:

- Tonelaje del desmonte anual según el plan de minado optimizado.
- Disponibilidad de botaderos con la infraestructura necesaria para ubicar los sistemas IPCCS.
- Costos asociados al transporte de material desde el tajo hacia los sistemas IPCCS.
- Costos de inversión (Capex).

#### 3.3.2 UBICACIÓN DE LOS SISTEMAS IPCCS

---

Luego de tener definido la cantidad de sistemas IPCCS que se va a utilizar, es necesario definir la ubicación y el destino de cada sistema. Como ya se sabe, un sistema IPCCS consta de una chancadora, en este caso de desmonte, y un sistema de fajas dirigidas hacia el botadero para su descarga.

En primer lugar, para recomendar las posibles ubicaciones de las chancadoras se utiliza el centro de gravedad del desmonte. En la etapa anterior se ha definido el número de sistemas IPCCS (“a” sistemas). En esta etapa, el tajo se divide en “a” partes y en cada partición se calcula el centro de gravedad del desmonte. De esta manera se obtiene las cotas recomendadas para ubicar las chancadoras.

Seguido, con las cotas recomendadas calculadas, se identifican las zonas del tajo donde se cuenta con un área adecuada para la infraestructura que conlleva instalar una chancadora.

Por último, se debe tener en cuenta que los “Spreaders” realizan su descarga en botaderos que cuenten con un ancho mínimo trabajo, para que las fajas no necesiten reubicarse o interfirieran una con otra en caso solo se tenga disponible un botadero.

### **3.4 ESCENARIOS IMPLEMENTANDO SISTEMAS IPCCS**

---

En este punto se evalúan diferentes casos para realizar la simulación con los sistemas IPCCS. De acuerdo con el número máximo de chancadoras elegidas se estima los escenarios con una sola chancadora o con el número máximo de chancadoras a elegir.

Con el resultado de esta simulación se va a lograr saber la sinergia que provoca juntar dos o más sistemas IPCCS y si eso es favorable para el plan de minado optimizado que se ha elaborado.

Por último, se va a poder confirmar las mejoras que pueda producir los sistemas IPCCS en temas operativos, como la disminución de la congestión de acarreo, menores distancias de acarreo, menor costos operativos y una descarga masiva en los botaderos.

### **3.5 EVALUACIÓN ECONÓMICA**

---

Luego de haber realizado las simulaciones con el sistema convencional y mecanizado, se procede a evaluar los diferentes escenarios desde un punto de vista económico. En tema de ingresos, los 3 casos a evaluar tienen los mismos valores, es decir, se produce el mismo tonelaje a planta, metal de cobre y por consiguiente mismas ventas.



Lo que va a definir la implementación de los sistemas IPCCS serán el Opex y Capex de los proyectos y equipos involucrados, por esta razón es de suma importancia un correcto dimensionamiento de equipos en las etapas anteriores.

Finalmente, de acuerdo con el indicador financiero por excelencia que es el VAN, se elige el caso ganador que mejor se adecua a la operación minera.



## **4 RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA**

---

Se utiliza la metodología detallada anteriormente (ver Figura 13) para verificar la hipótesis planteada, la cual indica que respecto a un sistema tradicional de pala camión, el uso de Sistemas IPCCS genera una mayor rentabilidad debido a la reducción de distancias de acarreo y costos asociados en el transporte de desmonte.

### **4.1 PLAN DE MINADO OPTIMIZADO**

---

Para poder comparar los diferentes escenarios a evaluar es necesario que se estos se rijan bajo un mismo plan de minado, el cual debe capturar el mayor valor que se pueda obtener teniendo en cuenta políticas de ley de corte, restricciones operativas y fechas de permisos ambientales que están sujetos a la habilitación de nuevas zonas de minado y botaderos. A continuación, se detalla los puntos importantes del plan de minado optimizado.

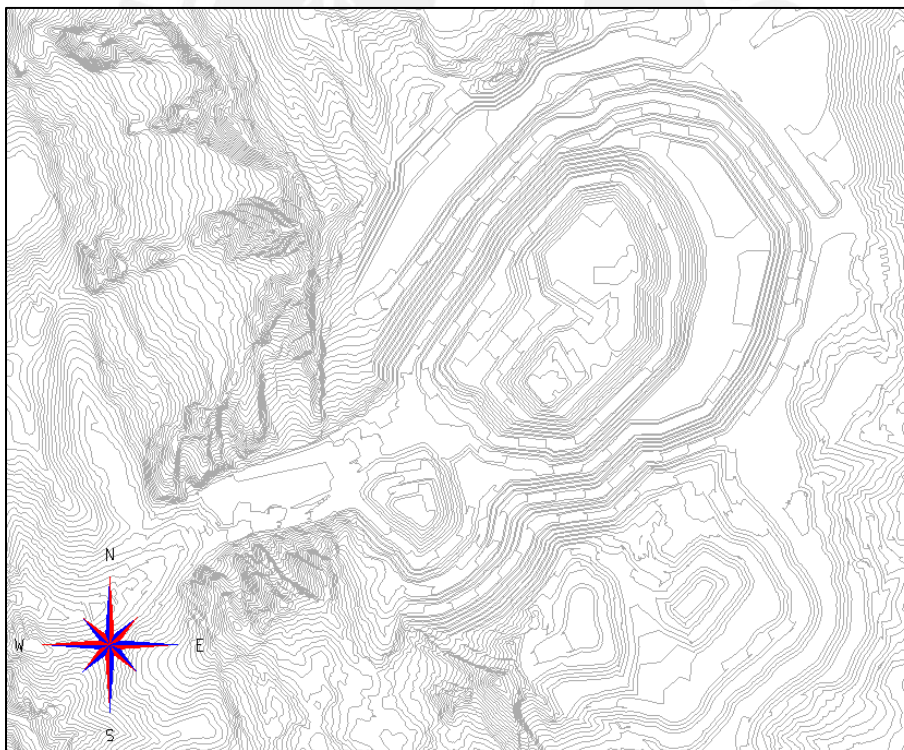
#### **4.1.1 SITUACIÓN ACTUAL**

---

Uno de los puntos más importantes del plan minado son los “inputs”, los cuales deben ser revisados y validados para su correcto uso y evaluación de escenarios. La topografía de inicio es uno de los “inputs” que más impacta en los primeros años del plan, ya que con este dato se puede verificar si el minado que se programó se ha desviado o adelantado ya sea en mineral o desmonte. Generalmente siempre se tiene una topografía que adelanta mineral y retrasa desmonte, complicando así los siguientes años. Para contrarrestar esta situación se realizan optimizaciones en el diseño, stocks, distancias de acarreo, etc.

En la Figura 14 se puede observar la topografía de inicio con la que se cuenta. Para este punto se tienen tres fases de minado, en la parte inferior la Fase 06 que ya se encuentra en mineral, luego la Fase 08 que está llegando a mineral y por último la Fase 09 que está en desbroce del desmonte de la parte superior.

La operación cuenta con 7 palas eléctricas y 4 palas hidráulicas, llegando a mover un máximo de 270 Mt de material por año. El total movido puede variar año a año debido a la restricción de equipos de acarreo, es por eso que siempre se busca optimizar las rutas de acarreo para los años que necesitan mayor desbroce. Con respecto a los equipos de acarreo se cuenta con 92 camiones Komatsu-930, 2 camiones Komatsu-980 y 25 camiones Cat-793, teniendo en conjunto una flota mixta de 119 camiones.



**Figura 14 Topografía de inicio. Elaboración propia**

#### 4.1.2 DISEÑO DE FASES OPTIMIZADO

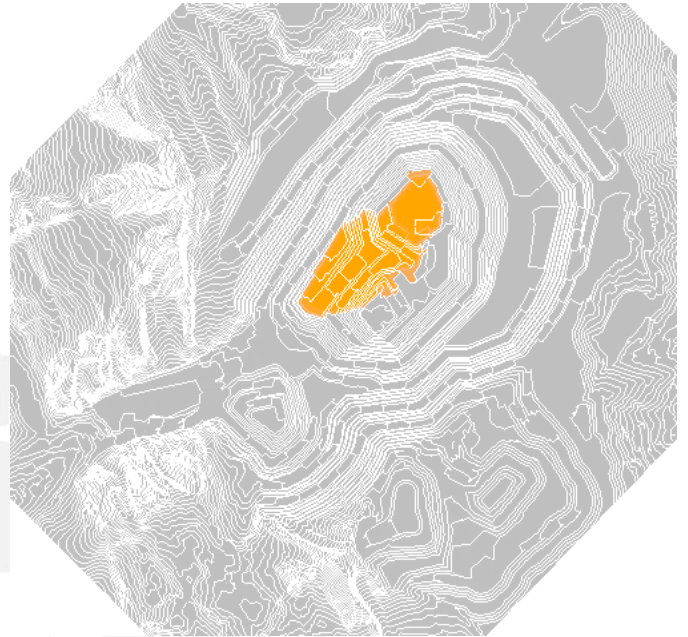
El diseño de fases que se desarrolla en esta mina se realiza a línea media y en 2D usando el software Qpit, es una manera muy rápida que permite modificar las topografías realizando corte y relleno. El diseño del pit final sigue una guía de optimización de Whittle y se ha usado la técnica de rampas paralelas para poder optimizar las paredes de los distintos sectores de la mina. Actualmente se está minando las fases F06, F08 y F09, pero el pit crece en el SE y NE con las Fases F10 y F11 respectivamente. Además, para la optimización de las paredes de las fases se utiliza la técnica de rellenos inpit, los cuales permiten minar las fases sin dejar rampa en algunos bancos. Esta técnica se detallará a continuación en la descripción de cada fase.

**Tabla 1 Inventario por Fases de Minado**

<b>Fase</b>	<b>Total Mineral</b>	<b>Cu</b>	<b>Zn</b>	<b>Total Desmonte</b>	<b>Total Material</b>	<b>SR</b>
	<b>Mt</b>	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>Mt</b>	<b>Mt</b>	
F06	60	1.1	0.5	43	103	0.7
F08	221	0.7	0.9	195	416	0.9
F09	215	0.9	0.7	820	1,035	3.8
F10	263	0.9	0.5	1,084	1,347	4.1
F11	167	0.6	0.7	462	629	2.8
<b>Total</b>	<b>926</b>	<b>0.8</b>	<b>0.7</b>	<b>2,604</b>	<b>3,530</b>	<b>2.8</b>

## FASE 6

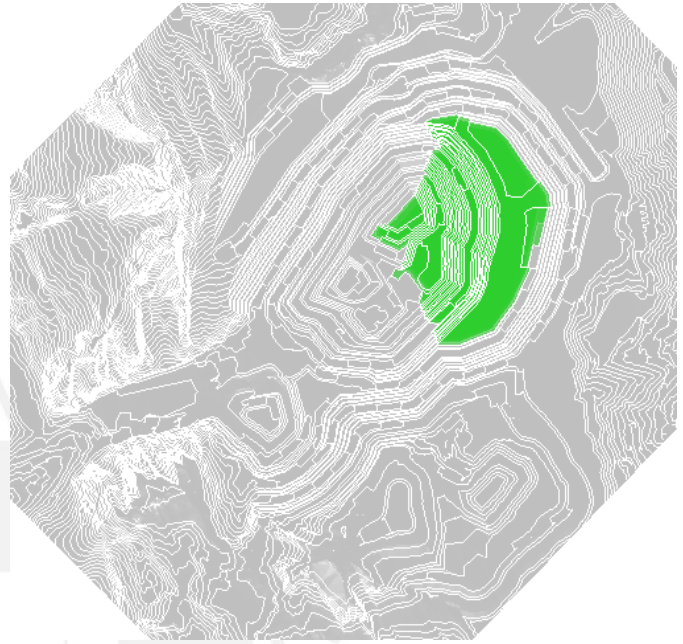
- La Fase 06 profundiza el mineral de la parte baja de la topografía de inicio. Su minado se realiza mediante el uso de un relleno inpit que permite la salida de los camiones por una zona que no es afectada por el minado de las demás fases.
- En la Figura 15 se muestra la topografía de la fase F06 solo en corte, es decir, sin mostrar el relleno inpit; donde se puede notar que los bancos inferiores llegan a una cota en la que ya no se tiene salida para los camiones y poder llegar a la zona alta. En total se tiene en esta fase 60 Mt de mineral y 43 Mt de desmonte.



**Figura 15 Fase 6**

## FASE 8

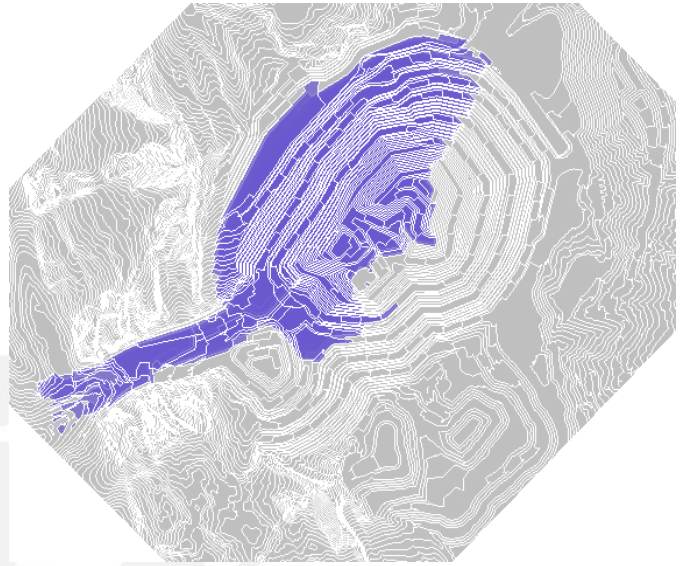
- La Fase 08 se desarrolla en la zona NE del tajo y actualmente se encuentra a punto de exponer mineral, por lo que su avance es crucial para la alimentación a la chancadora en los años posteriores.
- En la Figura 16 se muestra la topografía de la fase F08 en corte, donde se puede notar las rampas paralelas que son utilizadas para evitar las curvas (“switchbacks”) y de esta manera no perder mineral en el fondo del tajo.
- En esta fase se tiene 221 Mt de mineral y 195 Mt de desmonte.



**Figura 16 Fase 8**

## FASE 9

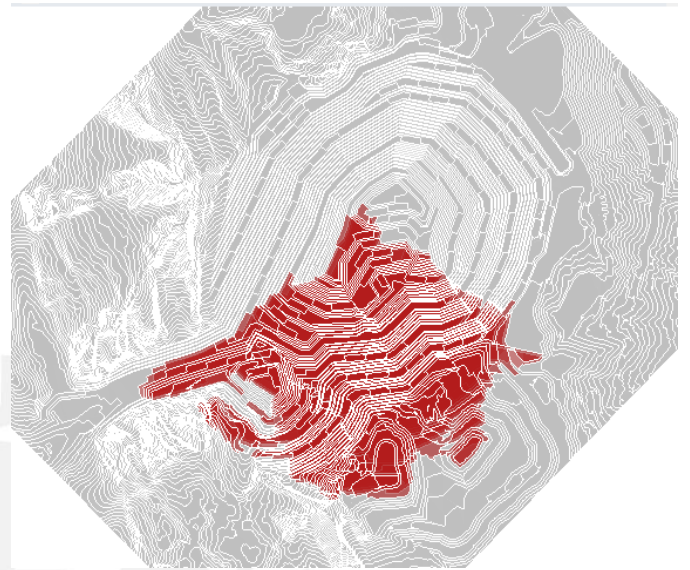
- La fase F09 continúa la misma metodología que la fase F08 con respecto a las rampas paralelas y el relleno inpit.
- En la Figura 17 se puede apreciar la topografía de la fase F09 en corte donde la fase está minando la zona NW.
- En esta fase se tiene 215 Mt de mineral y 820 Mt de desmonte, con una relación de desmonte/mineral de 3.8 que hace que los equipos se concentren en esta fase para poder bajar lo más rápido posible y exponer mineral. Además, esta fase deja pared final es la zona NW del tajo.



**Figura 17 Fase 09**

## FASE 10

- La fase F10 se desarrolla en la zona SE del tajo dejando pared final en ese sector. Esta fase se mina la mayor parte del relleno inpit de las fases anteriores por lo que al profundizar el minado es necesario bajar con curvas (“switchbacks”), pero se realiza en la zona de desmonte donde no afecta al mineral en la parte baja. Además, se termina de construir el acceso hacia la quebrada donde se ubica la nueva chancadora de mineral.
- En total, se tiene en esta fase 263 Mt de mineral y 1,084 Mt de desmonte, con una relación de desmonte/mineral de 4.1 por lo que la fecha de inicio de esta fase debe ser lo más antes posible y se verá en el capítulo de secuencia de minado.
- En la Figura 18 se puede apreciar la topografía de la fase F10.

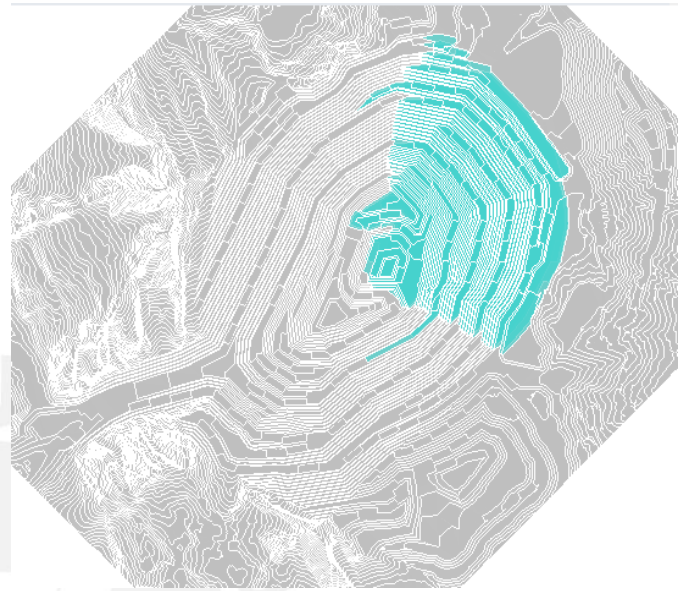


**Figura 18 Fase 10**



## FASE 11

- La fase F11 se desarrolla en la zona NE del tajo y es la fase final la cual conforma el tajo final de diseño. Esta fase termina de generar el sistema de rampas paralelas de la mina, sobre todo en la parte alta donde se aprovecha al máximo el ángulo de las paredes. En la parte inferior se profundiza con las curvas (“switchbacks”) dejadas por la fase F10.
- En esta fase se tiene 167 Mt de mineral y 462 Mt de desmonte.
- En la Figura 19 se muestra la topografía del tajo final de diseño. Además, en la Tabla 1 se muestra en inventario por fases de minado que se tiene en la mina.



**Figura 19 Fase 11**

### 4.1.3 SECUENCIA DE MINADO

La secuencia de minado se realiza con el fin de generar el mayor valor en ingresos además de cumplir con las restricciones operativas y mantener una exposición de mineral constante lo cual permita alimentar a la chancadora primaria de manera eficiente. A continuación, se detalla la secuencia de minado de los años clave de la operación minera.

## AÑO INICIAL: 2020

- En el primer año de la secuencia se mina las fases F06, F08 y F09. Las fases han sido divididas para poder llegar más rápido a mineral y que no sean limitadas por el avance vertical máximo de 8 bancos. En este año (2020), las fases F06 y F08 son las que alimentan mineral, mientras que la fase F09 está en desbroce. En la Figura 20 se observa la topografía de fin de periodo del año 2020.

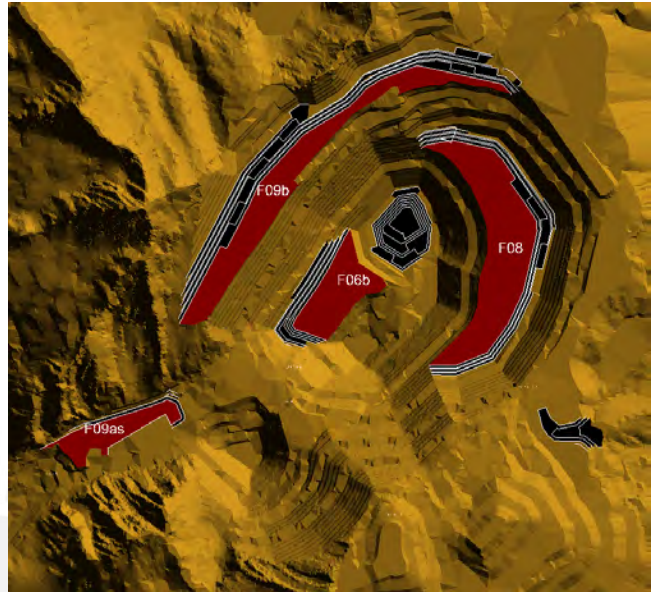


Figura 20 Secuencia de Minado Año 2020

## AÑO 2022

- En el año 2022 se termina de minar la fase F06, mientras que la fase F08 es la que continuará con la alimentación de mineral. La fase F09 sigue en etapa de desbroce con un avance vertical de 8 bancos por año para exponer mineral lo más rápido posible. Además, se inicia el minado de la fase F10, la cual se ha dividido en dos para que pueda avanzar más rápido. En la Figura 21 se observa la topografía de fin de periodo del año 2022.

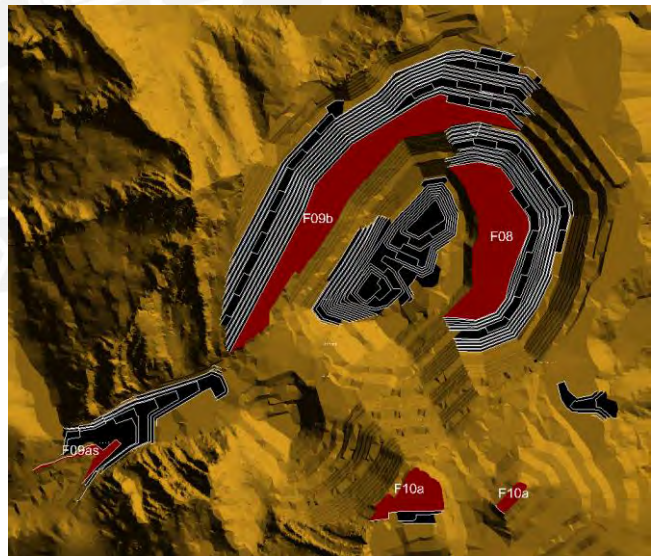


Figura 21 Secuencia de Minado Año 2022

## AÑO 2025

- En el año 2025 se termina con el minado de la fase F08. Los próximos años la alimentación de mineral será dada por la fase F09 (F09b y F09c), mientras que la Fase 10 aún está en desbroce y necesita un avance vertical de 8 bancos para no retrasar el mineral que va a exponer. La pared NW en la parte superior ya deja pared final con el minado de la Fase 09b. En la Figura 22 se observa la topografía de fin de periodo del año 2025.

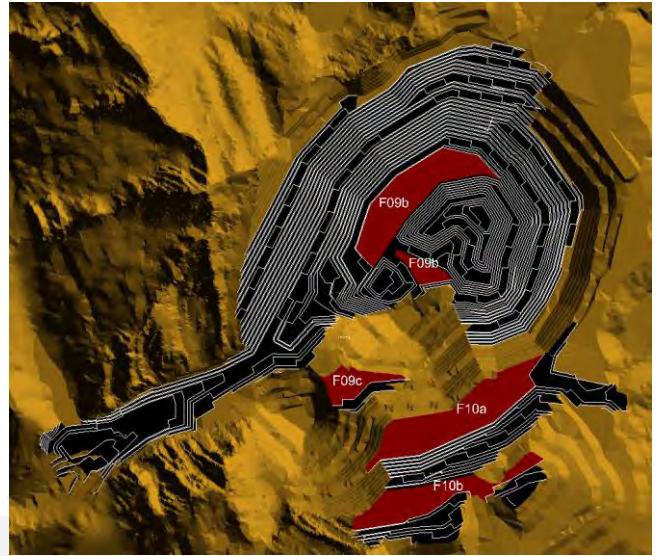


Figura 22 Secuencia de Minado Año 2025

## AÑO 2026

- En el año 2026 ya se comienza a minar la zona de la actual chancadora primaria, la cual contiene mineral en los bancos inferiores. La Fase 10 continúa con su desbroce para no retrasar mineral después de que se mine la Fase 09. Además, se comienza con el desbroce de la última fase de minado (Fase 11) que es la que va a dejar pared final en la zona NE del tajío. En la Figura 23 se observa la topografía de fin de periodo del año 2026.

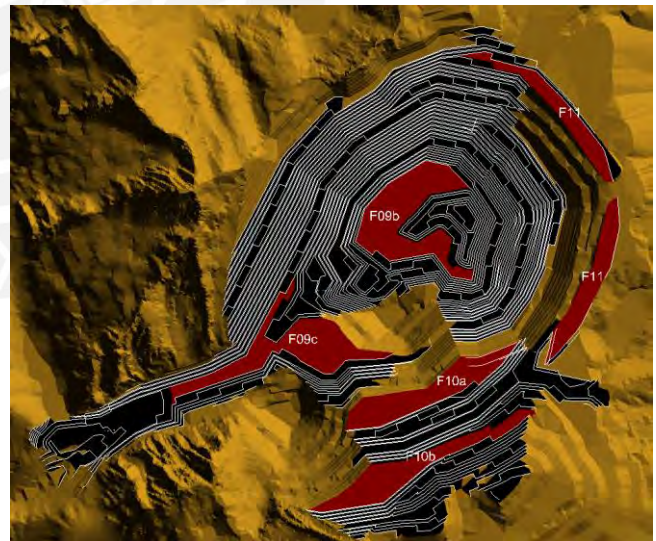


Figura 23 Secuencia de Minado Año 2026

## AÑO 2030

- En el año 2030 se termina de minar la Fase 09, mientras que la Fase 10 ya expone mineral y se encuentra preparada para alimentar a la chancadora de mineral. A partir de este año la Fase 11 comienza a bajar 8 bancos, dejando remanente en la capacidad de minado debido a que ya no hay más fases para minar y la mina ya va llegando al tajo final. En la Figura 24 se observa la topografía de fin de periodo del año 2030.

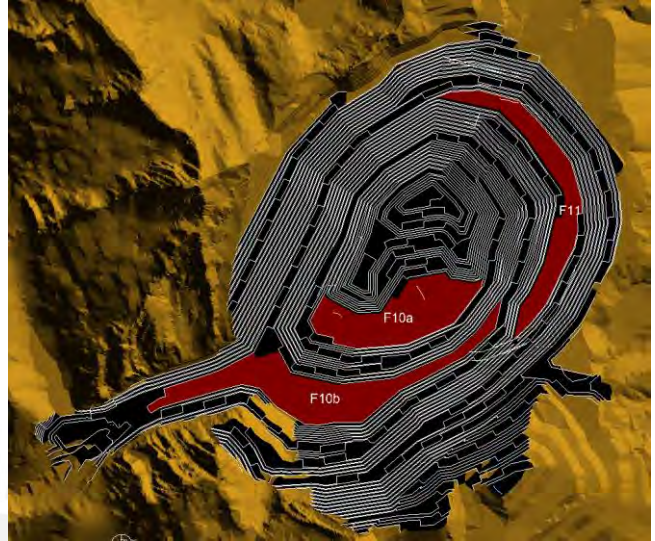


Figura 24 Secuencia de Minado Año 2030

## AÑO 2035

- En el año 2035, las Fases 10 y 11 ya están en la parte inferior del tajo compartiendo la alimentación a la chancadora de mineral. Las fases prácticamente ya están llegando a su fin y se encuentran casi juntas como si fuesen una sola fase. En la Figura 25 se observa la topografía de fin de periodo del año 2035.

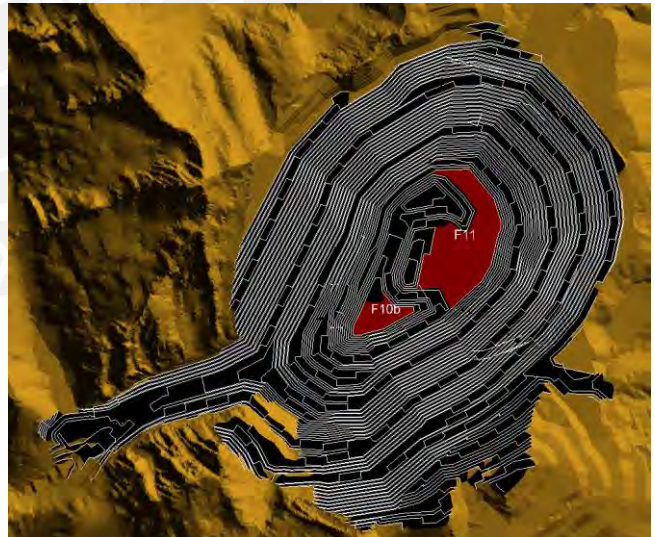
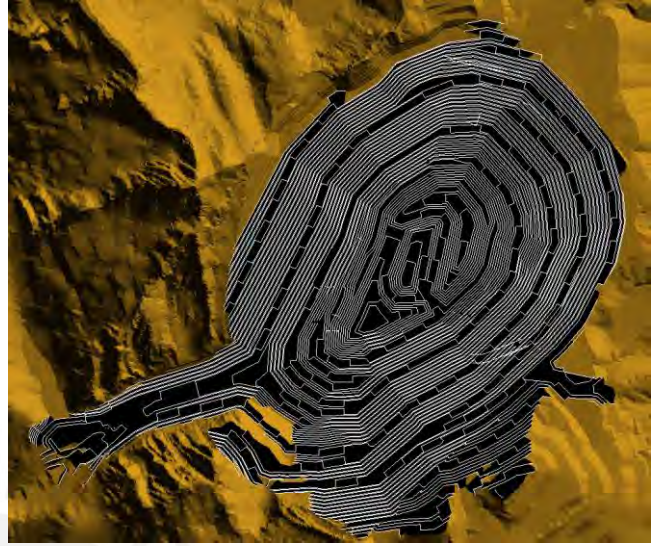


Figura 25 Secuencia de Minado Año 2035

## AÑO 2037

- En el año 2037, el plan de minado llega a su fin dejado como resultado el tajo final con la configuración de rampas paralelas en la parte superior para poder ganar mineral en la parte inferior que se profundiza con “switchbacks”, los cuales generan pérdidas de área de minado en el fondo. Además, en la parte inferior se deja un monte el cual no contiene mineral y se obvia su minado. En la Figura 26 se observa la topografía de fin de periodo del año 2037.



**Figura 26 Secuencia de Minado Año 2037**

#### 4.1.4 RESULTADOS DEL PLAN DE MINADO

En esta sección se describen los resultados del plan de minado siguiendo la cadena de valor. Es decir, se comienza describiendo los resultados de la producción mina, seguido por la secuencia de las fases minado, requerimientos de equipos de mina y alimentación a planta.

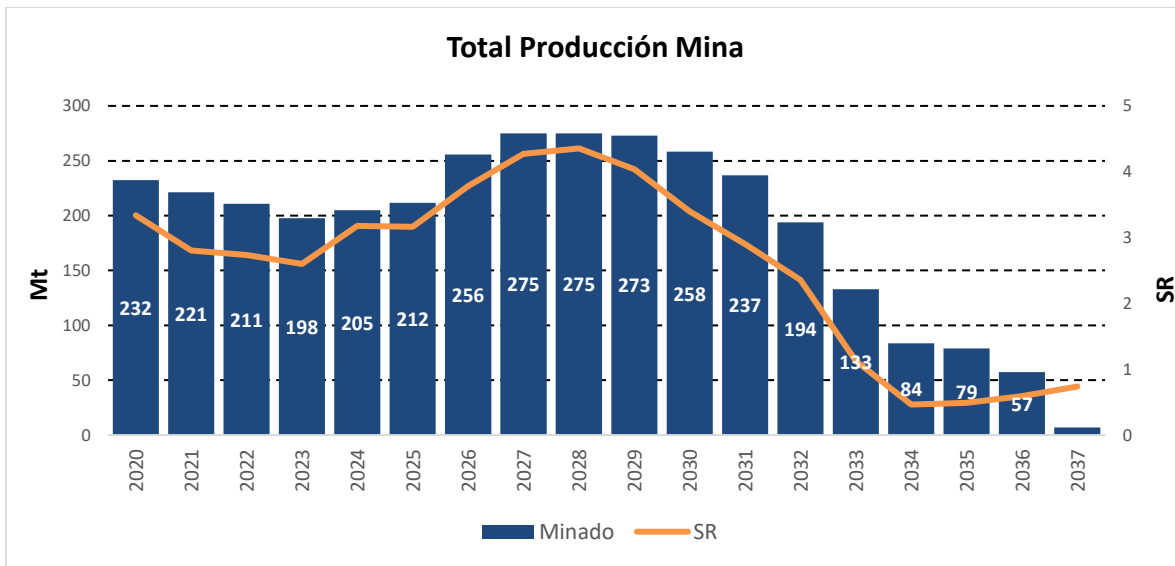
##### *Producción Mina*

El total de producción mina en el plan optimizado es 3,406 Mt y está compuesto por un total de 924 Mt de mineral (incluido baja ley) y 2,482 Mt de desmonte, lo cual resulta en una relación de desbroce de 2.7. Contabilizando el movimiento de material para desarrollar los proyectos de mina, remanejo de mineral y otros requerimientos, el total movido alcanza 4,035 Mt. El resumen del plan se muestra la Tabla 2.

**Tabla 2 Producción Mina**

<b>Producción</b>	<b>Unidad</b>	<b>2020</b>	<b>2021</b>	<b>2022</b>	<b>2023</b>	<b>2024</b>	<b>5A 2020-2024</b>	<b>LOM 2020-2037</b>
<b>Mineral</b>	<i>Mt</i>	54	58	56	55	49	272	924
<b>Desmonte</b>	<i>Mt</i>	179	163	154	143	156	795	2,482
<b>Minado</b>	<i>Mt</i>	232	221	211	198	205	1,067	3,406
<b>Movido</b>	<i>Mt</i>	270	256	251	258	244	1,278	4,035

En el año 2024 se puede apreciar una caída en la producción mina, esto se debe al incremento de la distancia equivalente y a tratar de mantener el perfil de camiones que se tiene actualmente. En los primeros 5 años se tiene una producción minada promedio de 214 Mt. En la Figura 27 se muestra el resumen del total movido junto con la relación desmonte mineral para toda la vida de la mina.



**Figura 27 Total Producción Mina**

*Desarrollo de fases de minado*

La Figura 28 muestra el desarrollo de las fases de minado del plan optimizado. Actualmente se tienen tres fases en operación, estas son: Fase 6, 8 y 9. La Fase 10 inicia el desbroce masivo en el año 2023 y Fase 11 en el 2026.

La Fase 6 se encuentra en producción de mineral mientras que la Fase 8 se encuentra en la transición de desmonte a mineral. La Fase 8 reemplazará a la Fase 6 en abastecimiento de mineral una vez esta se agote. La aparición de mineral en Fase 9 se da a partir del año 2024 en menor medida y para el año 2025 como fuente principal de mineral a proceso. La Fase 10 abastece de mineral a partir del año 2029.

Aunque los diseños de mina han reducido la dependencia de una sola fuente de mineral en el plan de minado, la Tabla 3 muestra que en algunos periodos una de las fases es la dominante en proveer mineral. Así, el 2022 al 2024 se extrae mineral principalmente de fase 8. En tal sentido, es importante el desbroce en la Fase 9.

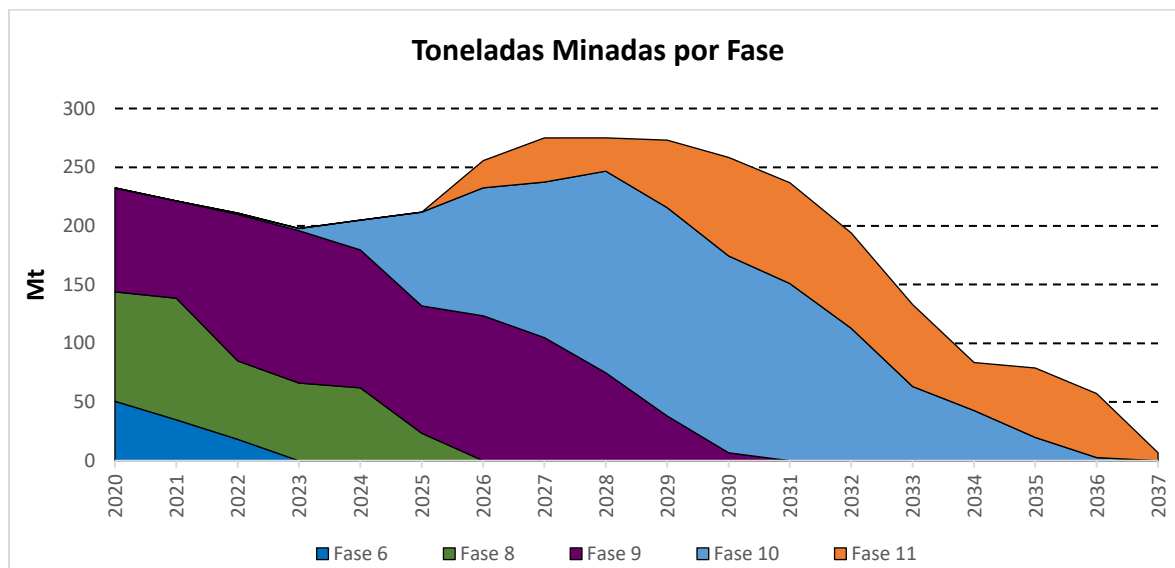


Figura 28 Producción por fase de minado

Tabla 3 Mineral por fase

Fase	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037
Fase 6	30	19	11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fase 8	24	39	45	55	44	15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fase 9	-	-	-	-	5	36	53	51	41	22	5	-	-	-	-	-	-	-
Fase 10	-	-	-	-	-	-	-	1	10	32	54	57	44	27	23	11	2	-
Fase 11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	14	35	34	42	34	4

### Estimación de Equipos

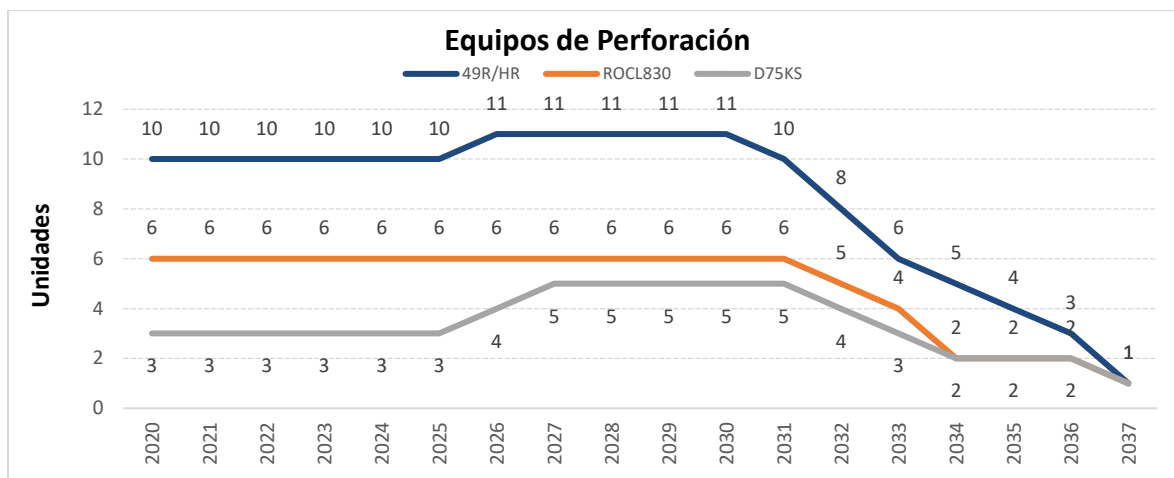
Los resultados de la estimación de equipos se mostrarán para los equipos de perforación y carguío.

Los equipos de acarreo se mostrarán cuando se simulen los diferentes casos que se han elaborado para la presente tesis.

Como equipos de perforación se tiene 3 flotas, los cuales sirven para distintas actividades. La perforadora 49 R/HR de Ø 12 1/4” se utiliza para los bancos en producción, la perforadora ROCL830 de Ø 9 7/8” para precorte y finalmente la perforadora D75KS para ambas tareas. En la



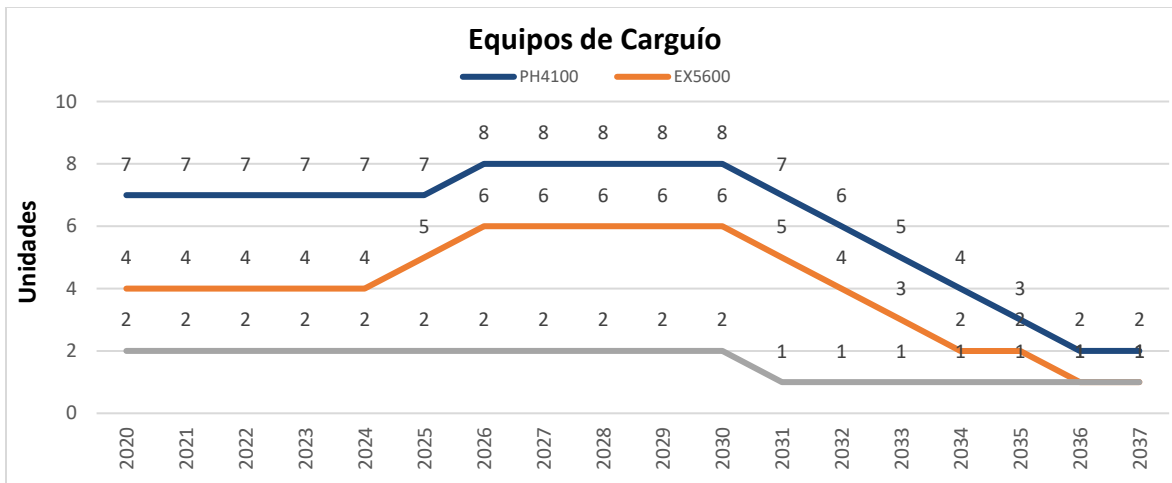
Figura 29, se muestra el requerimiento de equipos de perforación para poder cumplir con el plan de mina presentado.



**Figura 29 Flota de Perforación**

Con respecto a los equipos de carguío, se tienen tres flotas diferentes las cuales son: Pala Eléctrica P&H 4100, Pala Hidráulica Hitachi EX5600 y cargador 994F. Las palas eléctricas tratan de posicionarse en fases grandes o que están en desbroce donde tienen un ancho adecuado para su máxima productividad, además se trata de que se reubiquen lo menos posible para aumentar su utilización.

En la Figura 30 se muestra el requerimiento de equipos de carguío. Se observa que a partir del año 2026 se compra una pala eléctrica adicional debido al desbroce que se tiene que realizar en la Fase 11 para poder llegar a exponer mineral en el momento adecuado.



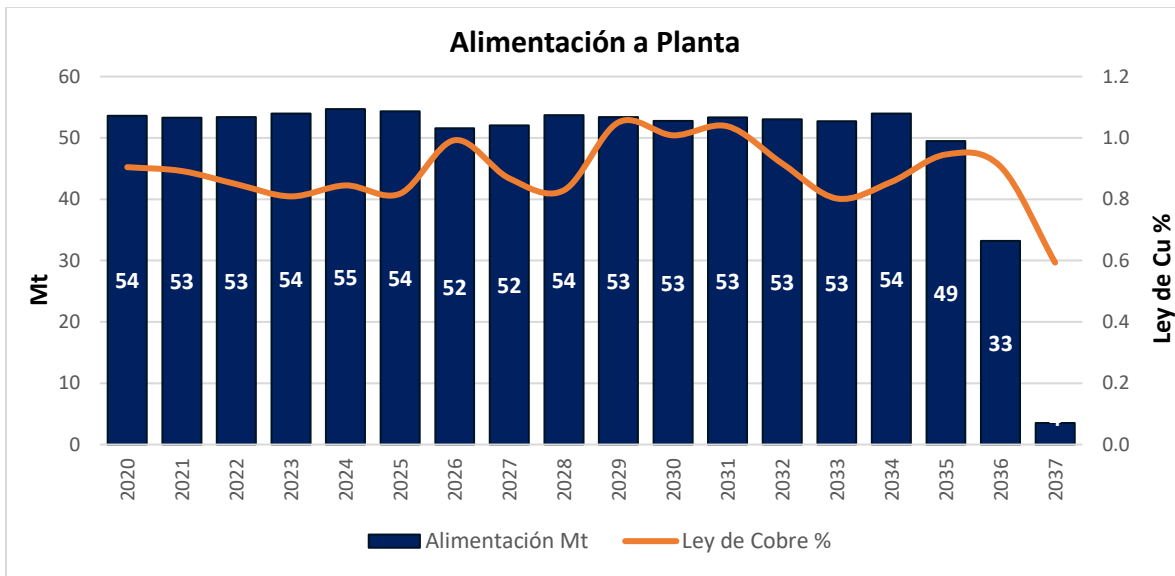
**Figura 30 Flota de Carguío**

### *Alimentación a planta*

La alimentación a planta durante toda la vida de la mina se mantiene constante y se logra cumplir con el objetivo de procesar 886 Mt (ver Tabla 4) los cuales llenan la presa de relaves que se tiene planeado construir. Con respecto al tonelaje alimentado, se puede observar en la Figura 31 que varía en algunos años y esto se debe principalmente a que se alimentan distintos tipos de mineral que tienen durezas diferentes y por ende los minerales más duros cumplen las horas de molienda antes que los más suaves y como consecuencia se da una menor alimentación en tonelaje al año.

**Tabla 4 Alimentación a Planta**

Producción	Unidad	2020	2021	2022	2023	2024	5A 2020-2024	LOM 2020-2037
Alimentación	Mt	54	53	53	54	55	269	886
Ley de Cobre	%	0.90	0.89	0.85	0.81	0.85	0.86	0.90
Ley de Zinc	%	1.14	1.16	1.05	0.98	0.62	0.99	0.77



**Figura 31 Alimentación a Planta**

## 4.2 ESCENARIO CON SISTEMA CONVENCIONAL

Se continúa con los pasos de la metodología planteada y realizado el plan de minado se simula un escenario que trabaja de manera convencional con el sistema pala camión, en adelante llamado “Escenario Base”.

En la Figura 32 se observa el resultado obtenido de la simulación, donde se puede apreciar que el año 2027 el número de camiones alcanza un pico de 162 camiones, esto debido a la profundización de la fase 9 y fase 10 ese año y al aumento en la cantidad de movimiento de desmonte progresivo.

En la Figura 33, se observa fácilmente lo último, donde el tonelaje de desmonte incrementa en +21 Mt año 2027.

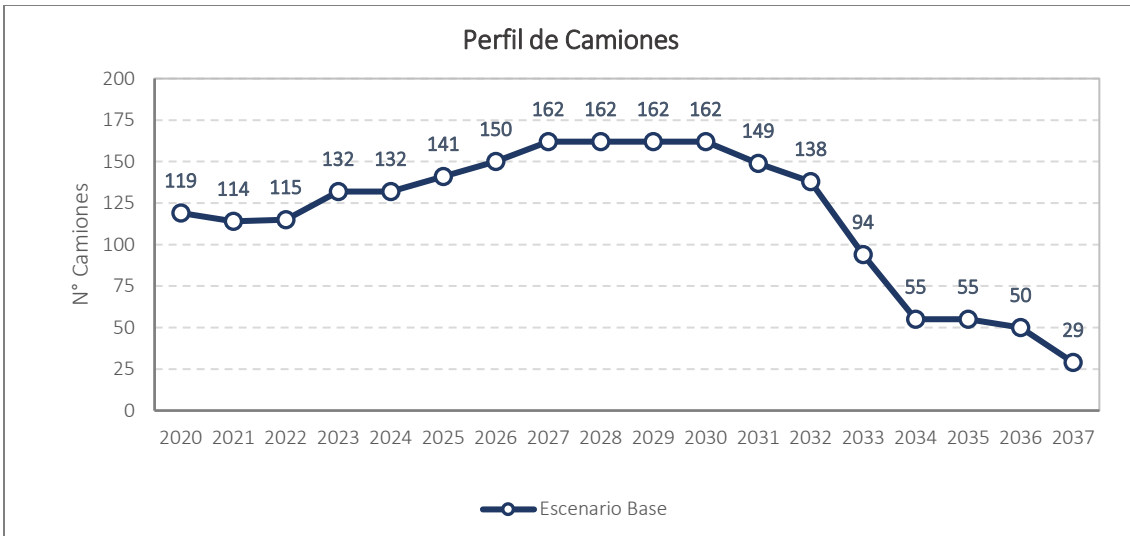


Figura 32 Perfil de camiones Escenario Base

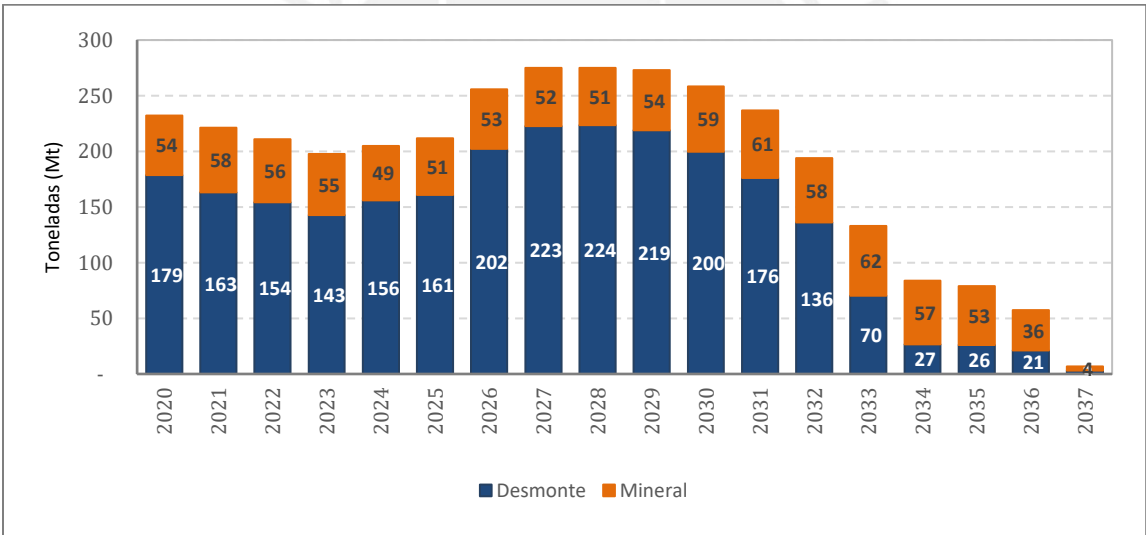
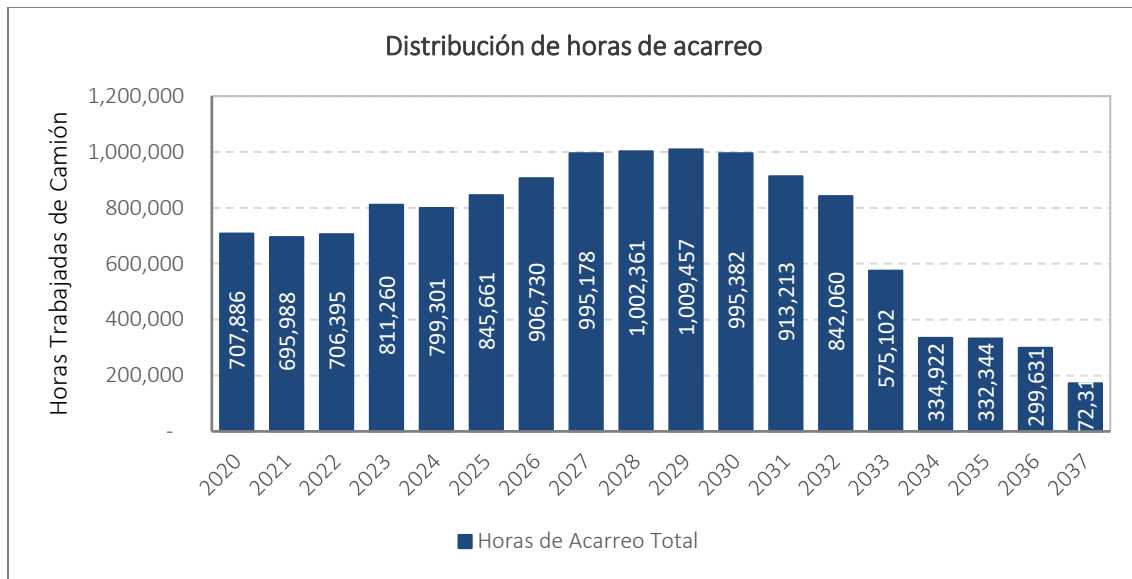


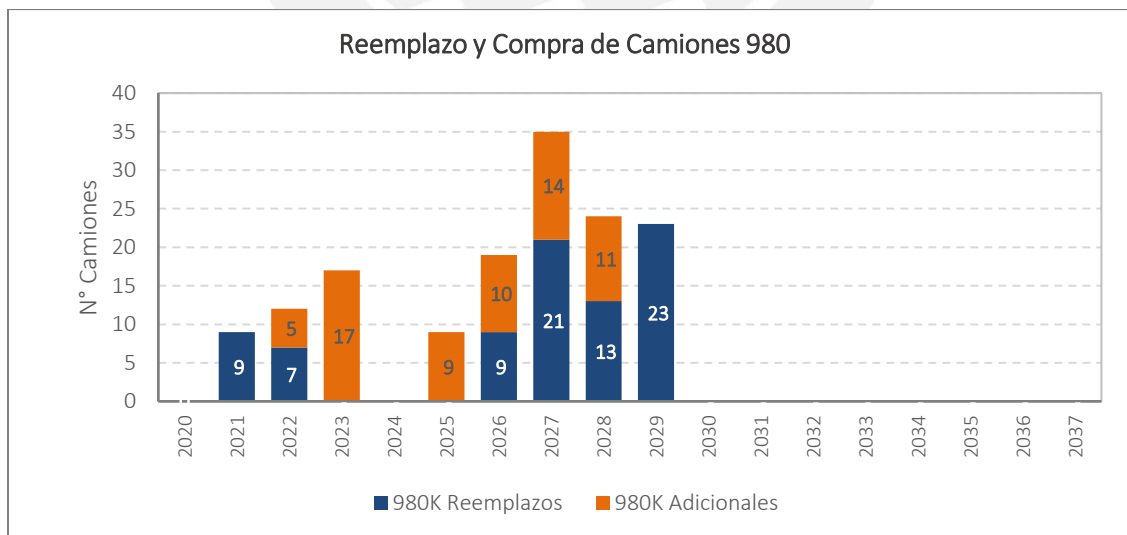
Figura 33 Tonelaje de Mineral y Desmorte (Plan Optimizado)

Asimismo, como resultado de la simulación se puede observar las horas de acarreo del material (Figura 34).



**Figura 34 Horas de Acarreo Total (Escenario Base)**

Un punto relevante para el análisis de los casos es el reemplazo y la compra de camiones que se lleva a cabo debido a sus años de vida y necesidad de incremento de equipos respectivamente. En la Figura 35 se puede observar la evolución de estos parámetros anualmente.



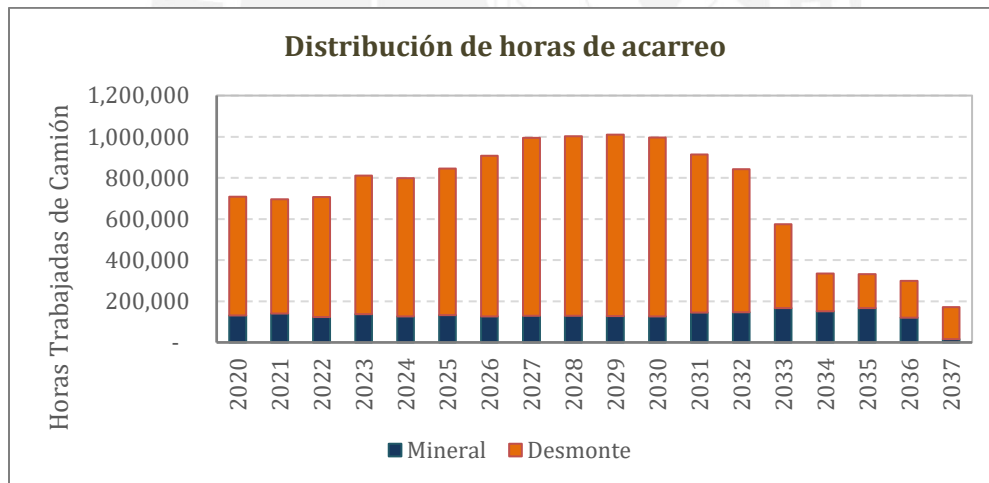
**Figura 35 Camiones Adicionales (Escenario Base)**

### 4.3 ANÁLISIS PARA APLICACIÓN DE SISTEMAS IPCCS

Debido a la gran cantidad de equipos de acarreo que se requieren en el Escenario Base para satisfacer la operación, se realiza un análisis para la implementación de sistemas de acarreo alternativos que puedan brindar soluciones alternativas a la compra de equipos adicionales.

En esta línea, se realizan las siguientes observaciones:

- Las horas operativas de los camiones incrementan significativamente a partir del año 2026, lo que en efecto aumenta el número de flota de camiones ese año.
- Las horas de incremento, están dedicadas en su mayoría a acarrear desmante (ver Figura 36), esto se debe a las largas distancias hacia los botaderos y el gran tonelaje de este material.



**Figura 36 Distribución de horas de acarreo según tipo de material (Escenario Base)**

A partir de estos dos puntos, se encuentra valioso analizar la implementación de sistemas de chancado y fajas de transporte para el material de desmante. En las siguientes secciones se desarrolla el análisis de cantidad de sistemas, ubicación de sistemas y, la disponibilidad de estas ubicaciones, capacidad y esquema de descarga para estos sistemas.

### 4.3.1 POTENCIAL DE LA UTILIZACIÓN DE LOS SISTEMAS DE CHANCADO

---

#### *Capacidad productiva de los sistemas*

La capacidad del sistema está dada por la capacidad global del conjunto de componentes, es decir, de la chancadora, fajas transportadoras, y equipos de disposición de desmonte. A continuación, se describen brevemente la estimación de capacidades y productividades, desde el punto de vista de la ingeniería de la infraestructura

#### *Capacidad de diseño de los componentes*

A continuación, la capacidad de los componentes.

- Chancadora. Se proponen chancadoras giratorias montadas en estructuras semi-móviles de 63"x130'" con 12,000 t/h de capacidad de diseño; con dos bahías de descarga y una capacidad de tolva de carga viva de 544t. y una cuarto de compensación de 544t de carga viva (1.5 camiones de 370-t).
- El sistema de transporte considera fajas de 2100 mm de ancho con capacidad de diseño de 12,000 t/h.
- Equipos de disposición de desmonte, se considera que estos equipos tendrán la misma capacidad que el sistema de transporte, es decir, 12,000 t/h.

#### *Disponibilidad mecánica de los componentes*

Las disponibilidades mecánicas de la chancadora, así como también un valor de "utilización" basado en el benchmarking, con la cual se puede determinar una capacidad productiva de diseño anual de 68.3 Mt.

**Tabla 5 Capacidad de la Chancadora**

<b>Propiedades</b>	<b>Sistema de Desmante</b>	
	<b>Chancadora</b>	<b>Sistema</b>
Disponibilidad mecánica	85%	85%
Utilización	83%	
Utilización Total	70%	
Capacidad de Diseño (Máxima), tph	12	
Capacidad Productiva de Diseño Anual, t	73,378,000	
Capacidad Nominal, kt/d	201.6	

Con esta capacidad de tonelaje de desmante estimado que puede procesar una chancadora, se analiza el potencial que tiene en el plan optimizado realizado.

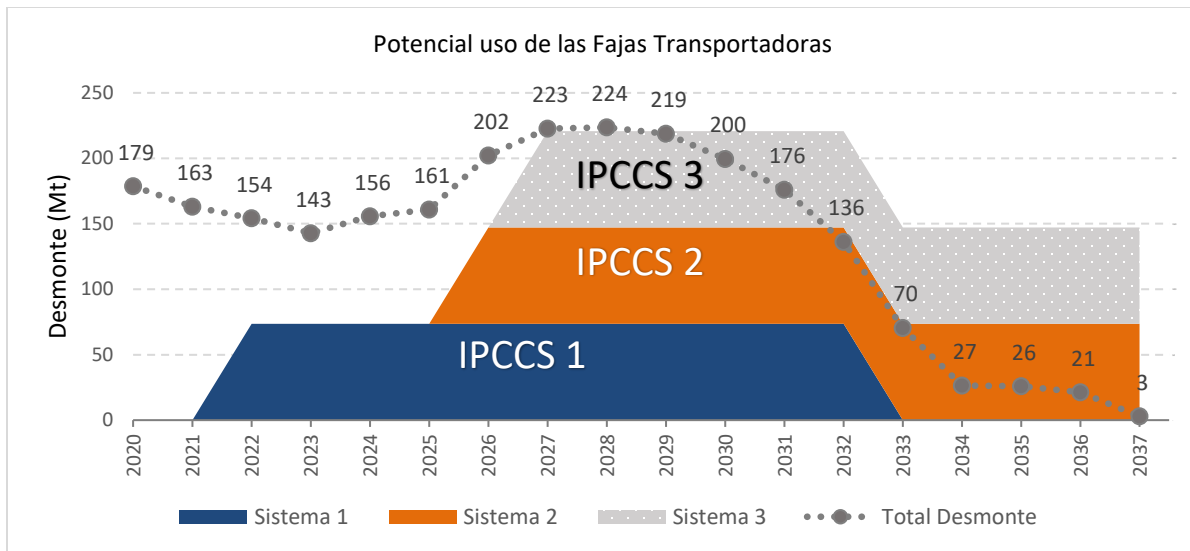
En la Figura 37 se observa el tonelaje que puede cubrir cada sistema al ingresar, se debe tener en cuenta que ya existen camiones en la operación que aún tienen años de vida, por lo que el tonelaje de desmante que mueven los sistemas no deben ser el tonelaje total que existe para cada periodo.

El primer sistema (área azul) se estima que podría ingresar el año 2022, debido al tiempo de construcción de infraestructura a partir de la fecha que se está realizando el plan.

A partir del año 2026, el tonelaje de desmante incrementa considerablemente (+25% respecto al año anterior) por lo que se podría incorporar un segundo sistema y aun así tener un excedente que se transporte por camiones.

Como se puede apreciar, de ingresar un tercer sistema el año siguiente, no dejaría un excedente para usar los camiones con los que ya se cuenta. Además, el tiempo de vida del sistema en este caso sería relativamente corto (4 años), por lo que no vale la pena estudiar la implementación de un tercer sistema en adelante.





**Figura 37 Potencial uso de Sistemas IPCCS**

#### 4.3.2 LOCALIZACIÓN ÓPTIMA DE LOS SISTEMAS DE CHANCADO

La ubicación ideal de la plataforma de la chancadora de desmorte se define inicialmente considerando el aspecto físico, el cuál considera el centro de masa del material objetivo que es enviado a la chancadora, en este caso el desmorte. El centro de masa brinda una aproximación de la elevación en la cual se debe ubicar la chancadora.

##### 4.3.1.1. Aspecto Físico: Centro de masa del material

Como se puede observar en el plan optimizado, el yacimiento es profundo (780 m.) y tiene fases con alto tonelaje de desmorte a desbrozar, lo que atrasa la exposición del mineral debido al transporte hasta los botaderos. Es por esto que ubicar la chancadora cercana a donde se encuentra concentrado el desmorte significará una reducción significativa en los tiempos y costos de acarreo.

En la Figura 38, la línea roja indica el centro de gravedad para el tonelaje de desmorte total (Nivel 4,133). Es decir, ubicar una chancadora en este nivel sería lo óptimo en caso se implemente un solo sistema. Por otro lado, si se parte de la hipótesis de ubicar dos sistemas, se toma en cuenta el

nivel 4,133 (centro de gravedad total) y de este nivel se divide la masa en dos de manera proporcional. Así, se determinan los niveles 3,983 y 4,313 como nuevos centros de masa de ambas particiones.

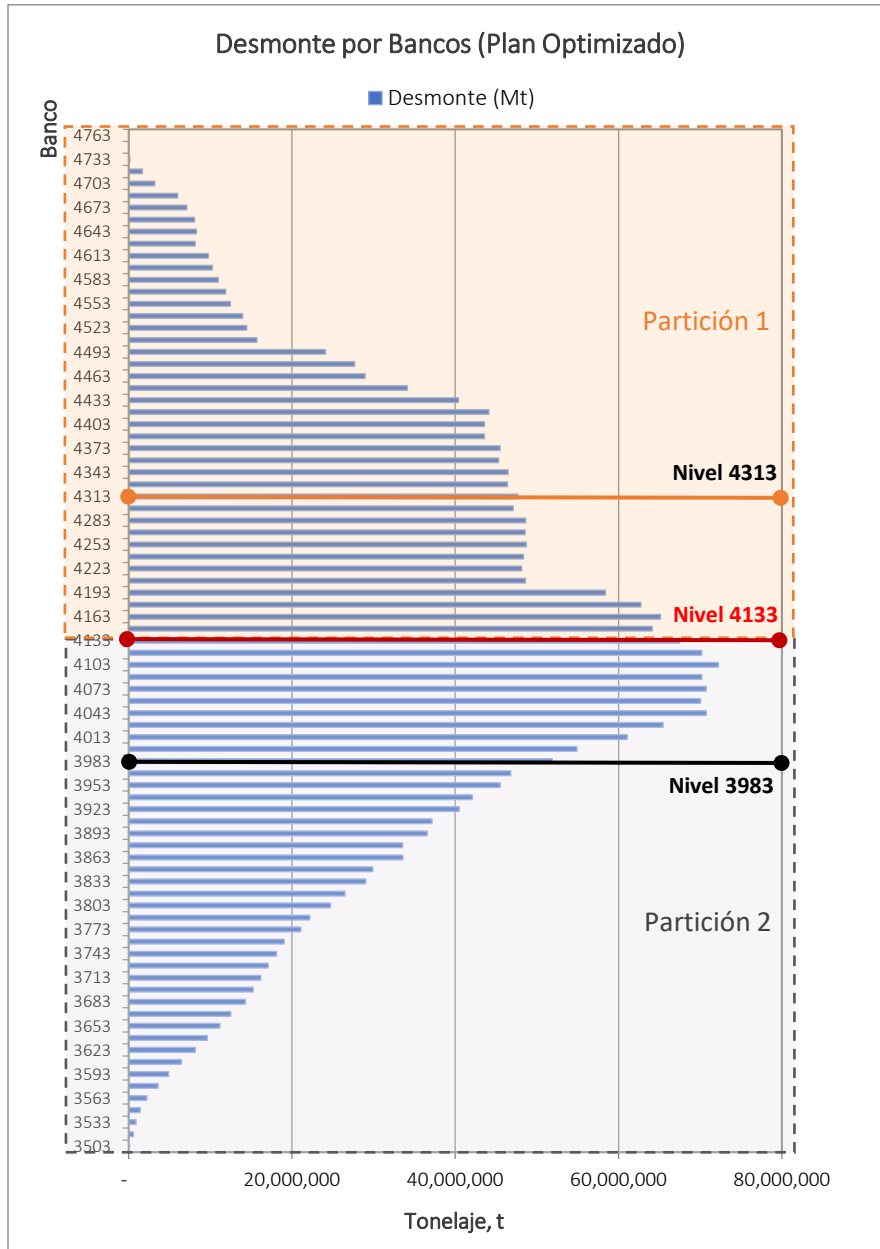


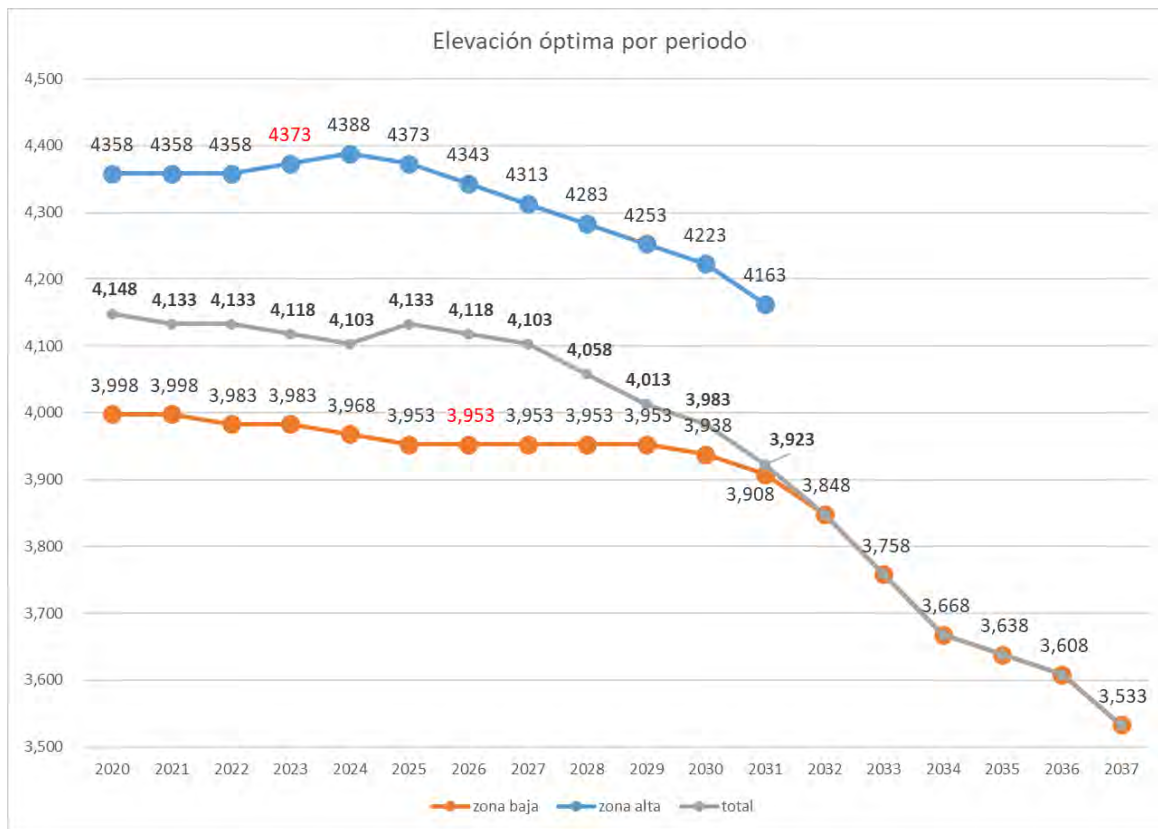
Figura 38 Tonelaje de Desmante por bancos en el Tajo

De esta gráfica se deduce que si fuera posible extraer el mineral en un instante, el nivel óptimo de la chancadora estaría muy cercano al Nivel 4,133. Sin embargo, al explotarse el tajo mediante fases y durante un periodo extenso de años, el factor “tiempo” hace que el centro de masa sea afectado por dicho factor, es decir, la masa que se extrae en los primeros periodos tiene una mayor ponderación sobre los que se extraen últimos.

#### *4.3.1.2. Aspectos Operativos: Optimización de las distancias de acarreo según elevación óptima*

Desde el punto de vista operativo la elevación óptima para la chancadora está dada por la que sea capaz de minimizar las distancias de acarreo hacia este destino. Para esto se determina la elevación óptima por tonelaje acumulado, se asume que la chancadora se coloca en un determinado periodo y permanece en esa ubicación, por lo que todo el material de desmonte que se tenga que mover en los años posteriores son considerados para estimar la cota óptima. Además, se toma en consideración que los años posteriores son ajustados por el factor tiempo con una tasa de descuento de 8% anual aplicado sobre el tonelaje de desmonte.

Entonces, la Figura 39 ilustra el nivel óptimo de las chancadoras (chancadora zona alta y chancadora zona baja) en el tiempo, es decir, el nivel que se tiene que elegir dependiendo de cuando se tome la decisión de implementar los sistemas. Si la masa se parte en dos, la línea azul muestra el nivel óptimo de la chancadora para la masa superior (los niveles superiores) y la línea naranja para la masa inferior. De este modo, resulta conveniente que, si la primera chancadora se coloca en la masa superior el año 2023, se elegiría el nivel 4,373 como nivel óptimo. Y si la segunda chancadora se coloca en la masa inferior el año 2026, el nivel óptimo es el 3,953. Del mismo modo, la línea gris muestra el nivel óptimo si sólo se tuviese que colocar una chancadora en el plan de mina.

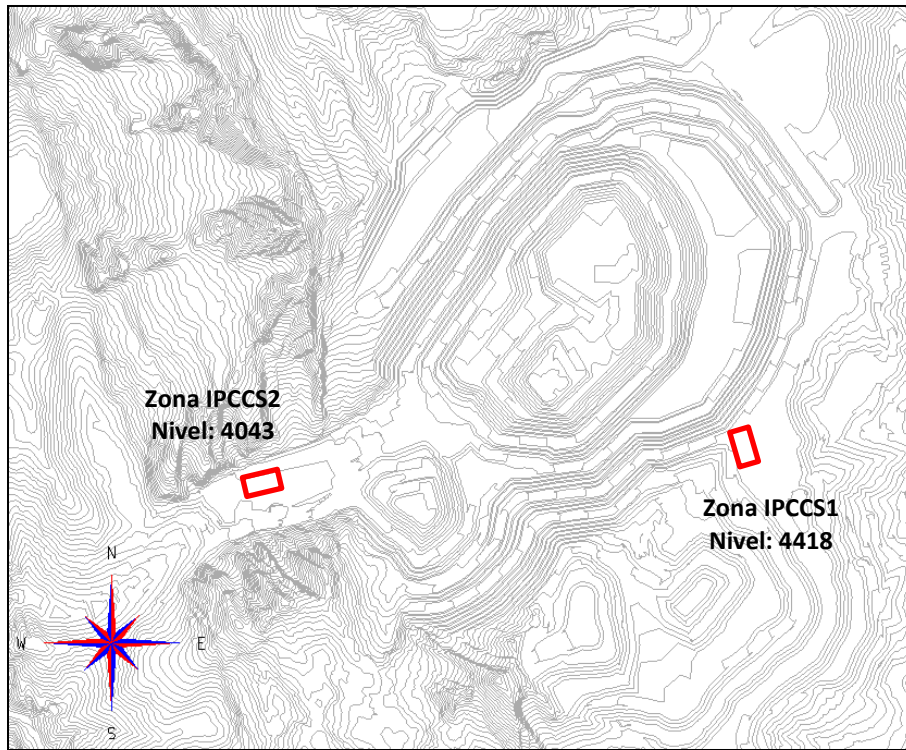


**Figura 39 Elevación óptima por periodo**

#### 4.3.1.3. Zonas disponibles para la ubicación de Sistemas de Chancado

Una vez definidos los niveles de referencia para cada partición, se buscan espacios disponibles en la operación para ubicar las chancadoras de desmote. Estos espacios no deben interferir con la infraestructura de la mina y las rampas de salida de los camiones.

Teniendo en cuenta estas observaciones, se proponen: una ubicación de chancado para la masa superior llamada: Zona IPCCS1 y una ubicación para la masa inferior llamada: Zona IPCCS2 (Figura 40).



**Figura 40 Alternativas de ubicación para los Sistemas de chancado**

Como se puede observar, las alternativas propuestas no coinciden exactamente con los niveles donde se encuentran los centros de gravedad de cada partición. Sin embargo, al encontrarse muy cerca de éstos y no interferir con la infraestructura de la operación, se consideran adecuados para seguir evaluándolas.

Adicionalmente, se debe tener en cuenta que estas opciones no se encuentran disponibles actualmente, si no que quedan expuestas conforme la secuencia del plan avanza. Por esto, es importante tener en consideración los años en los que estas zonas quedan expuestas y a partir de la misma, considerar un tiempo de construcción del sistema de chancado (comúnmente entre 2 o 3 años, depende de la infraestructura requerida), posteriormente, el inicio de su operación,

### 4.3.3 TRAZO DE LAS FAJAS TRANSPORTADORAS

---

El alto contenido de tonelaje de desmote en el plan exige a la operación aumentar su capacidad de carguío y de acarreo. Además, la profundización del tajo aumenta la distancia de acarreo dentro del tajo, lo que origina la necesidad de más equipos de acarreo.

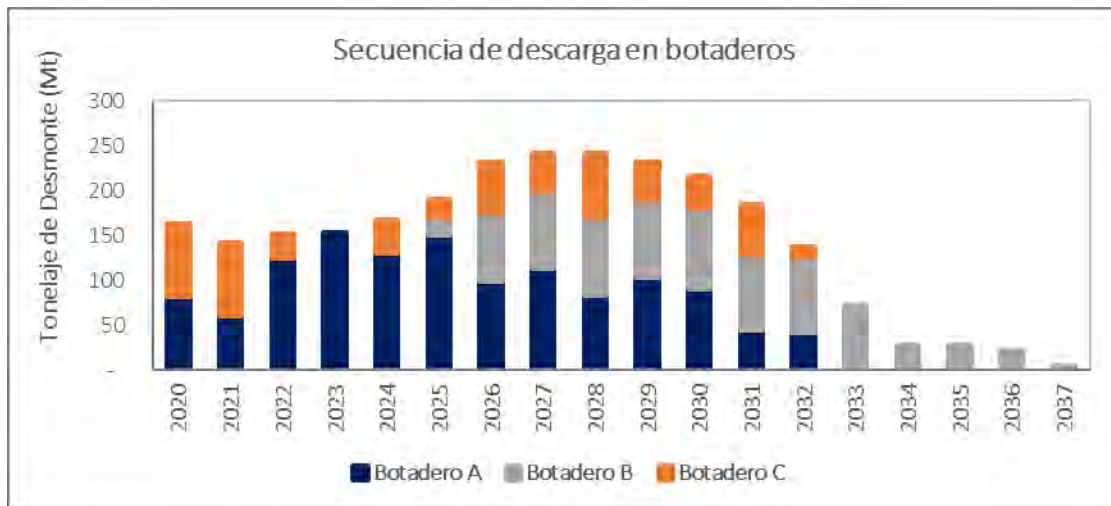
Por otro lado, la distancia de acarreo es cada vez mayor debido al agotamiento progresivo de las áreas de descarga cercanas al tajo. Como se puede observar en la Figura 41, existen dos botaderos cercanos al tajo, pero con poca capacidad y luego se encuentran los botaderos A y B, lo cuales cuentan con gran capacidad disponible, pero se encuentran en una zona más alejada. La distancia de acarreo incrementa aún más cuando las áreas a nivel de la salida del tajo se agoten y se requiera aprovechar el espacio de las partes altas de los botaderos –lo opuesto a la profundización del tajo.

El botadero C, al tener poca capacidad de almacenamiento, tendrá una vida reducida, lo cual no lo hace atractivo como destino para las fajas transportadoras.



**Figura 41 Botaderos disponibles en la operación**

Como se observa en la Figura 42, el botadero A es el destino donde mayormente se deposita el desmonte, entre los años 2022 y 2030. A este lo sigue el botadero B, entre los años 2026 y 2033.



**Figura 42 Secuencia de Desmonte depositado en Botaderos**





#### 4.4 ESCENARIO CON UN SISTEMA DE CHANCADO Y TRANSPORTE DE DESMONTE

En este escenario se realiza la implementación de 1 sistema IPCCS ubicado en la cota 4,418, debido a que esta zona se habilita en el 2023, lo cual permite reducir el Opex y Capex de los camiones con mayor anticipación. Además, esta localización también ha sido elegida con el motivo de reducir tiempos de ciclo en las fases de desmonte que aún están en la parte superior del tajo.

En la Figura 43 se puede observar que el perfil máximo de camiones, en los años donde el total movido supera los 300 Mt, se reduce a 140 camiones. De esta manera se ahorra 22 unidades en Capex y Opex entre equipos de reemplazo y crecimiento. Además, se puede observar que a partir del año 2023 se realiza el impacto positivo del sistema IPCCS, el cual comienza a descargar en el botadero mediante el sistema de fajas que finalmente termina en un “Spreader” y reduce los ciclos de acarreo para el desmonte de las fases en desbroce.

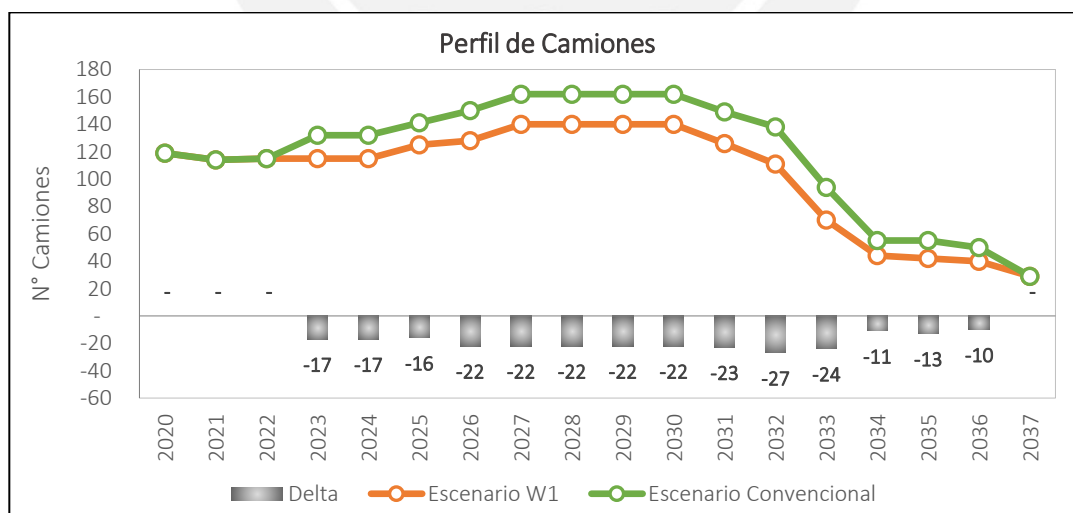
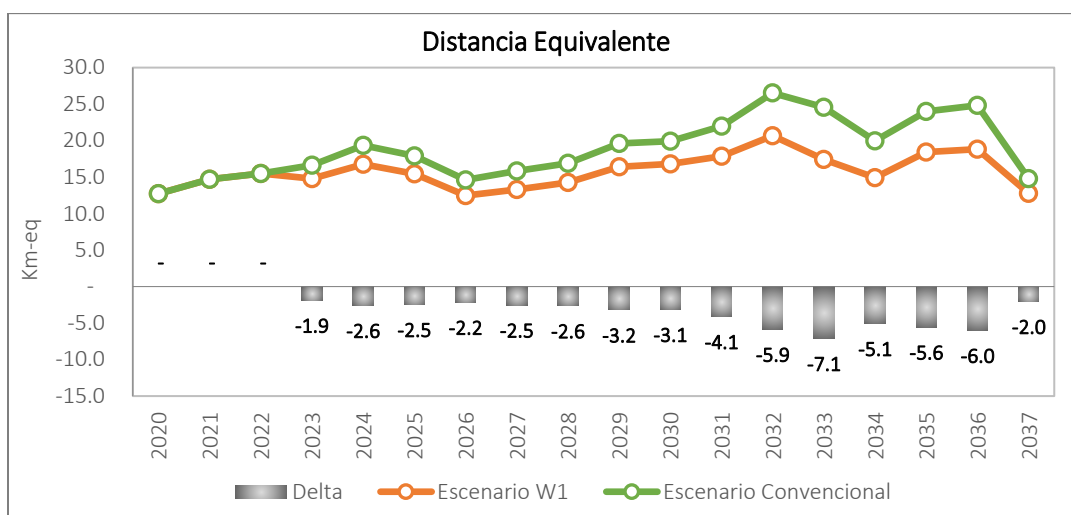


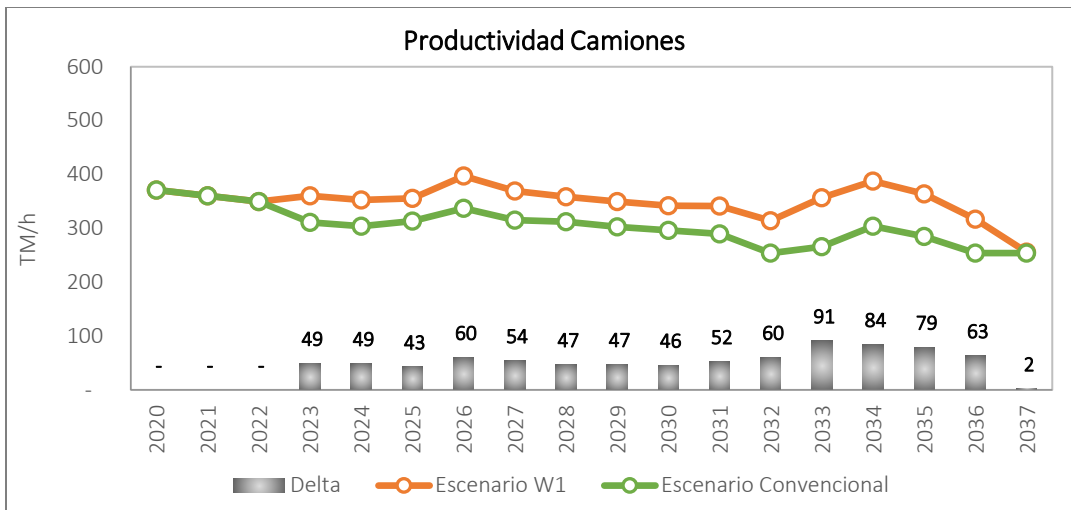
Figura 43 Perfil de Camiones - Sistema Convencional vs Sistema W1

Al tener un nuevo punto de descarga en la chancadora de desmonte, se reducen las distancias de acarreo debido a que está ubicado en la salida del pit. Esto se traduce en una distancia equivalente menor a partir de la entrada del sistema IPCCS en el 2023. Además, en la Figura 44, se puede apreciar que desde el 2032, la distancia equivalente se reduce en promedio en 6 km por el motivo que en los botaderos ya se encuentran descargando en los niveles superiores y al utilizar el sistema IPCCS, los camiones se ahorran el acarreo en subida que realizan al estar cargados.



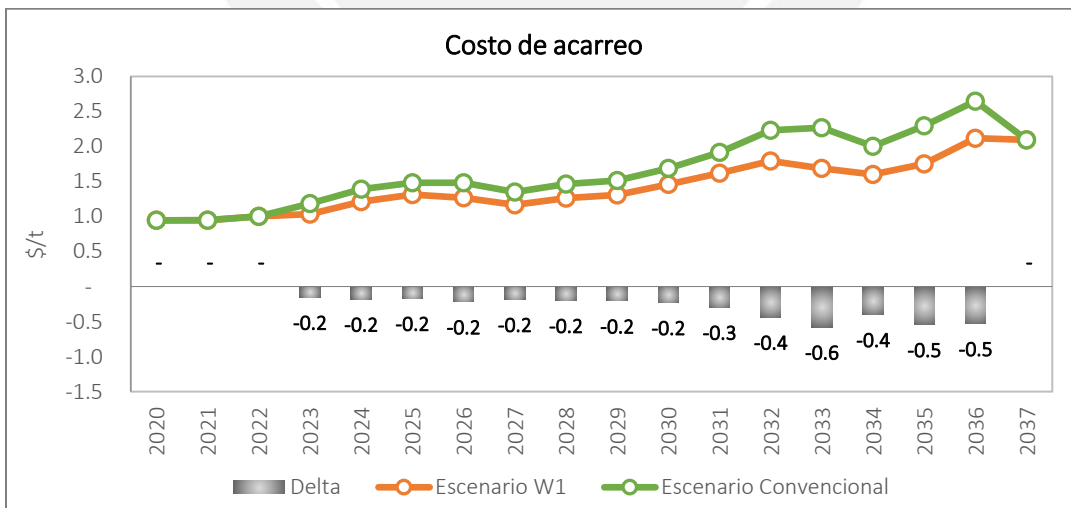
**Figura 44 Distancia Equivalente - Sistema Convencional vs Sistema W1**

Como consecuencia de una distancia equivalente menor que se genera al usar 1 sistema IPCCS, los camiones se vuelven más productivos debido a que son capaces de transportar mayor desmonte en un menor tiempo como beneficio de tener una ruta más corta. (ver Figura 45)



**Figura 45 Productividad Camiones - Sistema Convencional vs Sistema W1**

Finalmente, el beneficio de una distancia equivalente menor y una mayor productividad en los camiones se traduce en una reducción del costo de acarreo debido a que ahora se necesita una menor cantidad de horas operativas para transportar la misma cantidad de desmonte que considera la simulación con el sistema convencional. (ver Figura 46)



**Figura 46 Costo de acarreo - Sistema Convencional vs Sistema W1**

## 4.5 ESCENARIO CON DOS SISTEMAS DE CHANCADO Y TRANSPORTE DE DESMONTE

En este escenario se realiza la implementación de 2 sistemas IPCCS ubicados en las cotas 4,418 y 4,043. El segundo sistema se implementa en el 2026, debido a que la preparación de la zona requiere de permisos y se realiza por etapas. Lo que se busca con esta nueva ubicación es seguir generando rutas cortas para el desmonte que se encuentra en la parte inferior del tajo y de esta manera aumentar la productividad de los camiones.

En la Figura 47 se puede observar que el perfil máximo de camiones, en los años donde el total movido supera los 300 Mt, se reduce a 115 camiones. De esta manera se ahorra un total de 68 unidades en Capex y Opex entre equipos de reemplazo y crecimiento con respecto a la simulación con sistema convencional. Además, se puede observar que a partir del año 2026 se realiza el impacto positivo de la sinergia de los 2 sistemas IPCCS llegando a reducir el número de camiones considerablemente conforme el tajo va profundizando, siguiendo el lineamiento del plan de minado optimizado.

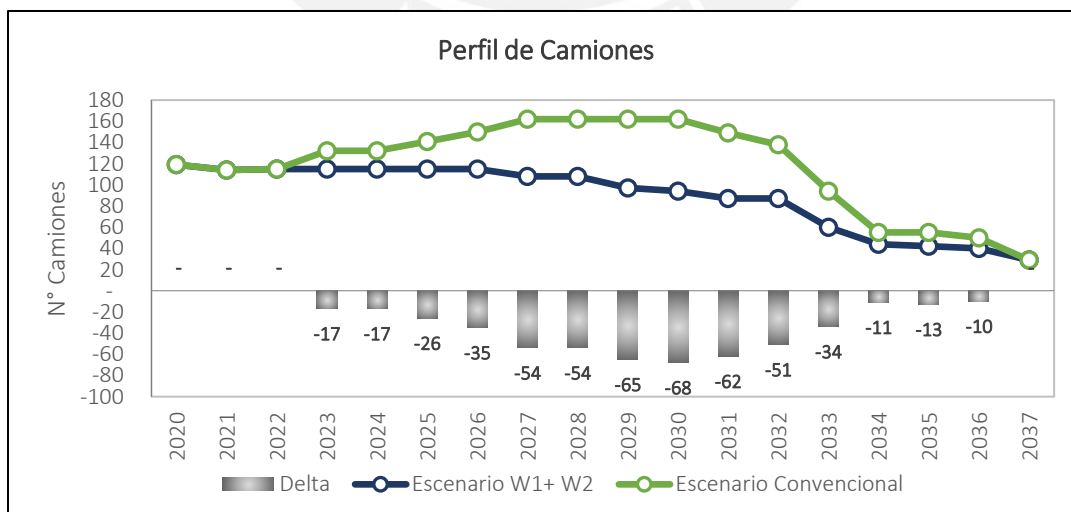
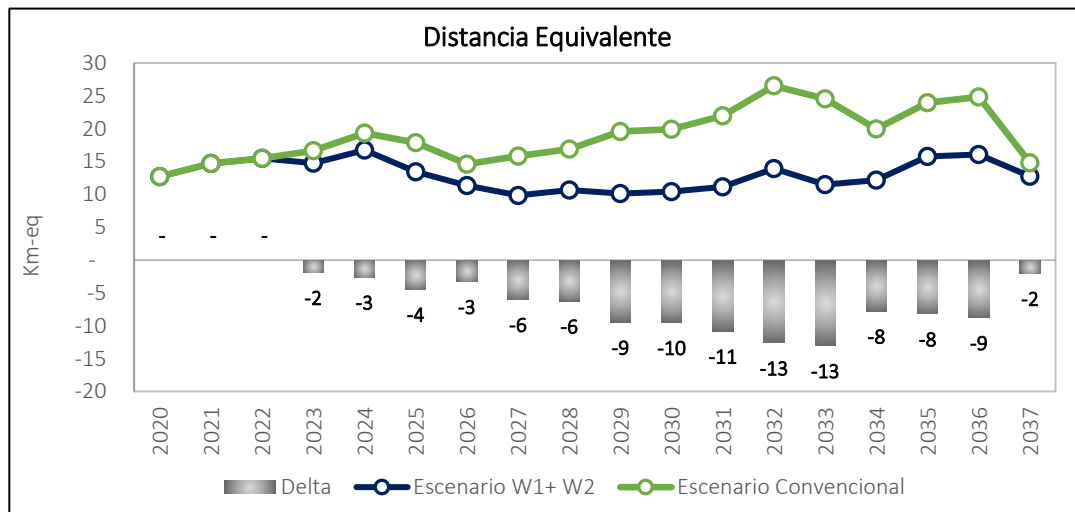


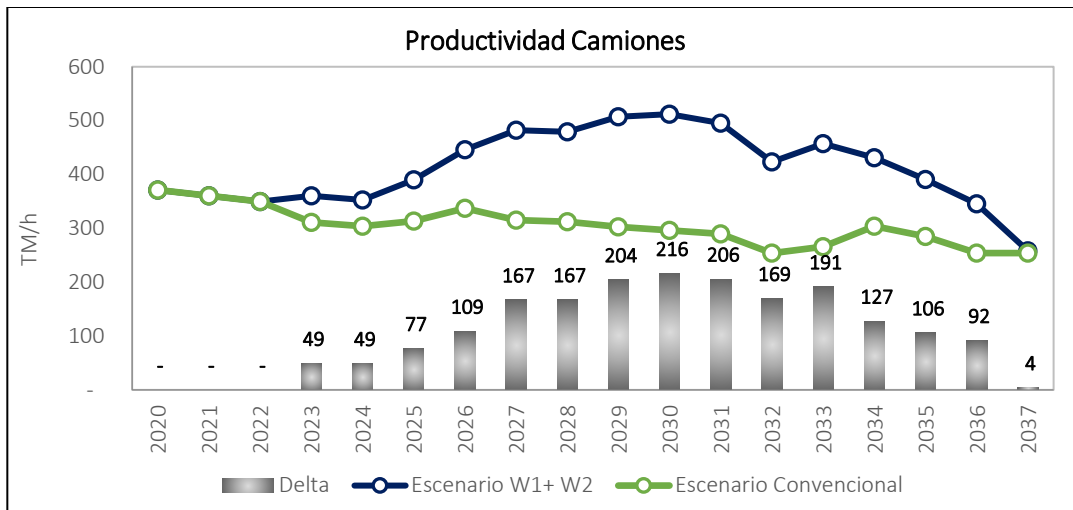
Figura 47 Perfil de Camiones - Sistema Convencional vs Sistema W1+ W2

Al tener un segundo punto de descarga de desmote en la cota 4043 (habilitado el 2026), las distancias para los camiones que transportan desmote desde el fondo del pit se reducen y liberan el congestionamiento que se genera a la salida del pit con destino hacia los botaderos. Tener un segundo sistema IPCCS se traduce en una distancia equivalente menor a partir del 2026, ya que los dos sistemas funcionan juntos y hacen sinergia como se puede apreciar en la Figura 48 donde los años posteriores al 2026 la distancia equivalente se reduce en promedio en 9 km.



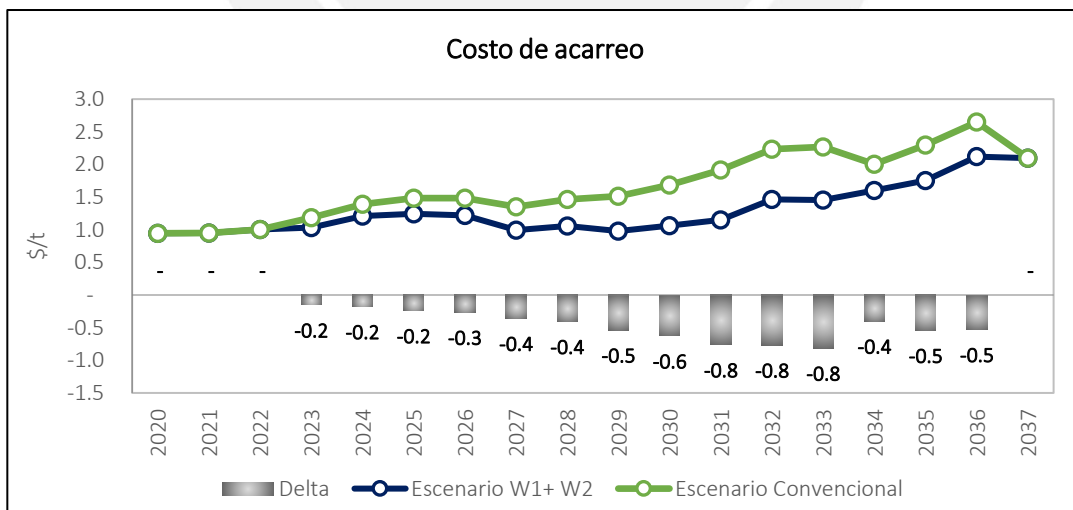
**Figura 48 Distancia Equivalente - Sistema Convencional vs Sistema W1 + W2**

El efecto de una menor distancia equivalente para los camiones es una mayor productividad, llegando a incrementar un 35% a partir del funcionamiento de los dos sistemas IPCCS en conjunto. (ver Figura 49)



**Figura 49 Productividad Camiones - Sistema Convencional vs Sistema W1 + W2**

Finalmente, como consecuencia de una mayor productividad en los camiones se tiene un costo de acarreo menor que también se debe a la menor cantidad en repuestos y menor cantidad de combustible a raíz de la de reducción de camiones. Además, se produce un beneficio ambiental como es la disminución en la emisión de gases contaminantes. (ver Figura 50)



**Figura 50 Costo de acarreo - Sistema Convencional vs Sistema W1 + W2**

## 5 ANÁLISIS ECONÓMICO

---

Los proyectos mineros de operaciones en marcha suponen incrementar el valor actual de las empresas partiendo de una situación actual, para tal efecto es necesario determinar el incremento de valor por efecto de ejecutar el proyecto. La metodología de evaluación consiste en hallar tres flujos de caja: un flujo con proyecto, un flujo sin proyecto y un flujo diferencia. (Gala, 2017)

En este capítulo se describe los resultados económicos de los escenarios desarrollados anteriormente: escenario convencional (Caso Base), escenario con 1 sistema IPCCS (Caso W1) y escenario con 2 sistemas IPCCS (Caso W1+W2). Además, se compara los resultados con el fin de evaluar el caso que genera un mayor incremento de valor para la operación minera.

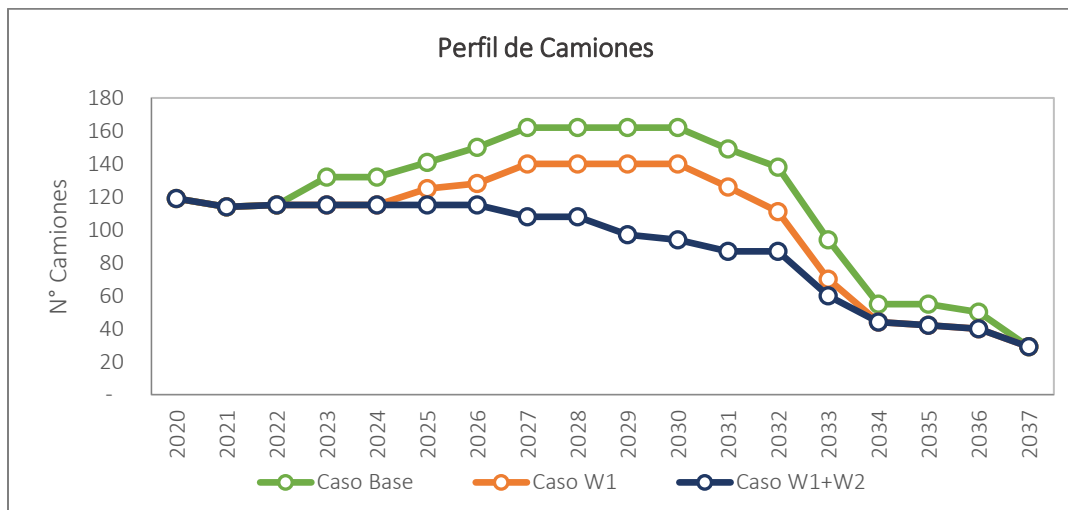
### 5.1 CAPEX

---

El costo de capital hace referencia a los costos de inversión incurridos para llevar a cabo el plan minero. El cálculo de este costo se basa principalmente en la suma de los siguientes montos: Compra de activos (equipos principales y auxiliares), recrecimiento de la presa, proyectos de exploración e innovación, nuevos componentes (botaderos, infraestructura), entre otros.

El Capex del Caso Base que involucra todos los ítems anteriormente mencionados es de US\$ 4,399 M (sin descontar). Como la presente tesis se basa principalmente en el impacto de los equipos de acarreo, es necesario separar la parte del Capex que es netamente de los equipos de acarreo para tener como resultado el verdadero efecto de la implementación de los sistemas IPCCS.

La implementación de los sistemas IPCCS se realiza en el año 2023 para el W1 y en el año 2025 para el W2. En la Figura 51 se observa el impacto en el perfil de camiones debido a la implementación de los sistemas IPCCS.



**Figura 51 Comparación de perfil de camiones**

En la Tabla 6 se observa la diferencia de Capex por la compra de camiones de cada caso. Se resalta que la sinergia de los dos sistemas IPCCS generan un ahorro de 41%, mucho mayor que si los dos sistemas trabajaran por separado. Esto es debido a que los sistemas IPCCS reducen distancia de acarreo significativamente y esto se traduce en menor compra de camiones.

**Tabla 6 Compra de camiones por caso (sin descontar)**

Caso	N° Camiones	Capex (M US\$)	Delta (M US\$)	Delta (%)
Caso Base	152	776	-	-
Caso W1	130	663	-112	-14%
Caso W1+W2	89	454	-322	-41%

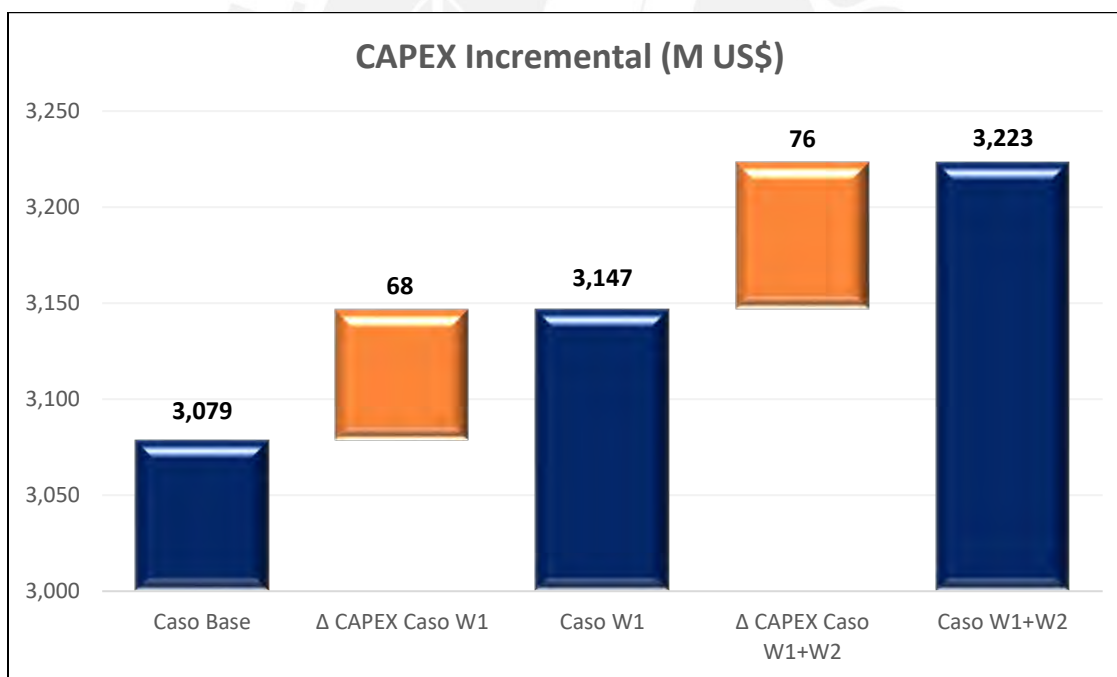
Si bien es cierto, la implementación de los sistemas IPCCS genera un ahorro en camiones, estos también conllevan a un ahorro en inversión del truck shop. Por otro lado, implementar estos sistemas trae consigo una inversión, la cual es mayor al ahorro que se genera por camiones y truck



shop. En la Tabla 7 y Figura 52 se puede observar el detalle del Capex para cada caso y la diferencia de valores respectivamente.

**Tabla 7 Capex detallado por caso (sin descontar)**

Item	Caso Base (M US\$)	Caso W1 (M US\$)	Caso W1+W2 (M US\$)
Proyectos & Botaderos & Truck Shop	2,635	2,465	2,246
Presa de relaves	905	905	905
Planta & Infraestructura	82	82	82
Camiones	776	663	454
WCCS1	-	308	308
WCCS2	-	-	482
<b>Total CAPEX</b>	<b>4,399</b>	<b>4,424</b>	<b>4,478</b>

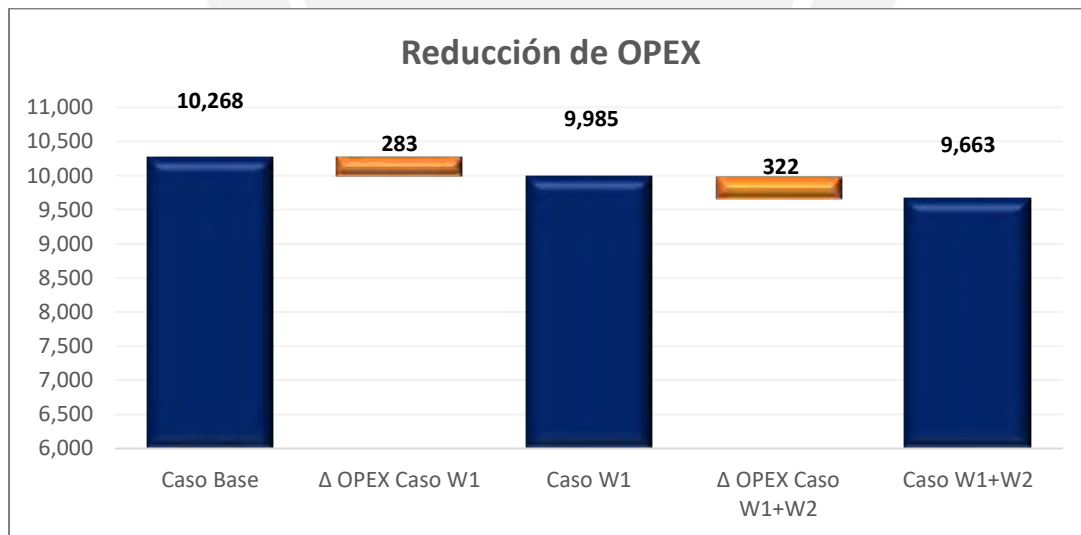


**Figura 52 Capex incremental (descontado)**

## 5.2 OPEX

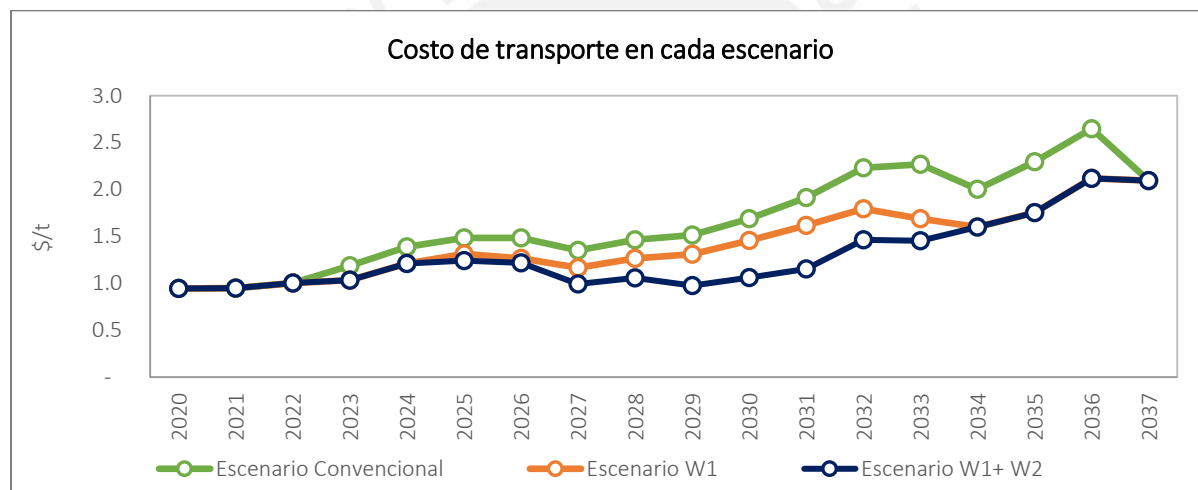
Si bien los Sistemas IPCCS requieren una gran inversión inicial, estos suponen un ahorro en los costos operativos de transporte, pues como se ha descrito anteriormente, estos sistemas están dirigidos a transportar el desmonte de la operación, el cual requiere grandes distancias hacia los botaderos disponibles debido a la ubicación lejana en la que se encuentran.

El impacto en el OPEX total de los casos en evaluación se pueden apreciar en la Figura 53. Como se observa, al implementar un sistema IPCCS (Caso W1) el OPEX disminuye en US\$ 283M, de manera similar, al implementar dos sistemas IPCCS (Caso W1+W2) el OPEX disminuye en US\$ 322M respecto al Caso Base. Para explicar la reducción del OPEX por la incorporación de sistema IPCCS, en el presente capítulo se evalúa a más detalle la variación en los costos de transporte para cada escenario.



**Figura 53 Reducción de OPEX**

En los capítulos: 4.4. ESCENARIO CON UN SISTEMA DE CHANCADO Y TRANSPORTE DE DESMONTE y 4.5. ESCENARIO CON DOS SISTEMAS DE CHANCADO Y TRANSPORTE DE DESMONTE, se ha demostrado el impacto en ahorro en costos de transporte que trae consigo el incorporar sistemas IPCCS y no realizar compra de camiones. En la Figura 54 se aprecia como el ahorro en costos de transporte se pronuncia a partir del año 2023 para los escenarios con sistemas IPCCS (Líneas naranja y azul). Además, para el caso con dos sistemas IPCCS (línea azul) se puede observar como a partir del año 2025 los costos de acarreo disminuyen aún más al incorporar el segundo sistema.



**Figura 54 Costos de transporte en cada escenario**

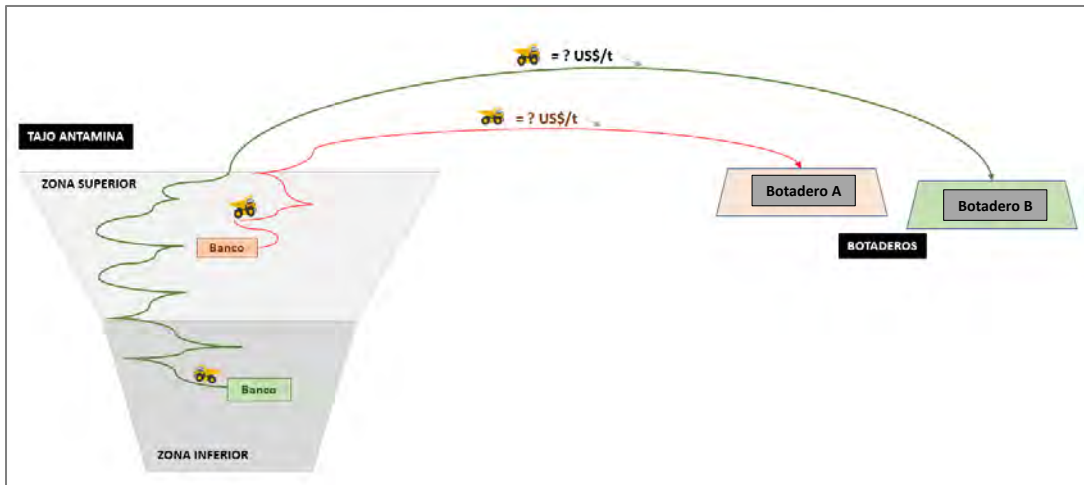
Con intención de explicar a detalle la reducción de costos debido a la implementación de sistemas IPCCS para el transporte de desmonte, un análisis en las rutas de transporte de desmonte es llevado a cabo y se describe en el subcapítulo siguiente.

### *Costos de Transporte Camiones Vs. Fajas en rutas de transporte de desmonte*

Para tener una visión más clara acerca del ahorro de costo de transporte con el uso de Fajas Transportadoras, se evalúa a detalle las rutas de transporte de desmonte que son reemplazadas al incorporar fajas transportadoras. De esta manera, la comparativa a realizar es el costo de transporte desde el banco hacia los botaderos mediante camiones vs. Desde el banco hacia los botaderos mediante fajas.

En primer lugar, se reconoce el origen desde el cual parte el desmonte que se transportará mediante las fajas transportadoras y su posterior destino. Para esto, en el caso con dos sistemas IPCCS se ha visto que el material de desmonte ubicado en la zona inferior tiende a dirigirse al segundo sistema IPCCS, ubicado en el nivel 4,043 (debido a su cercanía) y luego es transportado hacia el botadero B. Por otro lado, el material de la zona superior tiende a dirigirse al primer sistema IPCCS, ubicado en el nivel 4,418 y es transportado hacia el botadero A. Identificando esto, se trabaja dividiendo el Tajo en dos zonas: Zona superior y Zona inferior.

Segundo, en el caso convencional (solo camiones), se examina anualmente el costo de transporte del material de desmonte que se lleva hacia el botadero A y el costo de transporte anualmente del material de desmonte que se lleva hacia el botadero B. Esto con el objetivo de tener una base de costos de transporte en el sistema convencional. En la Figura 55, la línea roja representa la ruta que sigue el material ubicado en la zona inferior. La línea verde representa la ruta que sigue el material de desmonte ubicado en la zona superior.



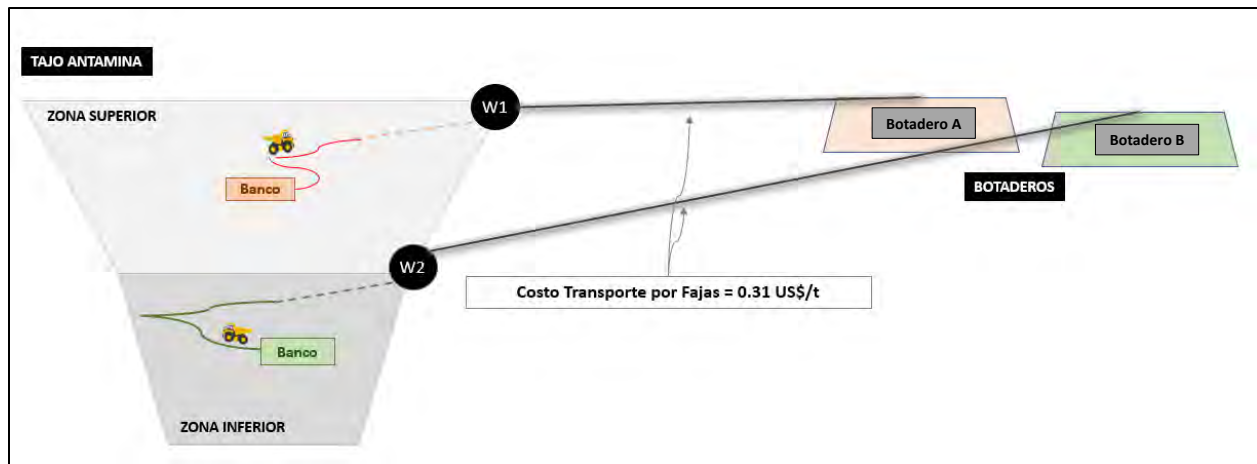
**Figura 55 Rutas de transporte Desmonte – Botadero (Caso Convencional)**

De estos cálculos se obtienen los siguientes resultados:

**Tabla 8 Costos de Transporte Banco - Botadero con sistema convencional**

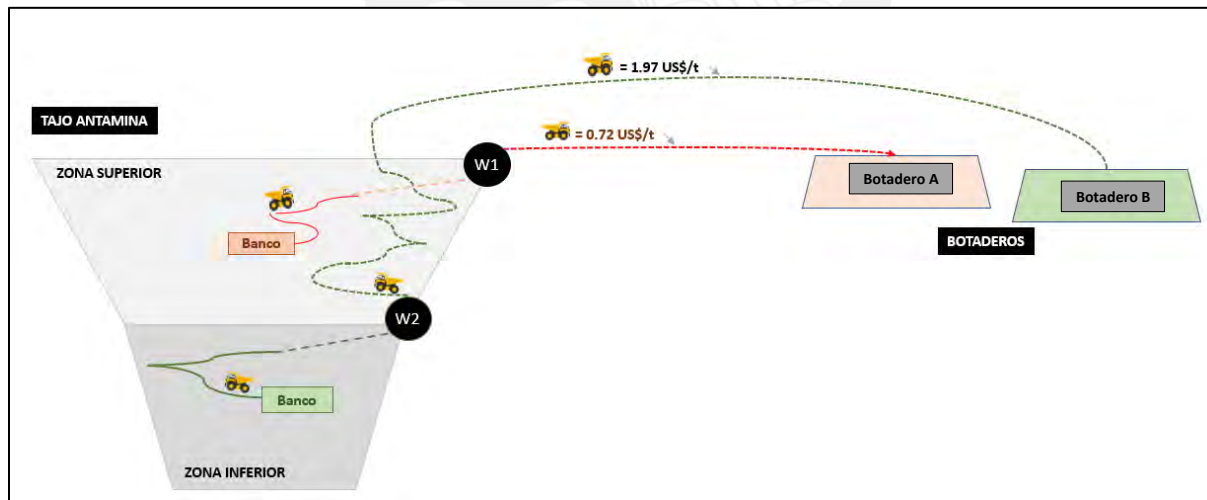
Destino	Zona Inferior (US\$/Ton)	Zona Superior (US\$/Ton)
<b>Banco - Botadero A (Sistema convencional)</b>	-	1,17
Banco – Botadero B (Sistema Convencional)	2,61	-

Luego, se analiza cuál es el costo de transporte para mover una tonelada de desmonte hacia los botaderos a través del sistema IPCCS. Para esto, se toma en consideración que además del sistema de fajas, el material es llevado del banco hacia la chancadora por camiones (Ver Figura 56). Por lo que si el objetivo es comparar el costo de transporte de la ruta con fajas versus la misma ruta con el sistema convencional, debe sustraerse el costo de transporte desde el banco hacia la chancadora con sistema convencional. En la Figura 56 se puede observar el costo de transporte por fajas y la ruta banco a chancadora que no se debe tomar en cuenta en la comparativa.



**Figura 56 Ruta de Transporte Banco – Depósito de Desmonte (Caso con Sistemas IPCCS)**

Para calcular el costo de transporte de la ruta chancadora a depósito de desmonte mediante camiones, se divide la ruta que realiza el material mediante sistema convencional y se calcula el costo de transporte desde donde está ubicado la chancadora incorporada (Ver Figura 57).



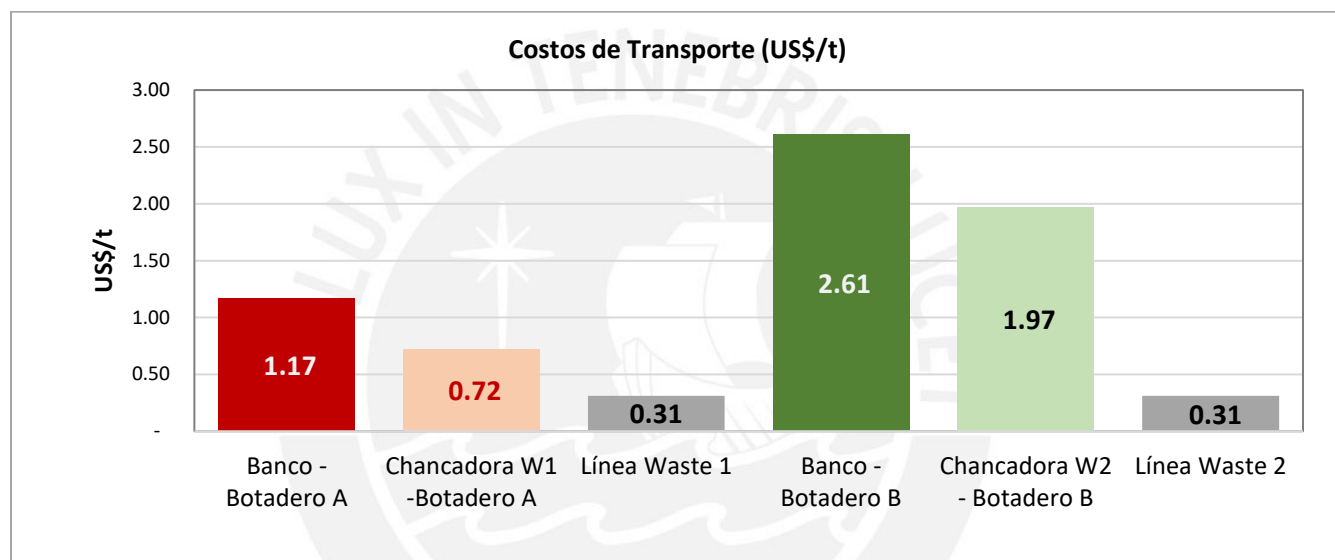
**Figura 57 Ruta de Transporte Chancadora - Depósito de Desmonte (Sistema Convencional)**

El resultado del costo de transporte con sistema convencional en solo la ruta de fajas transportadoras se muestra en la Tabla 9.

**Tabla 9 Costo de Transporte Chancadora - Botadero (Sistema convencional)**

Destino	Zona Inferior (US\$/Ton)	Zona Superior (US\$/Ton)
W1- Botadero A (Camiones)	-	0.72
W2- Botadero B (Camiones)	1.97	-

Finalmente, en la Figura 58, se observa claramente cómo impacta en los costos de transporte la incorporación de sistemas IPCCS para las rutas de transporte de desmonte.



**Figura 58 Comparativa de Costos de Transporte Sistema Convencional Vs. Fajas**

### 5.3 RESULTADOS FINANCIEROS

En este capítulo se evalúa la rentabilidad económica de los sistemas IPCCS haciendo uso de los flujos de caja generados anualmente durante toda la vida de la mina (LOM). Al tratarse de una operación en curso, los flujos futuros tienden a ser positivos debido a que se tienen ingresos constantes por la venta de concentrados, lo cual no permite tener un valor de TIR representativo para diferenciar los proyectos, sin embargo, se usa el VAN, que es el indicador financiero por excelencia, para poder evaluar económicamente los sistemas IPCCS.

Para el cálculo del VAN es necesario tener en cuenta los principales valores que lo componen. En este caso, se utiliza los siguientes componentes para calcular el flujo neto descontado: Ingresos, Cargos de Realización, Opex, Capex, Impuestos, Costos de Cierre y Capital de Trabajo.

Los Ingresos y Cargos de Realización se mantienen constantes, debido a que se utiliza un mismo plan para todos los casos, lo cual implica la misma venta de concentrados durante todos los años.

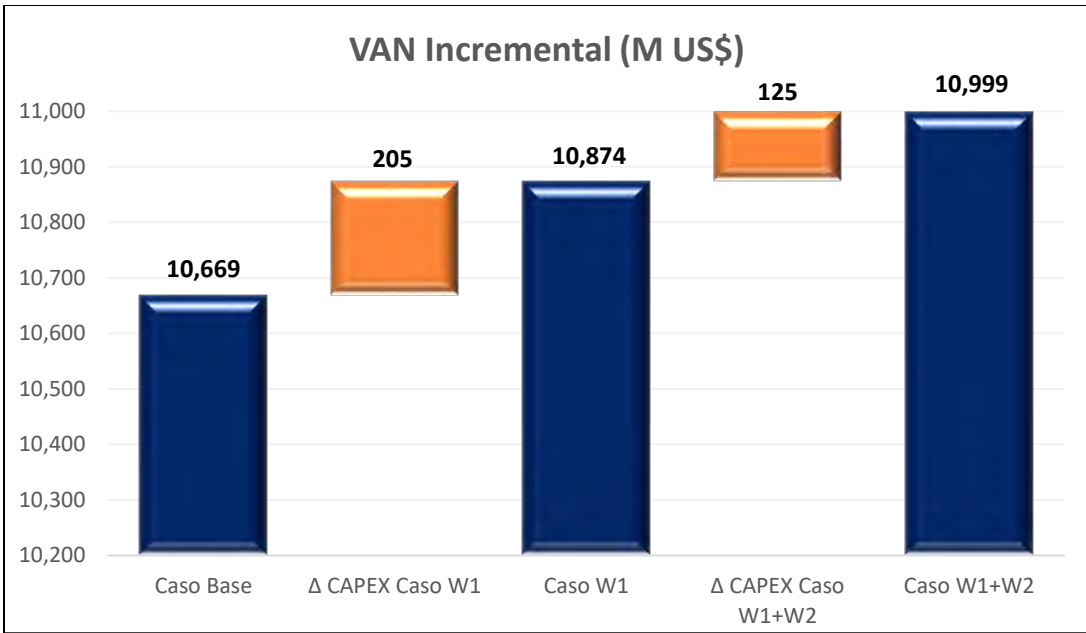
El Opex y Capex dependen directamente de la implementación de los sistemas IPCSS, ya que, al utilizar estos sistemas, el Opex se reduce, pero el Capex aumenta. Por lo tanto, la principal diferencia en el VAN se debe a estos dos ítems. (ver Tabla 10)

**Tabla 10 Detalle del VAN por componentes**

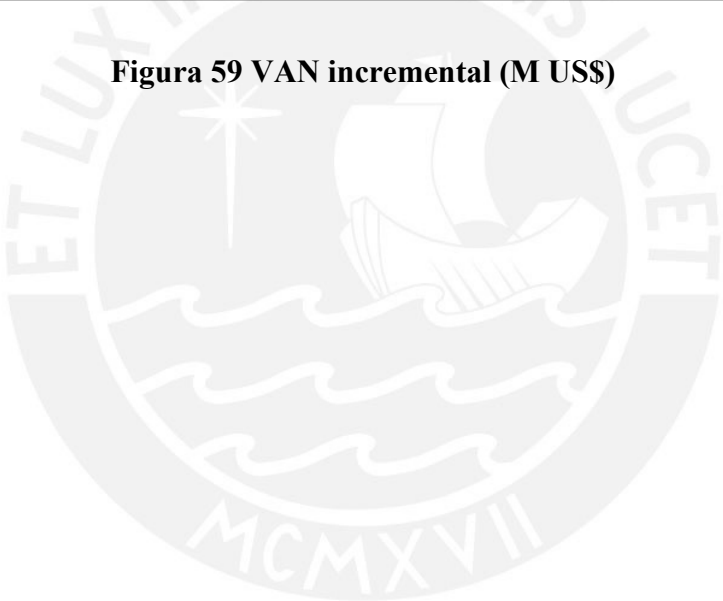
Item	Caso Base	Caso W1	Caso W1 + W2
Ingresos	36,490	36,490	36,490
Cargos de Realización	(4,981)	(4,981)	(4,981)
Opex	(10,221)	(9,862)	(9,542)
Capex	(3,079)	(3,147)	(3,223)
Impuestos	(7,715)	(7,802)	(7,917)
Costo de Cierre	(27)	(27)	(27)
Capital de Trabajo	203	203	201
<b>Total VAN</b>	<b>10,669</b>	<b>10,874</b>	<b>10,999</b>

En la Figura 59 se muestra el VAN incremental que se obtiene al implementar los sistemas IPCCS. Para el Caso W1 se tiene una ganancia de 205 M USD, mientras que para el Caso W1 + W2 se generan 330 M USD adicionales al Caso Base. Con el resultado del VAN se demuestra y confirma económicamente que hacer uso de los sistemas IPCCS (aplicados al desmonte) en esta operación minera generan un incremento de valor, lo cual es el objetivo de la presente tesis.





**Figura 59 VAN incremental (M US\$)**



## 6 CONCLUSIONES

---

- De acuerdo con los resultados económicos, se concluye que la implementación de 2 sistemas IPCCS es lo óptimo para la operación minera evaluada en la presente tesis con un margen de ganancia de 330 MUS\$.
- Los sistemas IPCCS contribuyen a tener una operación más amigable con el medio ambiente, debido a que al tener una menor cantidad de camiones en la operación minera, se reduce la huella de carbono (menos emisiones de CO) al tener un menor consumo de combustible.
- Los sistemas IPCCS ayudan a reducir la congestión en las rampas y la interacción de fases, lo cual da como resultado una mayor productividad en el proceso de carguío.
- Debido a la reducción en los costos operativos de acarreo, los sistemas IPCCS permiten incrementar las reservas minerales de una mina en operación.
- Los sistemas IPCCS son una alternativa más rentable en el largo plazo para minas con una vida útil mayor a 15 años aproximadamente, donde el acarreo hasta los frentes minados más profundos o botaderos lejanos al tajo se convierten en un problema técnico y económico para la operación minera.
- Continuar estudios para corroborar valores mostrados y evaluar el riesgo que conlleva implementar los sistemas IPCCS.

## Bibliografía

Canales Salinas, R. J. (2015). Criterios Para La Toma De Decisión De Inversiones. *REICE*.

*Revista Electrónica de Investigación en Ciencias Económicas*, 101-117.

Compañía Minera Antamina. (s.f.). *antamina.com*. Obtenido de proceso-productivo:

<https://www.antamina.com/proceso-productivo/>

Corporación Nacional del Cobre de Chile. (s.f.). *codelco.com*. Obtenido de

<https://www.codelco.com/division-chuquicamata/>

Delgado Vega, J. (2007). Apuntes del curso de planificación de minas. Antofagasta, Antofagasta, Chile.

Gala, F. (2017). Evaluación de Proyectos. *Apuntes de Clase del curso de Valorización Minera*.

Lima, Perú: FCI, PUCP.

Heizer, J., & Render, B. (2009). *Administración de Operaciones*. Ciudad de México: PEARSON EDUCACIÓN.

Loli Morales, W. C. (2016). Metodología De Planificación A Cielo Abierto Considerando

Incorporación De In Pit Crusher And Conveyors. Santiago de Chile, Chile: Universidad De Chile.

Lozada, L., & Espinoza, J. (2010). *Technical Report Mineral Reserves And Resources*. Lima:

Compañía Minera Antamina S.A.

- Mete, M. R. (2014). Valor Actual Neto Y Tasa De Retorno: Su Utilidad Como Herramientas Para El Análisis Y Evaluación De Proyectos De Inversión. *Instituto de Investigacion en Ciencias Económicas y Financieras*, 67-85.
- Rios, Á. (2018). Modelamiento Geológico Implícito de Antamina (diapositiva). Lima, Lima, Perú.
- Tavakoli Mohammadi, M. R., Seyed, H., & Moosakazemi, F. (2011). *Review of the in-pit crushing and conveying (IPCC) system and its case study in copper industry*.
- Thys B., J. (Mayo de 1968). Optimum Open Pit Mine Production Scheduling. California, Estados Unidos: University Of California, Berkeley.
- Tonge, J. (2017). *The Implications of Improved Conveyor Technology on In-Pit Crusher Conveyor Systems*. Queensland: The University Of Queensland.
- Turnbull, D., & Cooper, A. (2009). In-Pit Crushing and Conveying (IPCC) – A Tried and Tested Alternative to Trucks. *The AusIMM New Leaders' Conference*, (págs. 59-66). Brisbane.
- Vásquez, A., Galdames, B., & Le-Feaux, R. (2009). *Apunte Preliminar Diseño Y Operaciones De Minas A Cielo Abierto*. Chile.