

Universidad Nacional de Ingeniería
Facultad de Ingeniería Geológica Minera y Metalúrgica



TESIS

**Análisis estratégico a la implementación de un chancador inpit
en una mina superficial para la reducción del costo de minado**

Para obtener el título profesional de Ingeniero de Minas

Elaborado por

Cesar Beremiz Hinostroza Aylas

 0009-0002-4982-5890

Asesor

MBA. Victor Manuel Hernández Diaz

 0000-0002-6505-0733

LIMA – PERÚ

2024

Citar/How to cite	Hinostroza Aylas [1]
Referencia/Reference	[1] C. Hinostroza Aylas, " <i>Análisis estratégico a la implementación de un chancador inpit en una mina superficial para la reducción del costo de minado</i> " [Tesis de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2024.
Estilo/Style: IEEE 2020)	

Citar/How to cite	(Hinostroza, 2024)
Referencia/Reference	Hinostroza, C. (2024). <i>Análisis estratégico a la implementación de un chancador inpit en una mina superficial para la reducción del costo de minado</i> . [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

Con mucho amor y cariño para mis padres Miriam y César, mis abuelos y mi hermano menor Renzo, quienes siempre han estado a mi lado siendo mi soporte y guía de vida.

Agradecimientos

A mi alma máter la Universidad Nacional de Ingeniería y los docentes, por haberme brindado la formación como Ingeniero de Minas.

A la empresa IMSS Consultores, por haberme permitido realizar estudios para diversas minas del mundo y fortalecer mis habilidades de planificación minera.

A mi asesor Víctor Hernández y especialista Eder Salazar por su tiempo y valioso aporte a la presente tesis.

Resumen

Con la profundización de las minas a tajo abierto, el costo de minado se incrementa debido a que los camiones deben recorrer mayores distancias para transportar los materiales hacia los destinos. También se incrementa el consumo de combustible y la emisión de CO₂ por la mayor cantidad de horas de trabajo de los camiones.

La presente tesis desarrolla un análisis estratégico sobre la implementación de la tecnología Inpit Crusher and Conveying (IPCC) en una mina a tajo abierto. El IPCC es atractivo debido a que busca reemplazar o reducir el sistema de transporte con camiones por un sistema mecanizado, se compone de un chancador dentro del tajo y un sistema de fajas transportadoras para transportar el material desde el chancador hacia los destinos.

Con la tecnología IPCC se esperó reducir el costo de minado al tener menores distancias de transporte y reducir la emisión de CO₂ por el uso de energía eléctrica en lugar de diésel.

El método de investigación utilizado fue cuantitativo, se planteó una estrategia de implementación del IPCC que consistió en definir cuatro parámetros: periodo de implementación, ubicación del chancador inpit, materiales que recibirá y capacidad del chancador. Se realizó la simulación determinística de transporte de materiales considerando el IPCC en el plan de minado.

Finalmente se realizó una evaluación económica obteniendo que la tecnología IPCC logró reducir el costo de minado y el consumo de combustible. Con estos resultados se validó la hipótesis de la investigación.

Palabras clave — costo de minado, consumo de combustible, tecnología IPCC, simulación de transporte.

Abstract

With the deepening of open-pit mines, the mining cost increases because trucks must travel longer distances to transport materials to their destination. Fuel consumption and CO₂ emissions also increase due to longer truck hours.

This thesis develops a strategic analysis on the implementation of Inpit Crusher and Conveying (IPCC) technology in an open pit mine. IPCC is attractive because it aims to replace or reduce the truck haulage system with a mechanized system, consisting of a crusher inside the mine and a conveyor system to transport the material from the crusher to the destinations.

The IPCC technology was expected to reduce the mining cost by having shorter transport distances and reducing CO₂ emissions by using electric energy instead of diesel. The research method used was quantitative; an IPCC implementation strategy was proposed which consisted of defining four parameters: implementation period, location of the inpit crusher, materials to be received and crusher capacity. Then, a deterministic simulation of material transport was carried out considering the IPCC in the mining plan.

Finally, an economic evaluation was carried out, obtaining that the IPCC technology was able to reduce the mining cost and fuel consumption. With these results, the research hypothesis was validated.

Keywords — mining cost, fuel consumption, IPCC technology, transportation simulation.

Tabla de contenido

	Pág.
Resumen	v
Abstract	vi
Introducción	xiii
Capítulo I. Parte introductoria del trabajo	1
1.1 Generalidades	1
1.2 Descripción del problema de investigación.....	1
1.2.1 Problema general.....	1
1.2.2 Problema específico.....	2
1.3 Objetivos del estudio	2
1.3.1 Objetivo general.....	2
1.3.2 Objetivo específico.....	3
1.4 Hipótesis	3
1.4.1 Hipótesis general	3
1.4.2 Hipótesis específica	3
1.5 Antecedentes investigativos	3
1.5.1 Antecedentes Internacionales:	3
1.5.2 Antecedentes Nacionales:.....	4
1.5.3 Antecedentes Locales:	4
Capítulo II. Marcos teórico y conceptual	5
2.1 Marco teórico	5
2.1.1 Proceso de planificación minera.....	5
2.1.2 Operaciones unitarias en una mina a tajo abierto.....	14
2.1.3 Tecnología Inpit Crusher and Conveying.....	15
2.2 Marco conceptual	18
Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación	20
3.1 Metodología	20

3.1.1	Etapa I: Análisis del caso base.....	21
3.1.2	Etapa II: Estrategia de solución del caso IPCC	22
3.1.3	Etapa III: Definición de opciones caso IPCC	23
3.1.4	Etapa IV: Rediseño de mina caso IPCC	23
3.1.5	Etapa V: Plan de minado y simulación de transporte caso IPCC.....	23
3.1.6	Etapa VI: Evaluación económica.....	24
3.2	Aplicación de la metodología.....	24
3.2.1	Etapa I: Análisis del caso base.....	25
3.2.2	Etapa II: Estrategia de solución caso IPCC	31
3.2.3	Etapa III: Definición de opciones caso IPCC	39
3.2.4	Etapa IV: Rediseño de mina caso IPCC	39
3.2.5	Etapa V: Plan de minado y simulación de transporte caso IPCC.....	41
3.2.6	Etapa VI: Evaluación económica	50
Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados		56
4.1	Costo de minado y consumo de combustible	56
Conclusiones		61
Recomendaciones		62
Referencias bibliográficas.....		63
Anexos		64

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1: Matriz de consistencia.....	3
Tabla 2: Ley de corte marginal.....	28
Tabla 3: Centro de gravedad IPCC.....	37
Tabla 4: Árbol de opciones IPCC.....	39
Tabla 5: Cubicación de fase rediseñada	41
Tabla 6: Valores de Capex y Opex IPCC.....	51
Tabla 7: Costos unitarios de minado.....	52
Tabla 8: Costos unitarios de planta.....	52
Tabla 9: Valor presente neto casos IPCC.....	55
Tabla 10: Reducción de horas y combustible casos IPCC.....	56
Tabla 11: Incremento del valor presente neto casos IPCC.....	57
Tabla 12: Incremento del valor presente neto caso IPCC 50Mt_1640.....	58

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1: Costo de minado caso base.....	2
Figura 2: Proceso tradicional de planificación minera	6
Figura 3: Ejemplos de envolvente económica.....	8
Figura 4: Algoritmo de Lerchs and Grossman.....	9
Figura 5: Ejemplos de pit anidados y análisis pit by pit	9
Figura 6: Metodología DBS.....	10
Figura 7: Proceso de diseño de fases a línea media (Hustrulid)	11
Figura 8: Ejemplo de diseño de fase a línea Media.....	11
Figura 9: Ejemplo de minado de un periodo.....	12
Figura 10: Ejemplo de simulación de transporte	13
Figura 11: Carguío y transporte tradicional.	15
Figura 12: Tecnología IPCC fijo	16
Figura 13: Tecnología IPCC semi fijo.....	16
Figura 14: Tecnología IPCC semi Móvil.....	17
Figura 15: Tecnología IPCC móvil	17
Figura 16: Mina con tecnología IPCC	18
Figura 17: Ejemplo de chancador Inpit.....	18
Figura 18: Diagrama de Flujo de la Metodología de Trabajo.....	21
Figura 19: Ejemplo de Perfil de Camiones	22
Figura 20: Plan de Minado Caso Base.....	26
Figura 21: Fases del caso base	26
Figura 22: Secuencia de minado periodo 2024	29
Figura 23: Mineral expuesto caso base	30
Figura 24: Costo de minado caso base.....	31
Figura 25: Perfil de camiones caso base	31
Figura 26: Fecha de inicio de la tecnología IPCC	32

Figura 27: Distancias por destino caso base.....	33
Figura 28: Desmonte por periodo caso base	34
Figura 29: Centro de gravedad desmonte periodos 1 al 10.....	35
Figura 30: Centro de gravedad desmonte periodos 11 al 20.....	35
Figura 31: Centro de gravedad desmonte periodos 21 al 30.....	36
Figura 32: Centro de gravedad desmonte periodos 31 al 40.....	36
Figura 33: Centro de gravedad desmonte pit final.....	37
Figura 34: Desplazamiento del centro de gravedad	38
Figura 35: Plan caso base periodo 2029.....	38
Figura 36: Diseño IPCC línea media.....	40
Figura 37: Rediseño de fase vista en Nv. 1640.....	41
Figura 38: Plan caso IPCC 40 Mt.....	42
Figura 39: Alimentación IPCC casos 40 Mt.....	43
Figura 40: Alimentación IPCC casos 50 Mt.....	43
Figura 41: Alimentación IPCC casos 60 Mt.....	44
Figura 42: Alimentación IPCC por capacidad.....	44
Figura 43: Horas camión IPCC capacidad 40 Mt	45
Figura 44: Horas camión IPCC Capacidad 50 Mt.....	45
Figura 45: Horas camión IPCC capacidad 60 Mt	46
Figura 46: Horas camión IPCC nivel 1640	46
Figura 47: Consumo de combustible IPCC capacidad 40 Mt	47
Figura 48: Consumo de combustible IPCC capacidad 50 Mt	47
Figura 49: Consumo de combustible IPCC capacidad 60 Mt	48
Figura 50: Consumo de combustible IPCC nivel 1640	48
Figura 51: Perfil de camiones IPCC capacidad 40 Mt.....	49
Figura 52: Perfil de camiones IPCC capacidad 50 Mt	49
Figura 53: Perfil de camiones IPCC capacidad 60 Mt	50
Figura 54: Perfil de camiones IPCC nivel 1640.....	50

Figura 55: Costo mina caso IPCC 40 Mt..... 53

Figura 56: Costo mina IPCC 50 Mt 53

Figura 57: Costo mina IPCC 60 Mt 54

Figura 58: Costo mina IPCC nivel 1640 54

Figura 59: Valor presente neto casos IPCC 57

Figura 60: Utilización y NPV casos IPCC..... 58

Figura 61: Reducción del costo de minado caso IPCC 50Mt_1640 59

Figura 62: Reducción del consumo de combustible caso IPCC 50Mt_1640..... 60

Introducción

En la presente tesis se realizó un análisis estratégico sobre la implementación de la tecnología Inpit Crusher and Conveying (IPCC) en una operación minera a tajo abierto. El objetivo de la tecnología IPCC es reemplazar o reducir el sistema de transporte con camiones por un sistema mecanizado, el cual se compone de un chancador inpit y un sistema de fajas transportadoras, este sistema será el encargado de transportar el material a los destinos utilizando energía eléctrica en lugar de diésel. Esta tecnología es atractiva porque su propósito es reducir el costo de minado y reducir la emisión de CO₂ al ambiente.

La estrategia para implementar la tecnología IPCC consistió en definir cuatro parámetros importantes para optimizar la inversión, los cuales son: el periodo de implementación, la ubicación del chancador inpit, los materiales que recibirá y la capacidad del chancador. La presente investigación plantea y desarrolla una metodología para definir cada uno de estos parámetros en base a criterios y análisis robustos, los principales análisis fueron: evaluación del centro de gravedad de los materiales en el tajo, análisis del incremento del Opex, incremento del perfil de camiones, incremento de las distancias hacia cada destino, entre otros más.

Es importante analizar sistemas de transporte diferentes al sistema tradicional con camiones debido a 2 ejes importantes: el primero es económico, los insumos están en alza y se debe buscar tecnologías que ayuden a reducir el Opex; el segundo es el factor ambiental, hay una directriz general en la industria minera de reducir la contaminación ambiental reemplazando la energía diésel por energías más limpias (electricidad, hidrógeno verde, etc.)

Capítulo I. Parte introductoria del trabajo

1.1 Generalidades

Los equipos de planeamiento mina a largo plazo y estratégico de las empresas mineras y consultoras evalúan constantemente escenarios para optimizar el valor económico de la mina. Principalmente se evalúan procesos tradicionales como optimización de pit, análisis de capacidad de mina y planta, secuenciamiento estratégico, rediseño de fases de minado, optimización de ley de corte, etc. Sin embargo, hoy en día también están evaluando nuevas tecnologías para reducir los costos operativos y mejorar los estándares ambientales, tales como: Inpit Crusher and Conveying, camiones autónomos (AHS), Trolley Assist (TA), camiones a batería, camiones a hidrógeno y otras más. Estas tecnologías ofrecen mejoras a la operación minera para reducir el OPEX de la mina, además, utilizan energías más limpias que ayudan a reducir la contaminación ambiental, por ejemplo, la energía eléctrica y el hidrógeno verde.

1.2 Descripción del problema de investigación

1.2.1 *Problema general*

Con la profundización de una operación minera a tajo abierto, el costo de minado se incrementa debido a que los camiones mineros deben recorrer mayores distancias para transportar los materiales hacia sus destinos. El costo unitario que se incrementa es el costo de transporte y afecta directamente al costo de minado.

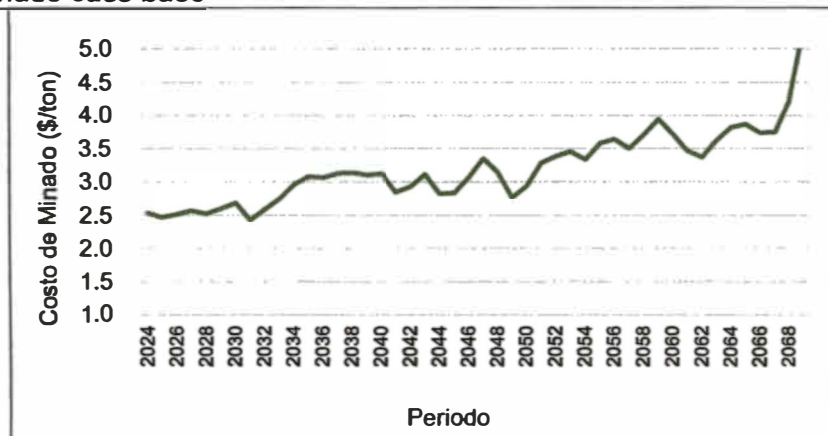
El costo de minado se define como el costo de extraer y transportar una tonelada de material hacia su destino. Es un parámetro muy importante en una operación minera, se compone de los costos unitarios perforación, voladura, carguío, transporte y servicios auxiliares. En las minas a tajo abierto, el costo de transporte representa en promedio un 50-60% del costo de minado.

La mina en estudio es una operación minera a tajo abierto que utiliza camiones mineros (sistema tradicional) para el transporte de los materiales, los primeros años tiene un costo de minado de 2.5 \$/ton, sin embargo, este costo se incrementa a lo largo del plan

de minado y llega a valores cercanos a 4 \$/ton en los últimos años. La Figura 1 muestra el incremento del costo de minado de la mina en estudio. El incremento del costo de minado podría reducir el beneficio económico del flujo de caja en la evaluación económica de la operación minera.

Figura 1

Costo de minado caso base



Fuente: Mina en estudio

¿Cuáles son las causas y consecuencias del incremento del costo de minado debido a mayores distancias de transporte para los camiones?

1.2.2 Problema específico

Los camiones deben recorrer mayores distancias de transporte requiriendo mayores horas de trabajo, lo cual genera un incremento en el consumo de combustible y emisión de CO₂ al ambiente, este indicador es importante por la contaminación ambiental. La industria minera tiene como objetivo macro la descarbonización mediante la reducción de la emisión de CO₂ y otros contaminantes.

¿En qué medida afecta el incremento del consumo de combustible a una operación minera y al ambiente?

1.3 Objetivos del estudio

1.3.1 Objetivo general

Reducción del costo de minado de la mina en estudio mediante la implementación estratégica de la tecnología Inpit Crusher and Conveying.

1.3.2 *Objetivo específico*

Reducción del consumo de combustible.

1.4 **Hipótesis**

1.4.1 *Hipótesis general*

La implementación de la tecnología Inpit Crusher and Conveying logrará reducir el costo de minado.

1.4.2 *Hipótesis específica*

La tecnología IPCC reducirá el consumo de combustible.

Tabla 1

Matriz de consistencia

Problema	Objetivos	Hipótesis	Variable
Principal: Incremento del costo de minado debido a que los camiones deben recorrer mayores distancias de transporte por la profundización de la mina a tajo abierto.	Objetivo General: Reducción del costo de minado de la mina en estudio mediante la implementación estratégica de la tecnología Inpit Crusher and Conveying.	Hipótesis General: La implementación de la tecnología Inpit Crusher and Conveying logrará reducir el costo de minado.	Independiente: Tecnología Inpit Crusher and conveying.
Secundario: Incremento del consumo de combustible y emisión de CO2	Objetivo Específico: Reducción del consumo de combustible de la mina en estudio.	Hipótesis Específica: La tecnología IPCC reducirá el consumo de combustible.	Dependientes: Costo de minado Consumo de combustible.

Fuente: Elaboración propia

1.5 **Antecedentes investigativos**

1.5.1 *Antecedentes Internacionales:*

W. Loli. (2016) Metodología de planificación a cielo abierto considerando incorporación de Sistema Inpit Crusher and Conveying. Universidad de Chile

M. Soto. (2019) Evaluación de sistemas de transporte alternativos para minería a cielo abierto. Universidad de Chile

En el extranjero, algunas operaciones mineras que utilizan la tecnología IPCC son:

Duval Corporation – Sierrita Copper Mine - USA

Bingham Canyon Copper Mine - USA

Island Copper Mines – Canadá

Chuquicamata y Escondida – Chile

1.5.2 Antecedentes Nacionales:

J. Cuaresma. (2022) Estudio conceptual para evaluar la implementación de la Tecnología IPCC. IMSS Consultores

En Perú algunas minas utilizan la tecnología IPCC en su operación como por ejemplo Antamina y Cuajone, además, otras están realizando estudios sobre su implementación.

1.5.3 Antecedentes Locales:

W. Toledo. (2013) Transporte en minas a cielo abierto: camiones versus sistema de chancado semi-movil dentro de tajo transportado por fajas. Universidad Nacional de Ingeniería.

Capítulo II. Marcos teórico y conceptual

2.1 Marco teórico

El presente trabajo de investigación se enmarca en el análisis estratégico de la implementación de la tecnología Inpit Crusher and Conveying (IPCC) a una mina tajo abierto. La tecnología IPCC se compone de un chancador dentro del tajo y un sistema de fajas transportadoras, los camiones transportan el material hasta el chancador inpit y las fajas transportan el material hacia su destino final, de esa forma se reduce las distancias de viaje y los ciclos de trabajo de los camiones, este efecto es clave debido a que los camiones ya no recorren todo el viaje hasta llegar a su destino.

El IPCC está siendo evaluado por diferentes minas con la finalidad de reducir el costo de minado. Las minas a tajo abierto muy profundas y de vida útil extensa sufren el aumento del costo de transporte, este problema también es una oportunidad para evaluar sistemas de transporte alternativos al sistema tradicional con camiones.

El marco teórico abarca la descripción del proceso de planificación minera a largo plazo, en la cual se detalla cada una de las etapas y sus alcances a fin de comprender la realización de un plan de minado completo. También, se describe las operaciones mineras unitarias a tajo abierto considerando el sistema de transporte tradicional y en la última parte de esta sección se detalla la tecnología IPCC, su definición, los beneficios, los tipos de IPCC y la estrategia de implementación.

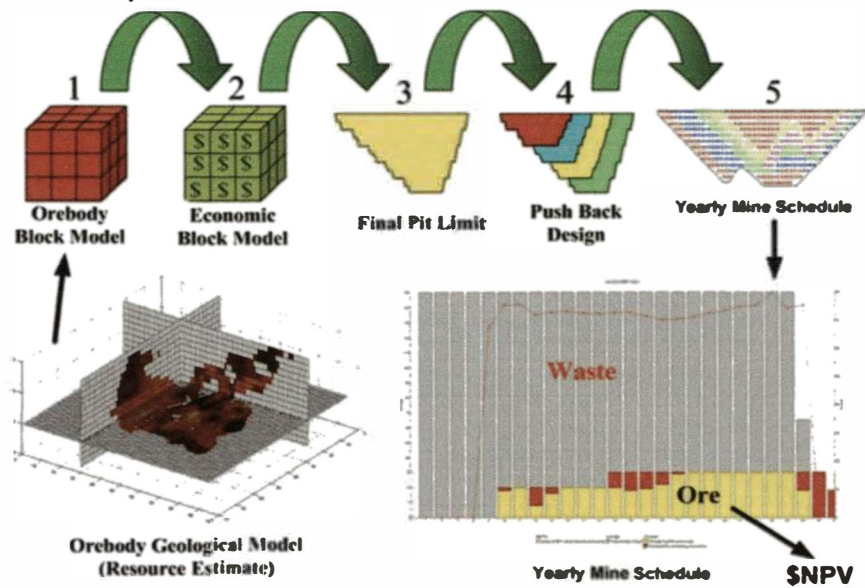
2.1.1 Proceso de planificación minera

El proceso de planificación minera a largo plazo tiene varias etapas, las cuales son: valorización del modelo de bloques, optimización del pit final, diseño de fases de minado, plan de producción, estimación de equipos y evaluación económica-financiera.

Según Askari (2020), las etapas del planeamiento empiezan por la creación del modelo de bloques, continúa con la generación del modelo económico, optimización de pit final, diseño de pushbacks y finaliza con el plan de mina anual.

Figura 2

Proceso tradicional de planificación minera



Fuente: Curso de Planificación Minera Hooman Askari

2.1.1.1 Valorización del modelo de bloques. El primer paso del proceso de planificación minera consiste en cuantificar los valores de los bloques en términos de dólares por tonelada, integrando la información geológica, metalúrgica y económica. La valorización de bloques es una etapa muy importante y debe realizarse correctamente porque es el input principal para la delimitación del pit final y discretización del mineral y desmonte.

Los parámetros económicos más importantes para la valorización de bloques son los siguientes: precio de los metales pagables, costo de venta, costo de minado, costo de procesamiento, costos generales, administrativos y otros dependiendo de la estructura de costos de la operación minera.

Según Whittle (2005), la fórmula general para calcular el valor del bloque es:

$$\text{VALOR} = (\text{METAL} * \text{REC} * \text{PRECIO} - \text{ORE} * \text{CP}) - \text{ROCK} * \text{CM} \quad (i)$$

Donde:

METAL = Unidades de metal en el bloque.

REC = Recuperación Metalúrgica

PRECIO = El precio obtenible por unidad de metal vendido.

ORE = Toneladas de mineral en el bloque

ROCK = El tonelaje total de roca en el bloque.

CP = Costo unitario de procesamiento

CM = Costo unitario de minado.

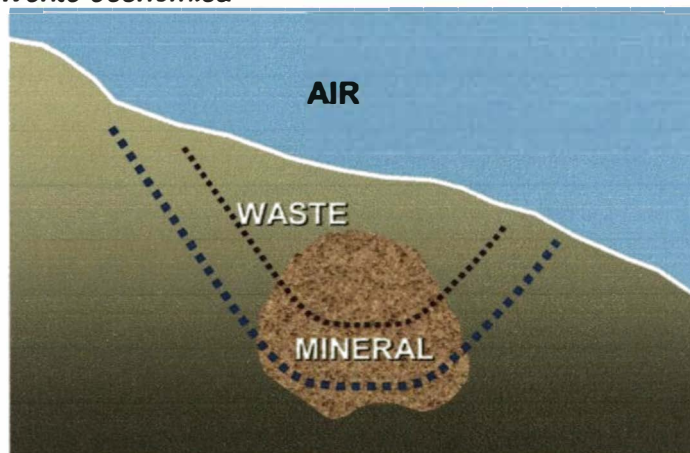
2.1.1.2 Optimización del pit final. La optimización del pit final consiste en determinar la envolvente económica óptima para la explotación del tajo. Existen algoritmos tradicionales y novedosos para realizar esta tarea. El input principal es la valorización, puede ser los bloques valorizados o los parámetros económicos para que el software de optimización valore, depende del programa a utilizar.

El algoritmo Lerchs and Grossman (L&G) es el método más empleado en la industria minera para la optimización de pit, a partir de un modelo de bloques valorizado genera la envolvente óptima considerando la maximización del valor del cono en base a los valores de los bloques y los ángulos de talud. Hasta la actualidad, L&G es la base para la optimización de pit de la industria minera en general. Sin embargo, a lo largo del tiempo se han desarrollado técnicas avanzadas que están logrando buenos resultados para este nivel de estudio, como por ejemplo la metodología Direct Block Schedule (DBS), esta técnica entrega un pseudo plan de minado a nivel de bloques y un pit óptimo económico, esta técnica es robusta ya que considera parámetros como la tasa de descuento, capacidad mina y planta, avance vertical y anchos de minado. Además, el secuenciamiento estratégico del DBS sirve como guía para el diseño de fases.

La Figura 3 muestra un cuerpo mineral en el subsuelo y dos envolventes económicas. La optimización de pit utiliza técnicas matemáticas para calcular la envolvente óptima, ya que ese límite determina el tajo y las reservas de la mina.

Figura 3

Ejemplos de envolvente económica



Fuente: Curso de planificación minera Hooman Askari

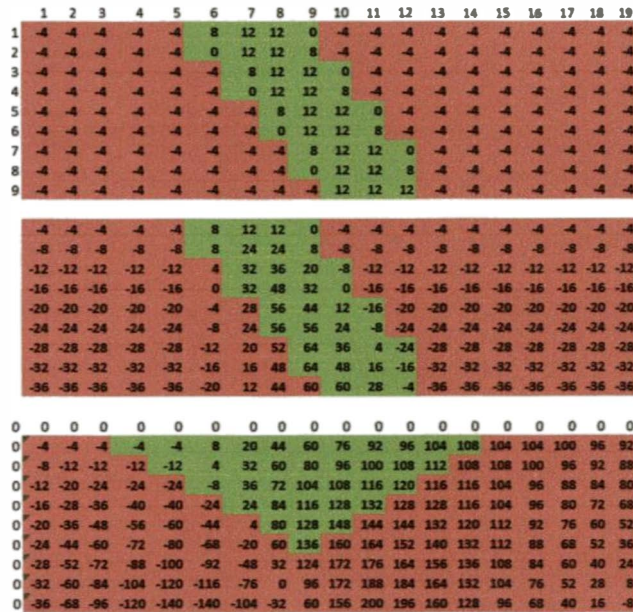
El detalle de las dos metodologías Lerchs and Grossman y Agendamiento Directo (DBS) se describen a continuación:

Metodología Whittle – Algoritmo L&G

El algoritmo de Lerchs and Grossman surgió inicialmente resolviendo el problema de optimización en 2D, en base a una sección transversal al modelo de bloques valorizado y el ángulo de talud. Primero se genera una matriz donde se suma los valores de los bloques de cada columna de forma acumulada, luego una segunda matriz donde suma el valor del bloque con el mayor de los 3 que están a su izquierda, el valor del pit será el máximo valor de la primera fila. Años después, surgió el algoritmo Lerchs and Grossman 3D, el cual se basó en la teoría de grafos, utiliza una programación más avanzada de ramificaciones y arcos direccionados para delimitar la envolvente óptima (pit óptimo).

Figura 4

Algoritmo de Lerchs and Grossman

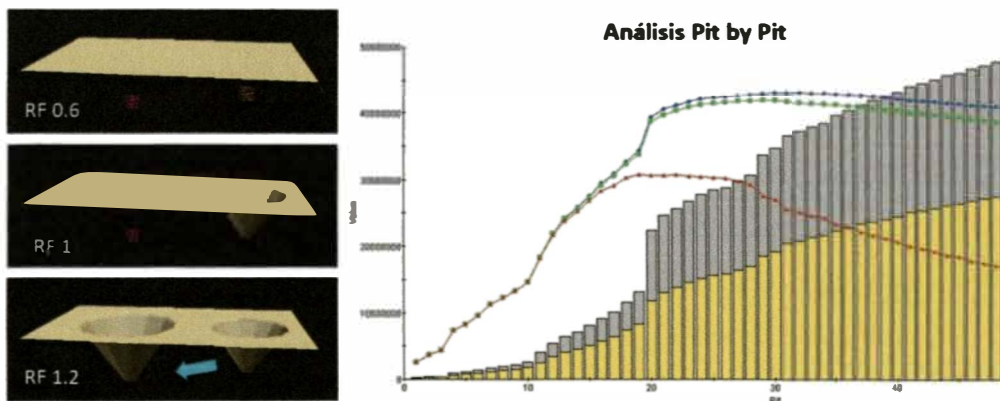


Fuente: Universidad de Chile

Los pits anidados son envolventes económicas para diversos precios, al precio del metal se le multiplica por factores menores y mayores a 1, a los cuales se les llama factor de ingresos (RF). Al ser un análisis paramétrico, los primeros pits anidados nos indican las zonas más atractivas, son las que pagan su extracción a un menor precio y son las mejores zonas para iniciar la extracción del yacimiento. Existen técnicas para determinar las fases de minado en función al análisis de los pits anidados, por lo general se utiliza la Metodología Pit by Pit para determinar las fases y pit final.

Figura 5

Ejemplos de pit anidados y análisis pit by pit



Fuente: Inti Mining Smart Solutions

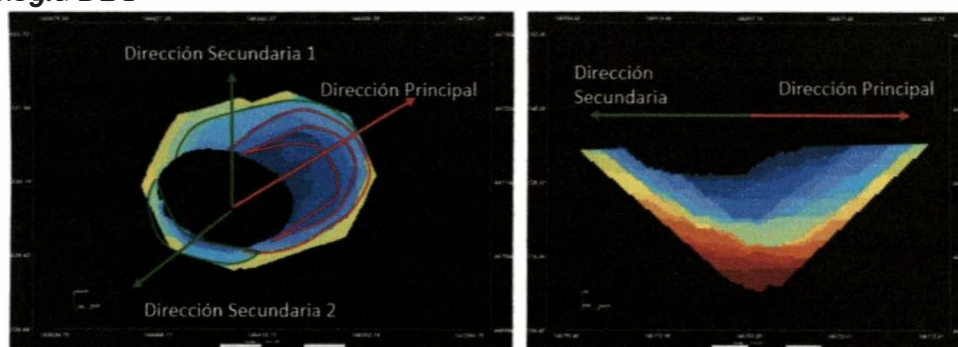
Metodología DBS

Es una técnica avanzada que genera un plan minero de alto nivel mediante el agendamiento directo de bloques hacia los diferentes destinos, puede ser alguna planta de procesamiento, stock pile o botadero. El DBS realiza una optimización integral ya que considera la tasa de descuento, la capacidad mina, capacidad planta, parámetros operativos como sinking rate, anchos mínimos de minado y de fondo mina. Esta técnica genera un plan minero y un pit económico óptimo. Además, nos sirve como guía para el diseño de fases ya que genera el direccionamiento estratégico en función de valor. Lo más importante es que el resultado nos indica qué bloques se extraen, cuándo se extraen y cuál es su destino.

Por lo general, el pit óptimo económico que genera esta técnica es más pequeño que el pit generado por Lerchs and Grossman ya que considera el valor del dinero en el tiempo.

Figura 6

Metodología DBS



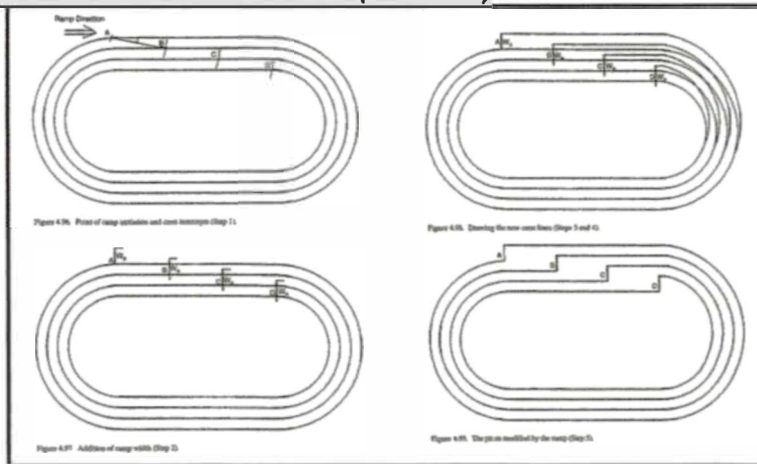
Fuente: Inti Mining Smart Solutions

2.1.1.3 Diseño de fases. Una fase se define como un diseño operativo de un sector de la mina, el diseño debe cumplir con los requisitos geométricos mínimos como accesos, ancho de minado y parámetros geotécnicos para garantizar su extracción.

El diseño de fases se realiza tomando como guía los resultados de la optimización de pit, sea por la metodología de los pits anidados o el secuenciamiento estratégico DBS.

Figura 7

Proceso de diseño de fases a línea media (Hustrulid)



Fuente: Libro de planificación minera – Hustrulid

La Figura 8 muestra un ejemplo de diseño de una fase, el cual cumple con los anchos mínimos, rampas, conexiones y parámetros geotécnicos de diseño. Se realiza diseños a línea media para agilizar la práctica en la planificación a largo plazo.

Figura 8

Ejemplo de diseño de fase a línea media



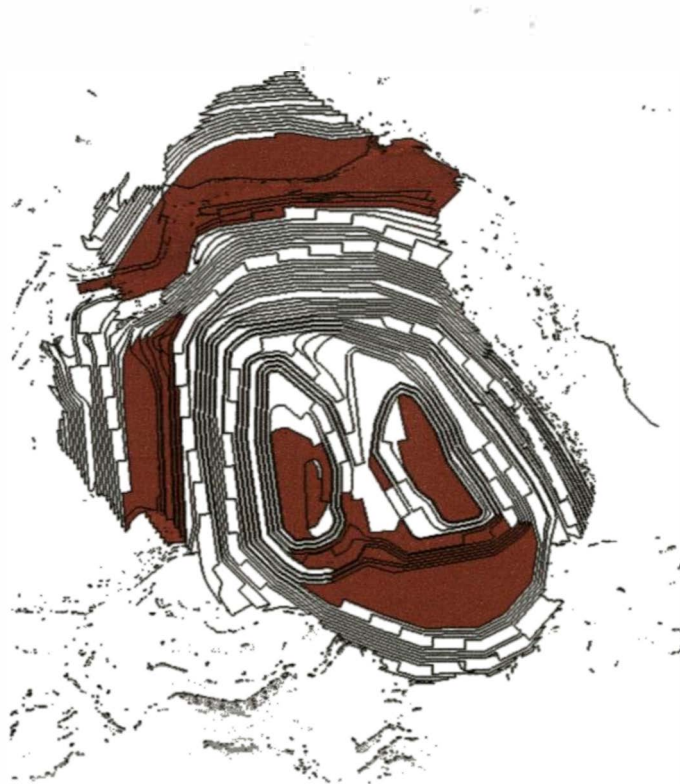
Fuente: Software Qpit

2.1.1.4 Plan de minado. La etapa de la elaboración del plan de minado consiste en secuenciar el minado de las fases diseñadas, el plan debe cumplir con la capacidad planta y capacidad mina. En la industria existen diferentes softwares capaces de elaborar el plan de minado estratégico (óptimo) tomando como inputs el diseño de fases, la cubicación y los indicadores del plan.

Para un mejor detalle, este plan estratégico debe ser llevado a un nivel táctico-operativo, es decir, un plan con asignación de palas por periodo y que cumpla las restricciones operativas como tasa de avance vertical (sinking rate), interacción entre fases, spillage, número de equipos por área, etc. El plan táctico logra capturar el valor económico al haber tomado la guía del plan estratégico.

Figura 9

Ejemplo de minado de un periodo



Fuente: Inti Mining Smart Solutions

Los indicadores (KPI) más importantes de un plan minero son los siguientes:

- Alimentación a la Planta y Ley de metal
- Producción de metal fino
- Movimiento Mina
- Alimentación a stocks y remanejo

2.1.1.5 Estimación de equipos mineros. Luego de tener el plan de minado, el siguiente paso es calcular la cantidad de equipos requeridos para cumplir el plan, principalmente los camiones. Para esta tarea se debe simular el transporte de materiales y calcular las horas de trabajo requeridos para cada periodo. En la industria, existen

diversos softwares mineros para simular el transporte y calcular el perfil de camiones, sin embargo, en el presente trabajo se utiliza el software MineHaul, el cual es una herramienta muy potente para realizar este cálculo trabajando con diseño de fases a línea media.

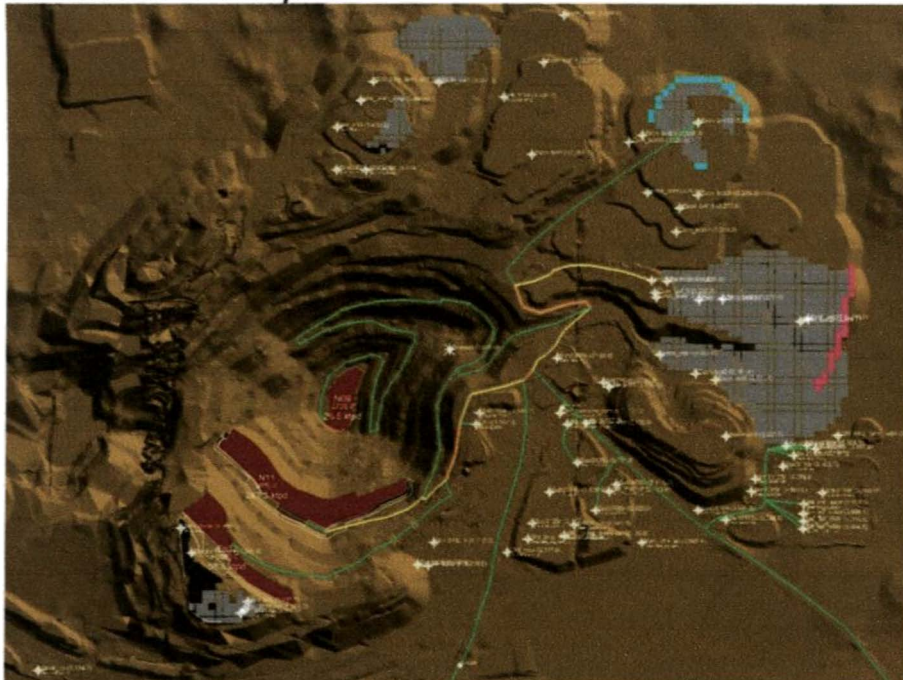
Los principales parámetros de entrada para poder calcular la cantidad de equipos necesarios son los siguientes:

- Diseño de rutas de transporte dentro y fuera del tajo.
- Velocidades del camión por pendiente y estado (vacío y cargado)
- Capacidad de tolva (Payload)
- Tiempos fijos (Acuatamiento, carguío y descarga)
- Diseño de botaderos y stocks

La Figura 10 muestra la interfaz del software MineHaul en el cual se puede observar las rutas desde las fases de minado hacia los diferentes destinos tales como chancador, stocks o botaderos.

Figura 10

Ejemplo de simulación de transporte



Fuente: Inti Mining Smart Solutions

2.1.1.6 Evaluación económica financiera. Finalmente, se realiza la evaluación económica y financiera del plan minero considerando los ingresos de metal fino, los costos de operación OPEX y los costos de capital CAPEX para calcular el valor presente neto (NPV), el cuál es el indicador principal para comparar los planes de minado.

Algunos indicadores adicionales para comparar los planes de minado son:

- TIR (Tasa interna de retorno)
- Periodo de Recuperación (Payback)

2.1.2 Operaciones unitarias en una mina a tajo abierto

Las principales operaciones unitarias que comprenden el ciclo de minado en una mina a tajo abierto son las siguientes:

Perforación

Operación minera que consiste en crear una cavidad (taladro) en la roca utilizando equipos de perforación primaria y pre-corte. Los parámetros de diseño de la malla varían de acuerdo con la geología, parámetros geotécnicos y de voladura.

Voladura

Operación unitaria que consiste en fracturar la roca utilizando explosivos. Los explosivos previamente son cargados en los taladros que fueron preparados por los equipos de perforación.

Carguío

Operación que consiste en el uso de palas y/o cargadores para cargar el material fracturado en los equipos de transporte (camiones). Por lo general, para llenar un camión se realiza 4 a 5 pases con el equipo de carguío.

Transporte

Operación en la cual los camiones transportan la roca fragmentada hacia los diferentes destinos (chancadora, stocks y/o botadero). Los camiones se encargan de todo el viaje desde el frente de minado hacia el destino final. Es el sistema tradicional de transporte en las minas a tajo abierto

Figura 11

Carguío y transporte tradicional



Fuente: Komatsu

2.1.3 Tecnología Inpit Crusher and Conveying

La Tecnología Inpit Crusher and Conveying (IPCC) tiene como objetivo reemplazar o reducir el transporte con camiones por un sistema de fajas transportadoras. El IPCC está compuesto por un chancador dentro del tajo (chancador inpit) y una faja transportadora, la cual realizará el transporte continuo de mineral y/o desmonte desde el tajo hacia su destino final.

Debido al alto capex para esta tecnología, es viable implementar en minas de vida útil extensa con la finalidad de lograr el ahorro de Opex que justifique la inversión realizada.

Los beneficios de la tecnología IPCC son los siguientes:

- Reducción de distancias de transporte
- Reducción de flota de camiones
- Reducción de consumo de combustible y huella de carbono

Tipos de IPCC:

- Sistema Fijo:

Están ubicados en el borde del tajo, está diseñado para estar en la misma ubicación durante la vida de la mina. Según Loli (2016), muchas compañías eligieron esta alternativa

de IPCC, sin embargo, con la profundización del tajo las distancias se han incrementado considerablemente y las minas están evaluando cambiar la ubicación.

Figura 12

Tecnología IPCC fijo



Fuente: Inti Mining Smart Solutions

- Sistema Semi fijo:

Estos sistemas son instalados en alguna fase específica. Según Loli (2016), permanece por tiempos prolongados en un mismo lugar y luego se movilizan a otro punto.

Figura 13

Tecnología IPCC semi fijo



Fuente: Tesis Proceso de Planificación considerando IPCC

- Sistema Semi móvil:

Este chancador es más versátil con respecto al IPCC semi fijo, se puede ir acomodando al ritmo de operaciones, sin embargo, también genera tiempos improductivos.

Figura 14

Tecnología IPCC semi móvil



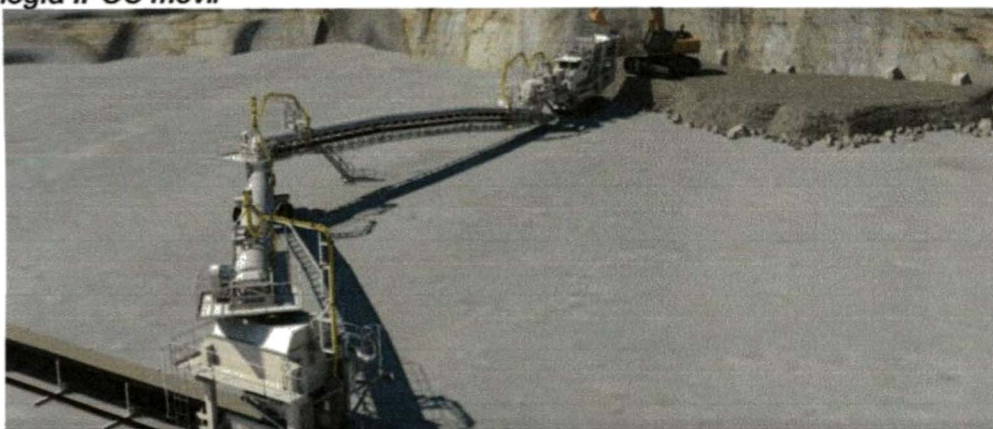
Fuente: Inti Mining Smart Solutions

- Sistema Móvil:

El IPCC se ubica en el frente de avance y se alimenta directamente de la pala, ya no siendo necesario el transporte con camiones.

Figura 15

Tecnología IPCC móvil



Fuente: Inti Mining Smart Solutions

Impacto de la tecnología IPCC en el diseño de fases y planificación:

Se debe considerar una plataforma de al menos 100 m en la fase donde se va a ubicar el IPCC, esto para garantizar una correcta operación del chancador. Además, se debe evitar la interacción del transporte con fajas y el transporte por camiones para minimizar todo tipo de riesgos asociados.

La tecnología IPCC es una alternativa novedosa y atractiva, muchas minas del Perú y del mundo están evaluando su implementación ya que hoy en día se lucha con los altos

costos e incluso es una vía para la descarbonización del medio ambiente al reducir la huella de carbono. Las Figuras 16 y 17 muestran un ejemplo de IPCC en una mina.

Figura 16

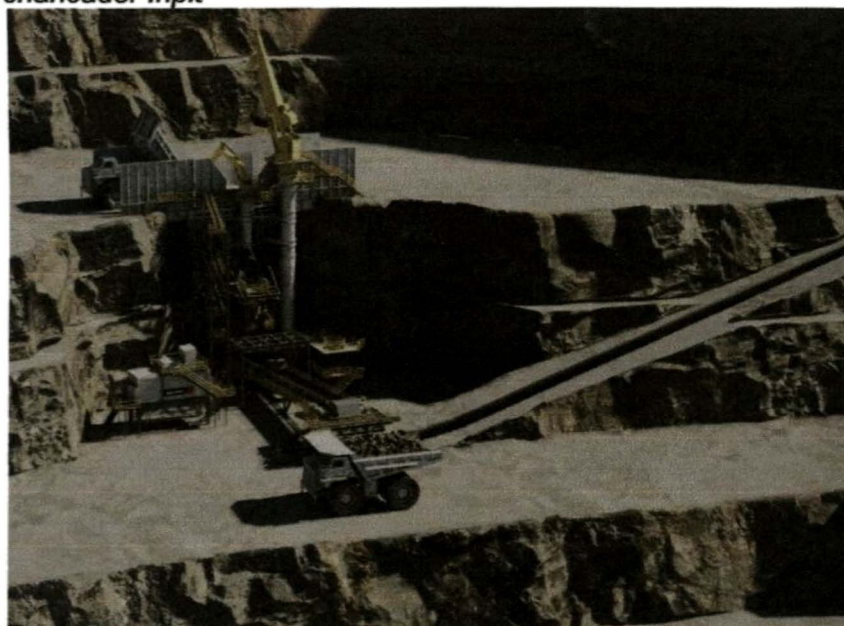
Mina con tecnología IPCC



Fuente: Metso

Figura 17

Ejemplo de chancador Inpit



Fuente: Metso

2.2 Marco conceptual

Se detalla el significado de los principales conceptos utilizados en la investigación:

Transporte:

Acarreo del mineral y desmonte desde el tajo hacia los destinos.

Mecanizado:

Transporte del material mediante fajas transportadoras.

Simulación:

Representación del sistema de transporte de una mina.

Chancador:

Máquinas utilizadas para reducir el tamaño de las rocas.

Faja transportadora:

Sistema que permite movilizar el material desde el tajo hasta el botadero.

Reducción:

Disminución de algún parámetro a través del uso de técnicas.

CO₂:

Compuesto químico emitido por los camiones diésel, genera un impacto negativo en el planeta Tierra a través del efecto invernadero.

Distancia:

Longitud de la ruta de viaje de los camiones mineros.

Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación

3.1 Metodología

En el presente estudio se utiliza el término Caso base para referirse el plan actual de la mina, el cual utiliza un sistema de transporte tradicional con camiones mineros, este caso es el punto de partida para la construcción del Caso IPCC.

El Caso IPCC es el escenario que considera la implementación del Inpit Crusher en la mina en estudio y utiliza un sistema de transporte mixto, es decir, utiliza el IPCC y camiones mineros, este caso considera criterios estratégicos y tácticos que requiere la implementación de la tecnología IPCC en la operación minera.

La metodología de trabajo que se plantea consiste en realizar un análisis estratégico a la implementación de la tecnología IPCC en la mina en estudio, se inicia con un análisis al Caso base e identificación de las principales oportunidades para la implementación del IPCC, luego se realiza una serie de evaluaciones técnicas a fin de determinar la ubicación, la capacidad, los materiales a recibir y el periodo de inicio de la tecnología. Con estos parámetros, se realiza el proceso de simulación determinística de transporte de materiales utilizando el software MineHaul para el caso IPCC. Finalmente, se realiza una evaluación económica y se compara los resultados entre los casos.

La metodología de trabajo del presente estudio está compuesta por 6 etapas, las cuales son:

Etapas:
Etapa 1: Análisis del caso base

Etapa 2: Estrategia de solución caso IPCC

Etapa 3: Definición de opciones caso IPCC

Etapa 4: Rediseño de mina caso IPCC

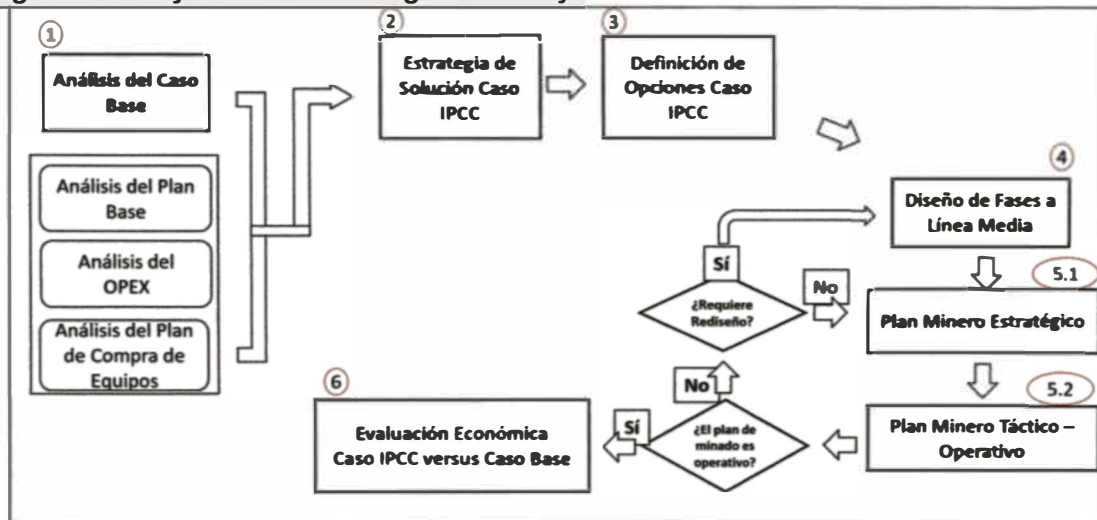
Etapa 5: Plan de minado y simulación de transporte caso IPCC

Etapa 6: Evaluación Económica

Estas etapas siguen el proceso que muestra la Figura 18 y se detalla cada una a continuación:

Figura 18

Diagrama de flujo de la metodología de trabajo



Fuente: Elaboración propia

3.1.1 Etapa I: Análisis del caso base

El primer paso es entender el comportamiento de la mina, por lo cual se plantea 3 análisis iniciales para identificar las oportunidades y riesgos que tiene la implementación de la Tecnología IPCC en la mina en estudio.

Los análisis iniciales que se plantean son los siguientes:

- **Análisis del plan de minado:**

Se revisa y entiende el plan de minado del Caso base, esto permite conocer la configuración, los objetivos, los componentes actuales y los criterios utilizados. Este análisis será la base para identificar oportunidades y riesgos para la implementación de la tecnología IPCC.

Principalmente, se revisa los siguientes ítems:

- Plan de alimentación a la planta de procesamiento y capacidad mina.
- Secuenciamiento de minado y sus criterios operativos tales como: ratio de avance vertical, spillage, interacción entre fases y número de palas por fase.
- Diseño de fases de minado, botaderos y rutas.

- Mineral Expuesto por periodo (Regla del Serrucho).

- **Análisis del Costo de Operación:**

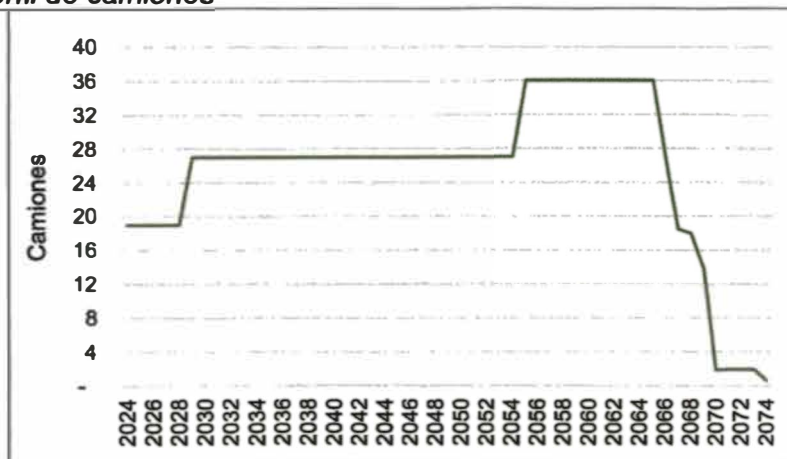
Se evalúa el costo de operación (OPEX) a lo largo de la vida de la mina, el costo operativo se eleva debido al incremento del costo de minado por la profundización del tajo. El objetivo es identificar los periodos en los cuales el costo de operación se incrementa de forma considerable.

- **Análisis del perfil de camiones:**

Se revisa la estrategia de cálculo de camiones a lo largo del plan minero y se identifica los periodos en los cuales se incrementa el perfil de camiones. La inversión en el IPCC debe ser muy eficiente.

Figura 19

Ejemplo de perfil de camiones



Fuente: Elaboración propia

3.1.2 Etapa II: Estrategia de solución del caso IPCC

Tomando como base los hallazgos de la etapa anterior, se realiza una serie de análisis técnicos a fin de determinar la mejor solución para el Caso IPCC y responder las siguientes preguntas estratégicas:

- ¿Cuándo se debe instalar el IPCC?
- ¿Dónde se debe ubicar el IPCC?
- ¿Qué capacidad debe tener el IPCC?
- ¿Qué materiales se enviarán al IPCC?

Los análisis que se realizarán para responder las preguntas son:

- Identificación del periodo de inicio de la tecnología IPCC.
- Análisis de mejor sector de la mina para ubicar el IPCC (zona estática)
- Identificación del centro de gravedad operativo.
- Análisis de distancias de los materiales y capacidad del IPCC

3.1.3 Etapa III: Definición de opciones caso IPCC

En esta etapa, se plantea un árbol de casos variando la capacidad y ubicación espacial de la tecnología IPCC, estos casos serán desarrollados con simulación de transporte para evaluar los resultados económicos. Esta etapa es muy importante, ya que el cumplimiento de los objetivos del presente trabajo depende de los criterios tomados en cuenta para la definición de casos.

3.1.4 Etapa IV: Rediseño de mina caso IPCC

En base a la elección del mejor sector para la ubicación del IPCC, se plantea un rediseño de las fases donde se instalaría la tecnología, el diseño debe considerar los espacios necesarios para accesos y plataformas del chancador Inpit y la faja (100 x 100 m mínimo). Al ser un estudio de nivel estratégico, el diseño de fases será realizado a línea media, lo cual es muy común en la elaboración de planes de minado a largo plazo en la industria.

3.1.5 Etapa V: Plan de minado y simulación de transporte caso IPCC

Plan Táctico – Operativo:

De haber cambios considerables en el diseño y secuenciamiento de las fases, es necesario realizar un plan estratégico con los nuevos diseños para optimizar las leyes de alimentación a planta los primeros periodos y compensar el reordenamiento por la implementación de la tecnología IPCC; caso contrario, se toma como guía el secuenciamiento del Plan del Caso base para confeccionar el plan de minado táctico - operativo del caso IPCC.

Los parámetros operativos más resaltantes que deben considerarse en la confección del plan de minado son los siguientes:

- Interacción entre fases y spillage
- Mineral expuesto por periodo
- Número de equipos según geometría de las fases.
- Tasa de avance vertical

Simulación de Transporte:

Se realiza simulación determinística de transporte de materiales considerando la implementación de la tecnología IPCC para cada caso propuesto. La simulación permite calcular las horas de trabajo de los camiones, el perfil de equipos necesarios para cumplir el plan y el consumo de combustible. Además, simula el llenado de los botaderos actuales y cumplimiento de la capacidad del IPCC, esto último ayudará a calcular la utilización de la tecnología para las diferentes capacidades a simular.

3.1.6 Etapa VI: Evaluación económica

La estimación de CAPEX y OPEX de cada uno de los casos se realizará a nivel estratégico en base a valores de benchmarking de diversos proyectos en esta misma etapa, el cual permitirá la evaluación económica de las opciones.

Es importante resaltar que el criterio a utilizar en la Estimación del CAPEX en el plan considerando la implementación de la tecnología IPCC es la búsqueda del mejor valor económico, es decir identificar el mejor periodo para realizar la nueva inversión, de esa forma optimizar el nuevo plan y maximizar la vida de los equipos mineros.

Con los planes de minado y estimación de CAPEX y OPEX, se realiza el cálculo del valor presente neto del caso con tecnología IPCC y así poder comparar los resultados.

3.2 Aplicación de la metodología

En esta sección se describe el procedimiento realizado para el Caso IPCC de la presente investigación de acuerdo con las etapas planteadas en la metodología de trabajo.

3.2.1 Etapa I: Análisis del caso base

La mina en estudio es una operación minera a tajo abierto que extrae y procesa mineral de cobre, además cuenta con una planta de procesamiento en el cual utilizan el método de flotación para la recuperación del metal fino.

El Caso base, el cual considera un sistema de transporte tradicional utilizando camiones, tiene una vida de 51 años y una flota máxima de 36 camiones mineros.

➤ Análisis del plan de minado del caso base:

Se analizó el plan de minado del Caso base con el objetivo de identificar las oportunidades para la implementación de la tecnología IPCC y sus riesgos asociados.

Las variables que se analizaron del Caso base fueron:

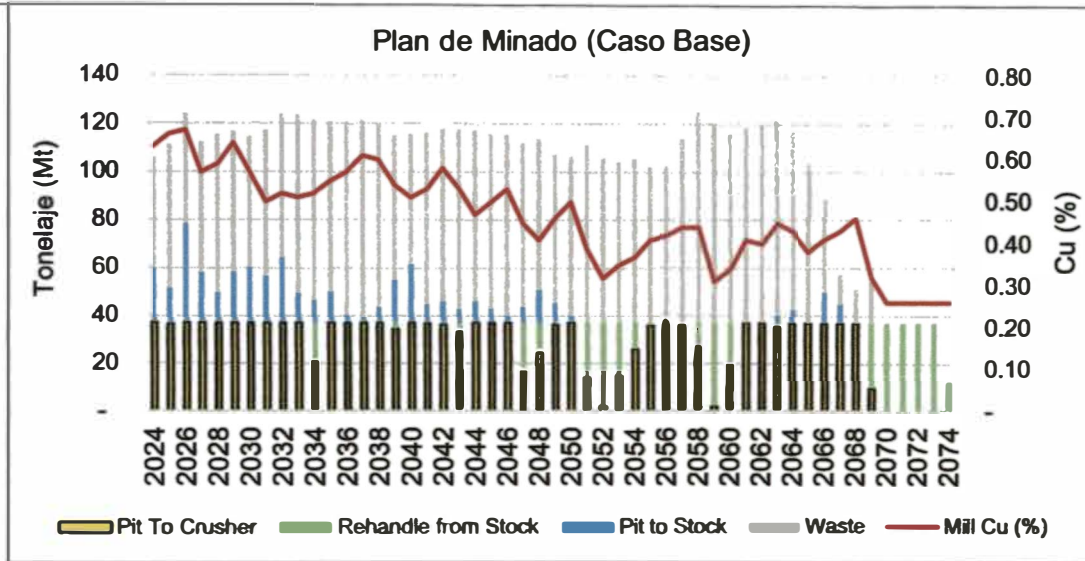
- Plan de alimentación a la planta y capacidad mina
- Diseño de fases.
- Definición de mineral
- Secuenciamiento de minado y operatividad (ratio de avance vertical, interacción entre fases, otros)
- Mineral expuesto por periodo

Plan de alimentación a la planta y capacidad mina:

El plan de minado del Caso base tiene un movimiento total de aproximadamente 120 Mt y una tasa de alimentación a la planta de 37 Mt. Los primeros periodos se logra una alimentación constante con mineral desde la mina por el aporte de las primeras fases, prácticamente a partir del año 2047 se empieza a reclamar el mineral del Stockpile. La Figura 20 muestra la alimentación a la planta y la ley del metal.

Figura 20

Plan de minado caso base



Fuente: Mina en estudio

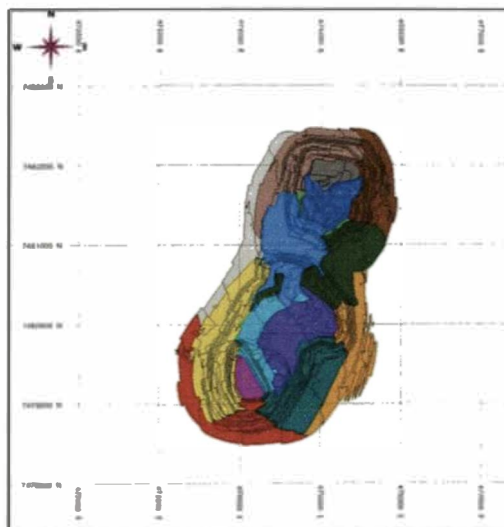
La Figura 20 también muestra el tonelaje de desmonte enviado al botadero, el cual es 60 Mt por año. Este valor es muy importante porque brinda la referencia de cuánto podría ser la máxima capacidad de la tecnología IPCC en la mina en estudio.

Diseño de Fases:

El plan de minado del Caso base está elaborado con 15 fases de minado y su distribución se muestra en la Figura 21. Especialmente, la mina en estudio tiene 2 sectores (Zona Norte y Zona Sur).

Figura 21

Fases del caso base



Fuente: Mina en estudio

Definición de Mineral:

La definición de mineral en el caso base está dada por la metodología de Beneficio Marginal, en el cual, el costo de minado se considera como costo hundido y el bloque solo paga sus costos de procesamiento y generales-administrativos. La valorización del bloque considerando el costo de minado podría ser negativa, pero es más conveniente enviarlo al proceso que enviarlo al botadero. En resumen, el criterio de discretizar mineral y desmonte en el Caso base es la ley de corte marginal.

Al realizar los cálculos con los parámetros económicos dados para fines del estudio, la ley de corte marginal es 0.22 % de Cu, por lo cual si un bloque tiene mayor ley será considerado mineral y si tiene menor ley será considerado desmonte. La fórmula utilizada para el cálculo de la ley de corte marginal fue la siguiente:

$$\text{Ley de Corte Marginal} = \frac{\text{CP} + \text{G\&A}}{\text{Rec} \cdot (\text{Precio} - \text{CV})} \quad (\text{ii})$$

Donde:

CP = Costo de procesamiento

G&A = Costos generales y administrativos

Rec = Recuperación metalúrgica

Precio = Precio del metal pagable

CV = Costo de venta

La Tabla 2 detalla los parámetros económicos y el valor de la ley de corte marginal estimado para el Caso base.

Tabla 2***Ley de corte marginal***

	Valor	Unidad
Precio		
Precio Cu	3.39	\$/lb
Factor pagable	1	
Venta		
Costo de venta Conc Cu	0.50	\$/lb
Minado		
Costo de Minado (Nivel de Referencia)	2.53	\$/ton
Procesamiento		
Costo de Procesamiento	9.20	\$/ton
Recuperación Metalúrgica	85	%
Generales y Administrativos		
Costo G&A	2.7	\$/ton
Remanejo		
Costo de Remanejo	0.59	\$/ton
Factor		
Factor de conversión	2204.62	lb/ton
Ley de Corte Marginal	0.22	%

Fuente: Mina en estudio

Para fines de ser comparable, el caso IPCC también debe considerar la ley de corte marginal de 0.22 % Cu para discretizar el mineral y desmonte, este criterio será utilizado en la cubicación de los nuevos componentes (Fases).

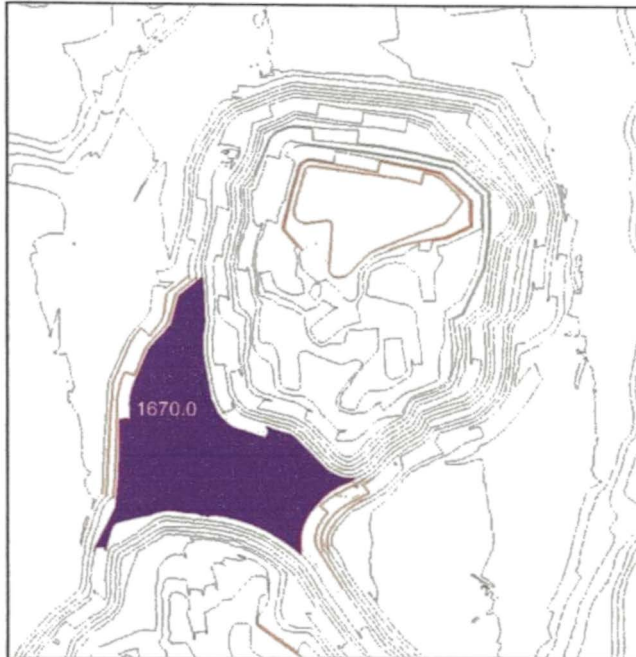
Secuenciamiento de minado y operatividad:

En este análisis se revisó parámetros operativos con la finalidad de garantizar el cumplimiento del plan y minimizar los riesgos.

Por ejemplo, en el periodo 2024, se puede ver que el plan es operativo ya que el minado de las fases (bancos de línea roja) no interactúan entre sí y tienen salida libre hacia los posibles destinos. La Figura 22 muestra la secuencia del periodo 2024.

Figura 22

Secuencia de minado periodo 2024



Fuente: Mina en estudio

Se analizó la secuencia de minado de todos los periodos y no se encontró problemas de operatividad. El plan de minado cumple con los parámetros operativos válidos para un plan de largo plazo.

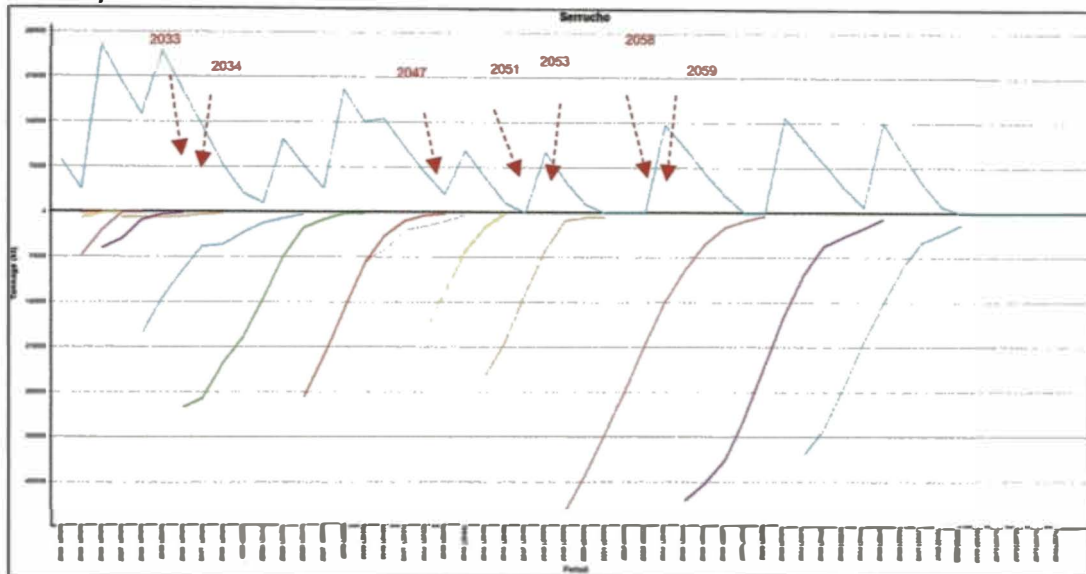
Mineral Expuesto

Los primeros periodos se tiene mineral expuesto en el tajo porque las primeras fases están en los fondos, sin embargo, hay algunos periodos en los cuales se tiene muy poco mineral, como por ejemplo los años 2033 y 2034. En los siguientes periodos, se puede notar que la mina no tiene mineral expuesto en el tajo los años: 2047, 2051, 2052, 2053, 2058 y 2059, lo cual representa un riesgo importante de no cumplimiento del plan de mina dichos años.

La Figura 23 muestra el “Diagrama del serrucho” del caso base, en el eje positivo se muestra la cantidad de mineral expuesto y en el eje negativo se muestra el desbroce de desmonte para llegar a mineral expuesto. Se puede ver el periodo a periodo del mineral expuesto.

Figura 23

Mineral expuesto caso base



Fuente: Mina en estudio

Al tener en cuenta el mineral expuesto, podemos disminuir el riesgo en un plan minero.

➤ **Análisis del costo de operación:**

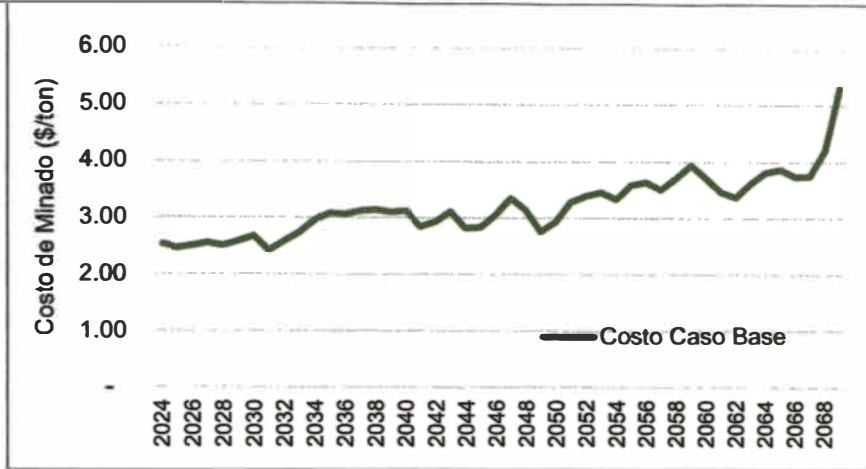
Análisis del Costo de Minado:

Se analizó el costo de minado a lo largo de la vida de la mina para identificar los periodos en los cuales se genera el incremento de dicho costo.

El costo de minado se incrementa conforme avanzan los años debido a que se incrementan las distancias de transporte para los camiones, como se puede apreciar en la Figura 24, el costo de minado se incrementa considerablemente desde el año 2032 y mantiene una tendencia alcista hasta el fin de la vida de la mina.

Figura 24

Costo de minado caso base



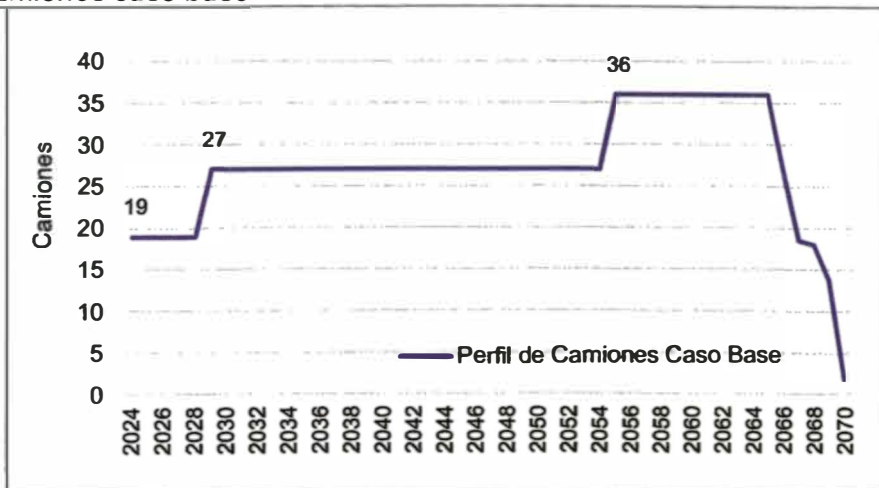
Fuente: Mina en estudio

➤ **Análisis del plan de compra de camiones:**

Se analizó el perfil de camiones del caso base para identificar los periodos en los cuales se requiere comprar camiones mineros. Según el perfil, el año 2029 hay un incremento en el requerimiento de camiones y requiere una inversión de 8 camiones adicionales. El 2029 podría ser un posible punto de inicio para el Tecnología IPCC.

Figura 25

Perfil de camiones caso base



Fuente: Mina en estudio

3.2.2 Etapa II: Estrategia de solución caso IPCC

Se planteó la estrategia de solución para la implementación de la tecnología IPCC en la mina en estudio. Para responder las preguntas estratégicas ¿Cuándo? ¿Dónde?

¿Qué capacidad debe tener? ¿Qué materiales se enviarán? se realizaron las siguientes evaluaciones:

➤ **Análisis del periodo de inicio**

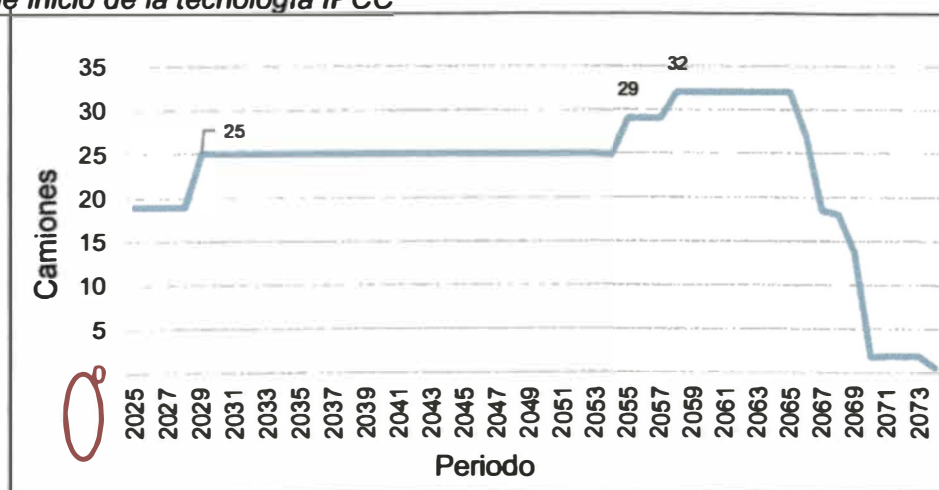
Tomando como base los análisis al costo de operación y al plan de compra de camiones mineros, se determinó algunos posibles periodos de inversión.

Según el perfil de camiones requeridos por el plan del caso base, se inicia con una flota de 19 camiones desde el periodo 2024. Hay un primer aumento el periodo 2029 en el cual se requiere una flota total de 27 camiones, este valor se mantiene hasta el periodo 2054 y luego aumenta el año 2055 llegando a 36 camiones, el cual se mantiene hasta el año 2065. Finalmente, la flota tiene un perfil de caída los últimos años.

Se eligió el periodo 2029 como punto de inicio para la tecnología IPCC, debido a que en dicho periodo existe un aumento en el requerimiento de camiones y además es un periodo no tan alejado del inicio de la operación, También, da la oportunidad de garantizar el minado de las primeras fases tal cual en el plan del caso base. La inversión debe realizarse 01 año antes, es decir 2028.

Figura 26

Fecha de inicio de la tecnología IPCC



Fuente: Elaboración propia

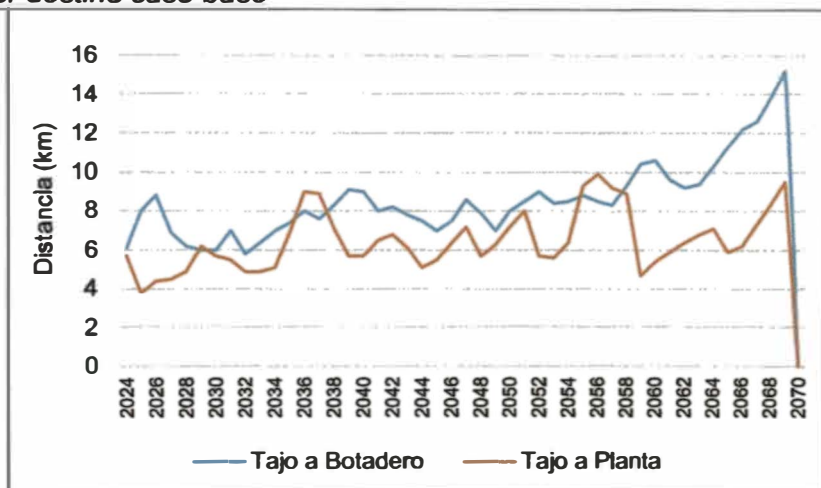
➤ **Análisis de distancias de los materiales y capacidad del IPCC**

Materiales IPCC:

Se evalúa el incremento de las distancias para el mineral y el desmonte a lo largo del plan de minado. La Figura 27 muestra el comportamiento de la distancia a los destinos por periodo.

Figura 27

Distancias por destino caso base



Fuente: Elaboración propia

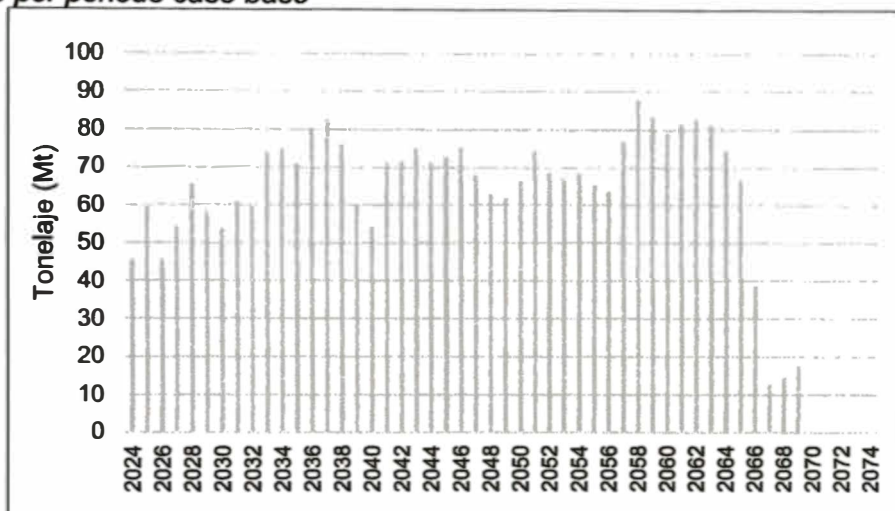
En la Figura 27, se puede notar que las distancias que recorren los camiones hacia el botadero se incrementan a lo largo de la vida de la mina e incluso son mayores a las distancias que recorren los camiones hacia la chancadora. Para el presente trabajo, es más provechoso evaluar la Tecnología IPCC para material desmonte.

Capacidad IPCC

Además, según la Figura 28, se envían en promedio 60 Mt de desmonte al botadero por periodo, esta sería la máxima capacidad de la Tecnología IPCC, sin embargo, es posible que no se utilice al 100 %, por ende, se simulará 3 capacidades: 40, 50 y 60 Mt, los cuales serán evaluados en la simulación de transporte para evaluar la utilización del chancador inpit en cada caso.

Figura 28

Desmante por periodo caso base



Fuente: Elaboración propia

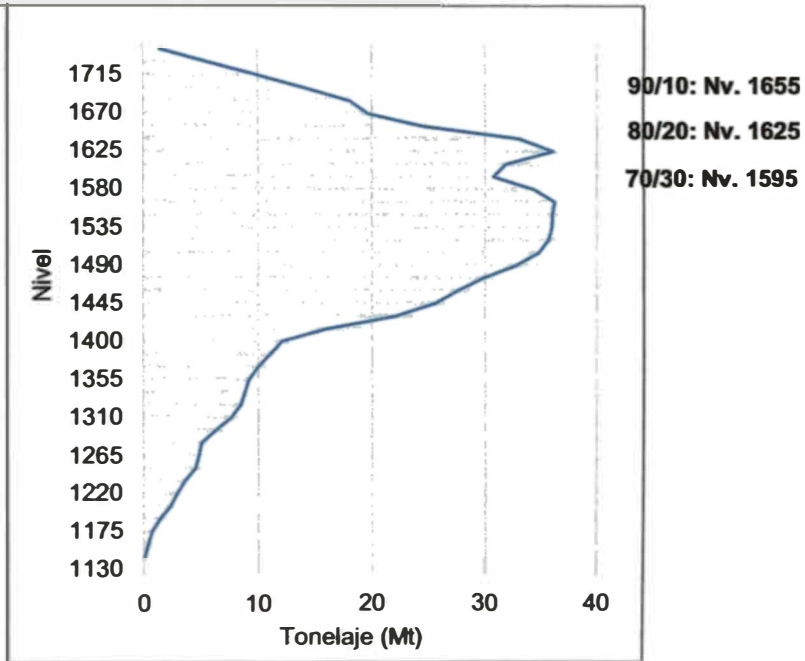
➤ **Centro de gravedad operativo**

Se plantea las posibles ubicaciones geométricas del material desmante en la mina según 3 criterios de equilibrio: 70/30, 80/20 y 90/10, el primer número representa el tonelaje que se transportaría desde el origen (fondo del pit) hacia arriba (cota del chancador IPCC), el material restante sería transportado en bajada desde su origen hacia la cota del chancador inpit. Los criterios se detallan a continuación:

- Criterio 70/30:
70% del material sube y 30% baja hacia la cota del chancador IPCC.
- Criterio 80/20:
80% del material sube y 20% baja hacia la cota del chancador IPCC.
- Criterio 90/10:
90% del material sube y 10% baja hacia la cota del chancador IPCC.

Figura 29

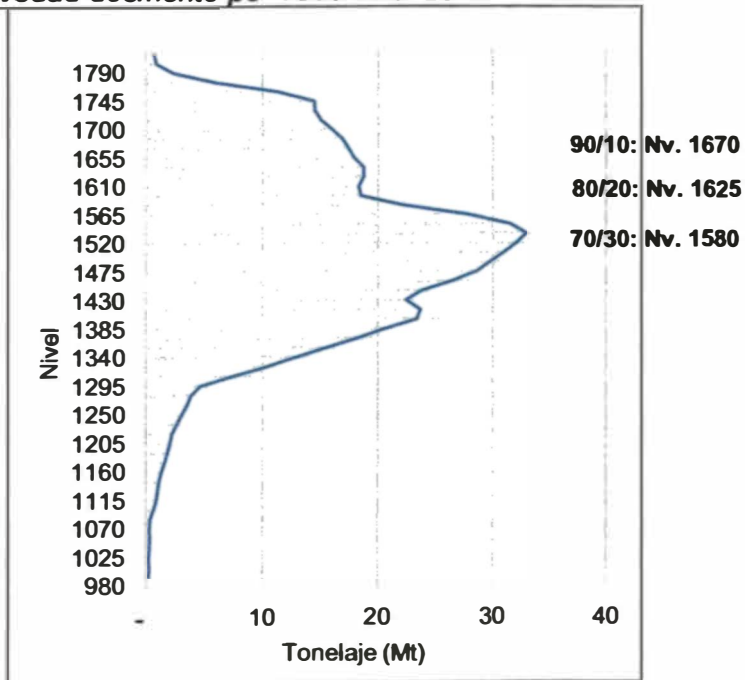
Centro de gravedad desmonte periodos 1 al 10



Fuente: Elaboración propia

Figura 30

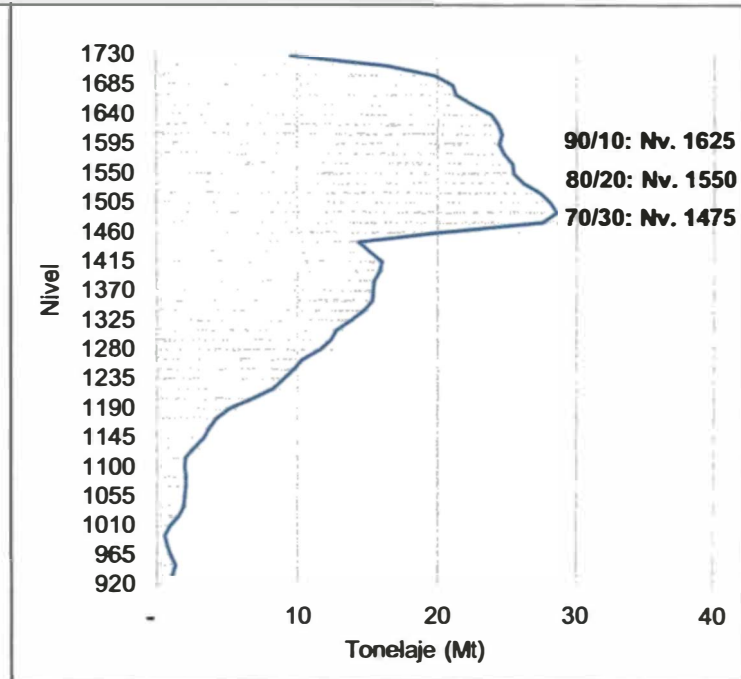
Centro de gravedad desmonte periodos 11 al 20



Fuente: Elaboración propia

Figura 31

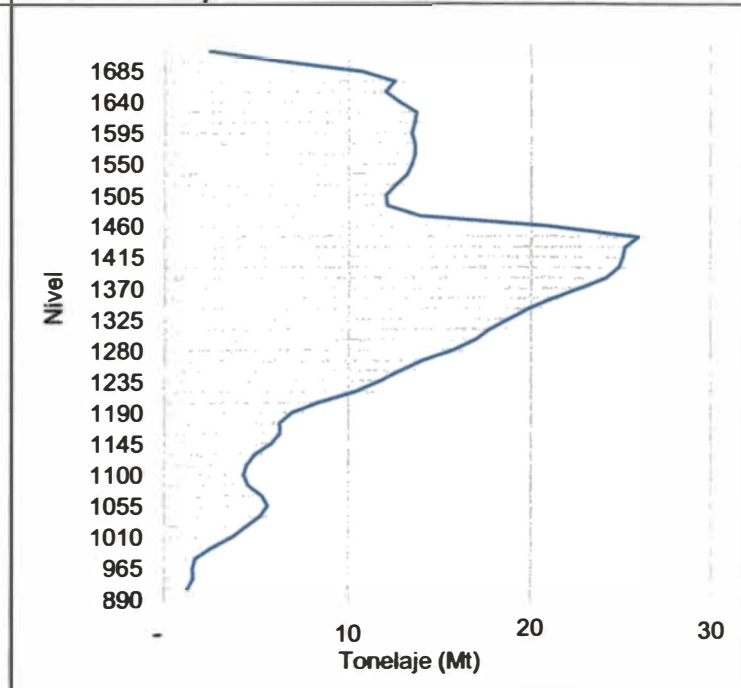
Centro de gravedad desmonte periodos 21 al 30



Fuente: Elaboración propia

Figura 32

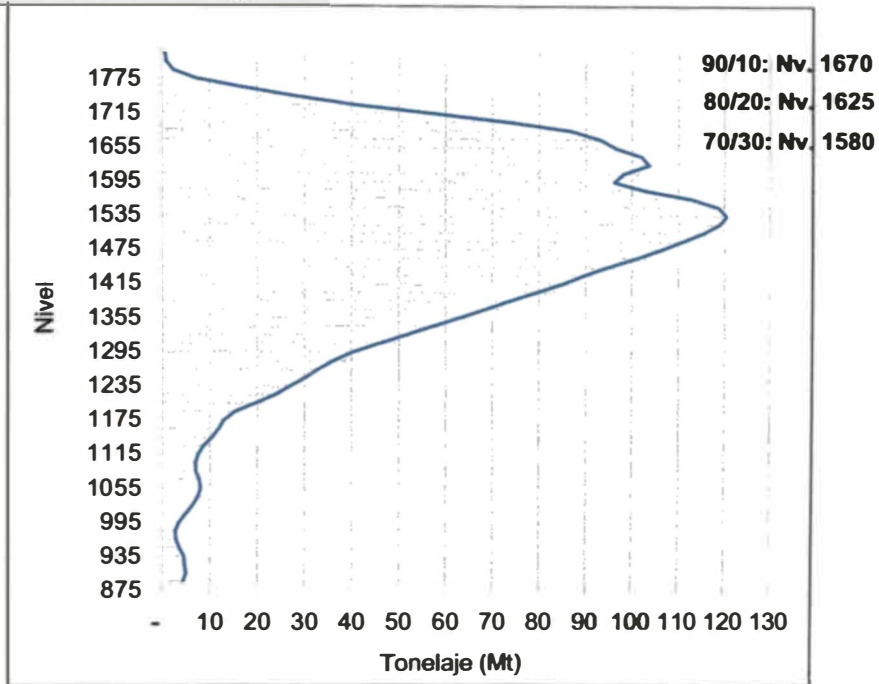
Centro de gravedad desmonte periodos 31 al 40



Fuente: Elaboración propia

Figura 33

Centro de gravedad desmonte bit final



Fuente: Elaboración propia

En resumen, los valores obtenidos se muestran en la Tabla 3

Tabla 3

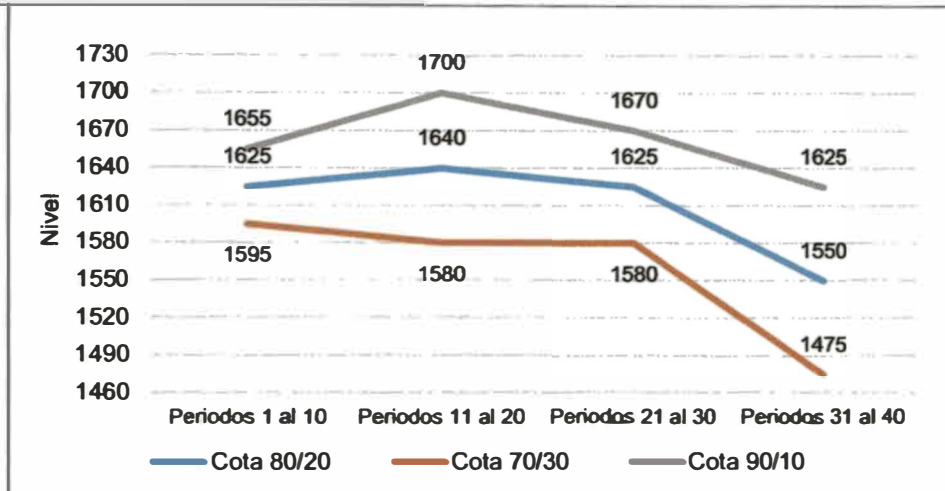
Centro de gravedad IPCC

	Cota 70/30	Cota 80/20	Cota 90/10
Periodos 1 al 10	1595	1625	1655
Periodos 11 al 20	1580	1640	1700
Periodos 21 al 30	1580	1625	1670
Periodos 31 al 40	1475	1550	1625

Fuente: Elaboración propia

Figura 34

Desplazamiento del centro de gravedad



Fuente: Elaboración propia

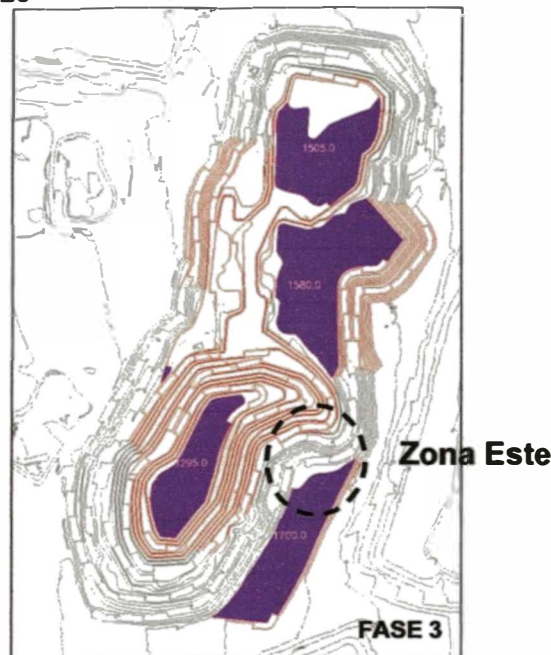
Se consideró las cotas 1670, 1640 y 1595 para ubicar el IPCC.

➤ **Análisis de mejor sector de la mina para ubicar el IPCC (zona estática)**

Se evaluó la topografía del plan de minado del periodo 2029 y se propone ubicar el IPCC en la zona este del tajo.

Figura 35

Plan caso base periodo 2029



Fuente: Elaboración propia

La zona este cumple con los siguientes criterios para ubicar el IPCC:

- Es una zona cercana a pared final.
- Es una zona con ángulo de talud favorable para ubicar la faja del IPCC.
- Es una zona estática y duradera a lo largo del plan. (22 años aproximadamente)

3.2.3 Etapa III: Definición de opciones caso IPCC

De acuerdo con los resultados de los análisis previos, se definió los criterios principales para la implementación de la tecnología IPCC, los cuales son:

- Material: Desmonte
- Ubicación: Zona Este, nivel 1670, 1640 y 1595
- Capacidad de tecnología IPCC: 40, 50 y 60 Mtpa
- Periodo de Inicio: 2029

Para el presente estudio, se considerará 9 casos IPCC los cuales varían por la capacidad del chancador IPCC y su ubicación. Los casos son detallados en la Tabla 4. Es importante resaltar que, para todos los casos, el IPCC será para material desmonte e inicia el 2029.

Tabla 4

Árbol de opciones IPCC

Capacidad	Cota	Cód.	Nombre del Escenario
40 Mt	1700	1	C40Mt_Nv1700
	1640	2	C40Mt_Nv1640
	1595	3	C40Mt_Nv1595
50 Mt	1700	4	C50Mt_Nv1700
	1640	5	C50Mt_Nv1640
	1595	6	C50Mt_Nv1595
60 Mt	1700	7	C60Mt_Nv1700
	1640	8	C60Mt_Nv1640
	1595	9	C60Mt_Nv1595

Fuente: Elaboración propia

3.2.4 Etapa IV: Rediseño de mina caso IPCC

En base a la elección de la ubicación que se definió en los análisis previos, se rediseñó la fase 3, la cual es la fase que construye la pared para el chancador y la faja

transportadora. Esta fase está ubicada en la zona este del tajo y considera una plataforma de 100 m x 100 m en la cota de cada caso IPCC.

Por ejemplo, la Figura 36 muestra la instalación del chancador Inpit en el nivel 1640, para cada escenario IPCC el diseño varía según la ubicación (cota) del chancador inpit.

Figura 36

Diseño IPCC línea media



Fuente: Elaboración propia

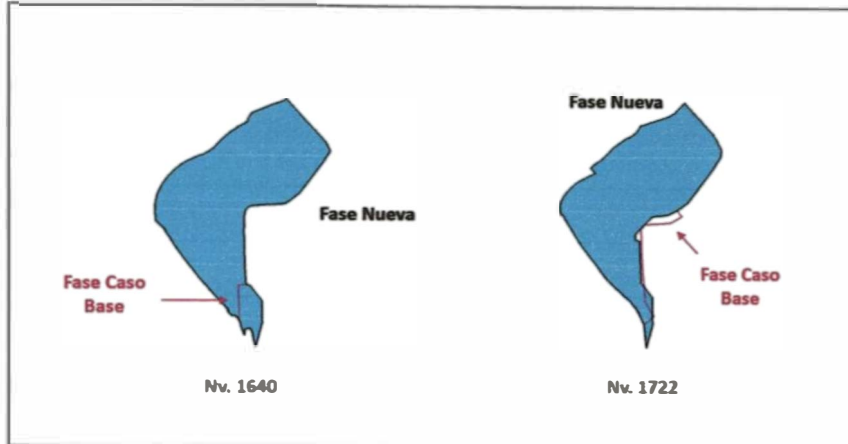
La ventaja de la ubicación elegida es la cercanía a la pared final, lo cual servirá para reducir el transporte del desmonte de las demás fases por muchos años.

La nueva fase, al generar la plataforma para el IPCC, aumentó su tonelaje de desmonte en ese sector, sin embargo, también se reduce el desmonte por haber eliminado una rampa para camiones. Ahora será una pared solo para ubicar la faja transportadora y de esa forma se evita interacción y riesgos operativos.

La Figura 37 muestra vistas en planta del nuevo diseño versus el diseño del Caso IPCC. En el nivel 1640, se ve el crecimiento del nuevo diseño por la plataforma de 100 m x 100 m, mientras que en el nivel 1722 se ve la reducción del diseño por la ubicación de la pared para las fajas transportadoras.

Figura 37

Rediseño de fase vista en Nv. 1640



Fuente: Elaboración propia

Al cubicar las fases, se obtuvo tonelajes similares, se compensa el desmonte que se adiciona con el que se reduce.

La Tabla 5 detalla las diferencias:

Tabla 5

Cubicación de fase rediseñada

Fase	Mineral		Desmonte	Roca Total
	M ton	Cu (%)	M ton	M ton
Fase Caso base	158	0.45	214	372
Fase Caso IPCC	158	0.45	213	371
Diferencia	0.00	0.00	-0.60	-0.60
Diferencia (%)	0.00%	0.00%	-0.28%	-0.16%

Fuente: Elaboración propia

La estrategia de diseño y el tamaño de la operación minera hacen que el impacto del incremento de desmonte sea mínimo y los resultados de la cubicación son muy similares.

3.2.5 Etapa V: Plan de minado y simulación de transporte caso IPCC

Plan de Minado:

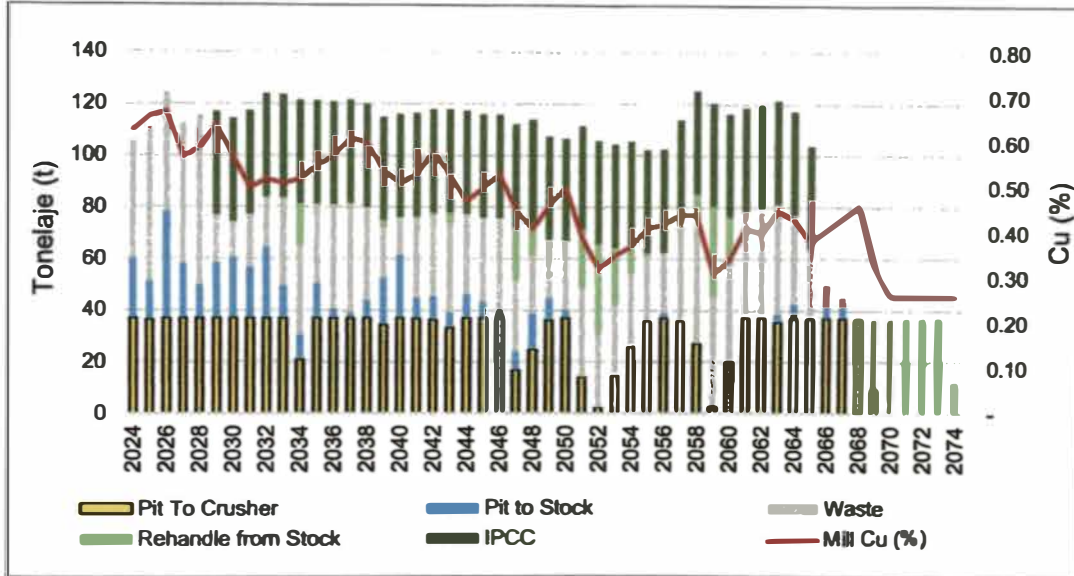
Se elaboró el plan de minado con la fase rediseñada, la ventaja es que la nueva cubicación no tiene diferencias importantes respecto al base, por lo cual el plan pudo cumplir los KPI del caso base sin inconvenientes. La principal diferencia es que una parte de tonelaje (de acuerdo con la capacidad de la Tecnología IPCC) se enviará al chancador

Inpit y no directamente al Botadero. La buena elección de la ubicación del IPCC, cerca de la pared final, fue clave para que el plan pueda cumplir los objetivos sin problemas.

La Figura 38 muestra el plan de minado del Caso IPCC 40 Mt, en el cual se envía 40 Mt de desmonte al IPCC durante los años 2029 hasta el 2048.

Figura 38

Plan caso IPCC 40 Mt



Fuente: Elaboración propia

Simulación de Transporte:

Se realizó instalación de la tecnología IPCC y simulación determinística de transporte de materiales en el software MineHaul para los casos definidos en el árbol de opciones. La simulación nos permitió calcular las horas de trabajo de los camiones y el consumo de combustible, estos 2 parámetros son importantes para el cálculo del costo de minado. Además, el software nos permitió calcular el perfil de camiones mineros para cada caso, esto nos permitió programar el capex de compra de camiones.

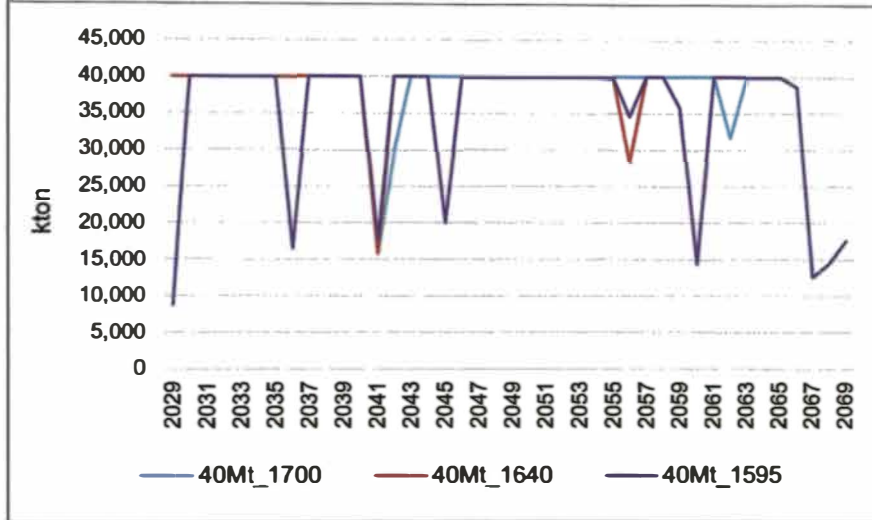
La simulación se realizó para todos los escenarios con la tecnología IPCC. El inicio del chancador inpit es el año 2029, con las diferentes capacidades y ubicaciones para cada uno de los casos.

La simulación logró modelar la tasa de alimentación al IPCC a fin de medir si se está utilizando la máxima capacidad durante el desarrollo del plan.

La alimentación al IPCC para los 9 casos simulados fueron los siguientes:

Figura 39

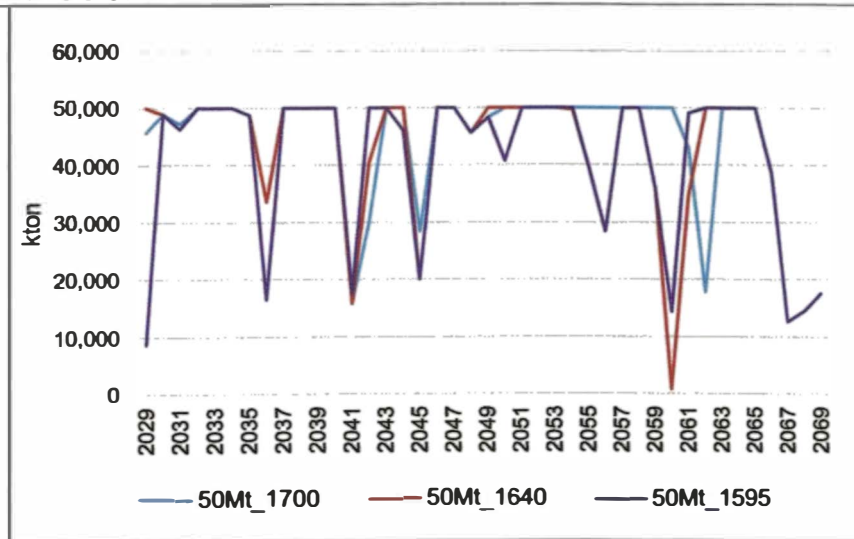
Alimentación IPCC casos 40 Mt



Fuente: Elaboración propia

Figura 40

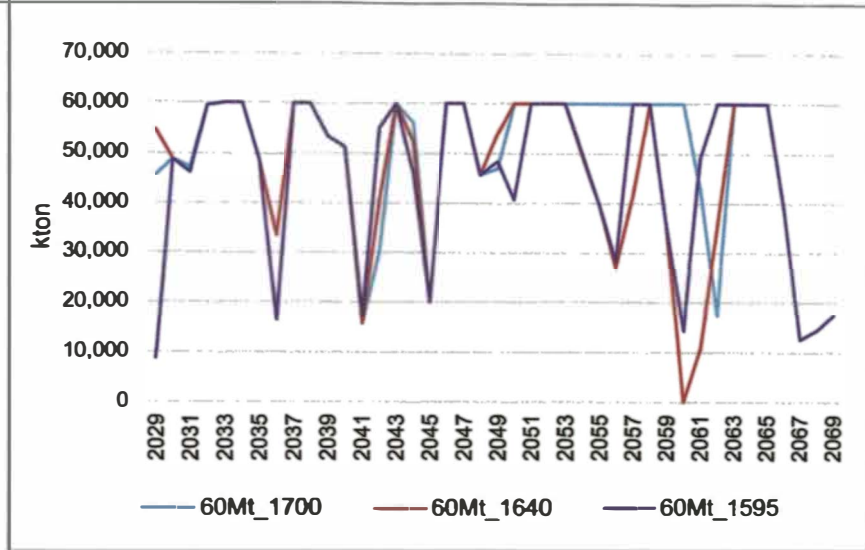
Alimentación IPCC casos 50 Mt



Fuente: Elaboración propia

Figura 41

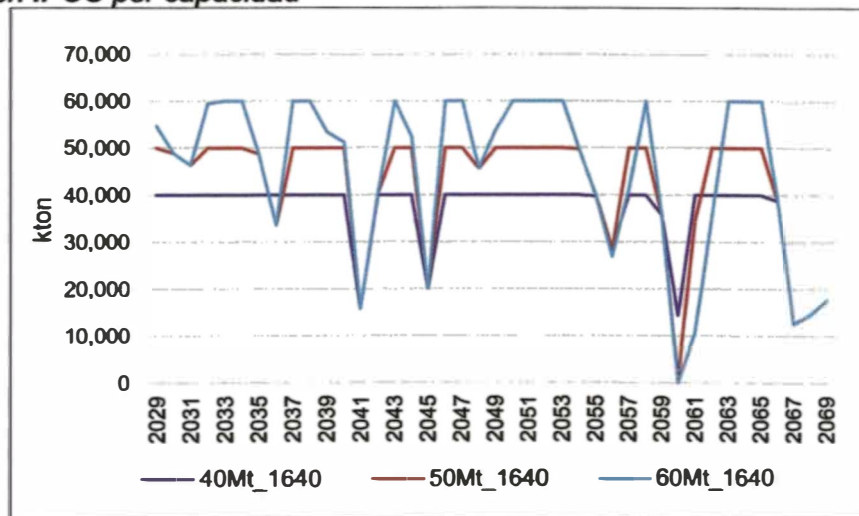
Alimentación IPCC casos 60 Mt



Fuente: Elaboración propia

Figura 42

Alimentación IPCC por capacidad



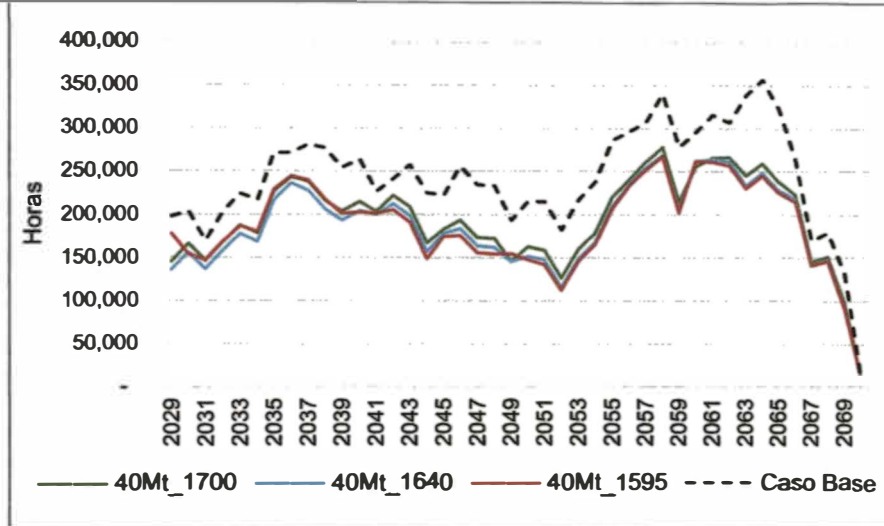
Fuente: Elaboración propia

Las figuras previas muestran que el Caso IPCC 50 Mt_1700 tiene una mejor utilización que los otros escenarios, este caso alimenta 50 Mt de desmonte salvo 2 periodos en que tiene una caída, esto se debe a que no siempre la mejor ruta para el desmonte es llevarlo al IPCC, hay muchos sectores que conviene enviar al Botadero existente. La mejor forma de transportar el desmonte es hacer una combinación entre enviar al botadero existente y a la Tecnología IPCC, esto dependerá de cuál es su mejor ruta.

Además, se pudo calcular las horas de trabajo y consumo de combustible de los casos IPCC.

Figura 43

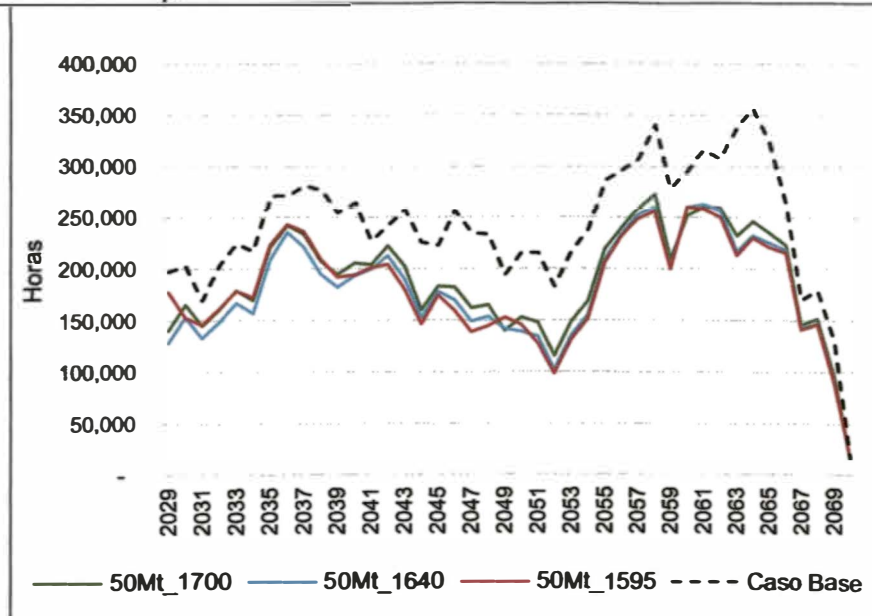
Horas camión IPCC capacidad 40 Mt



Fuente: Elaboración propia

Figura 44

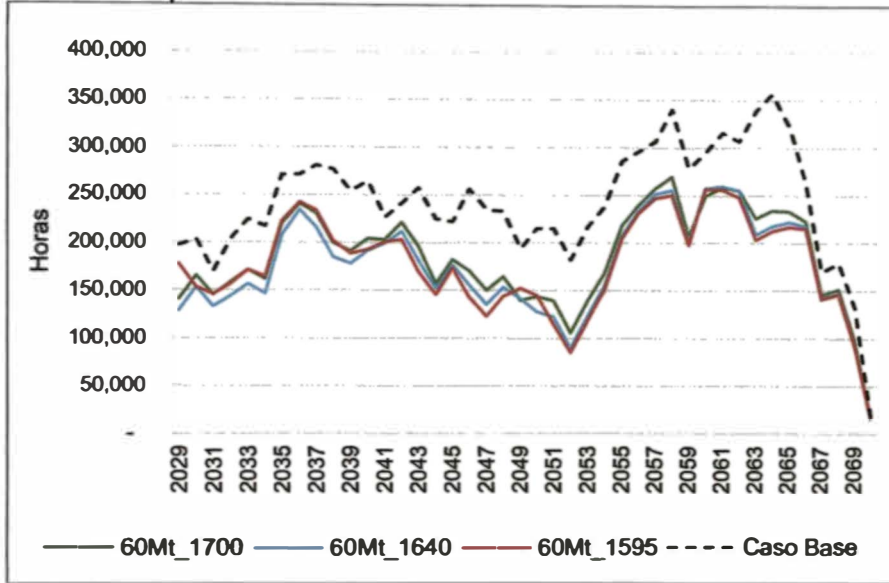
Horas camión IPCC capacidad 50 Mt



Fuente: Elaboración propia

Figura 45

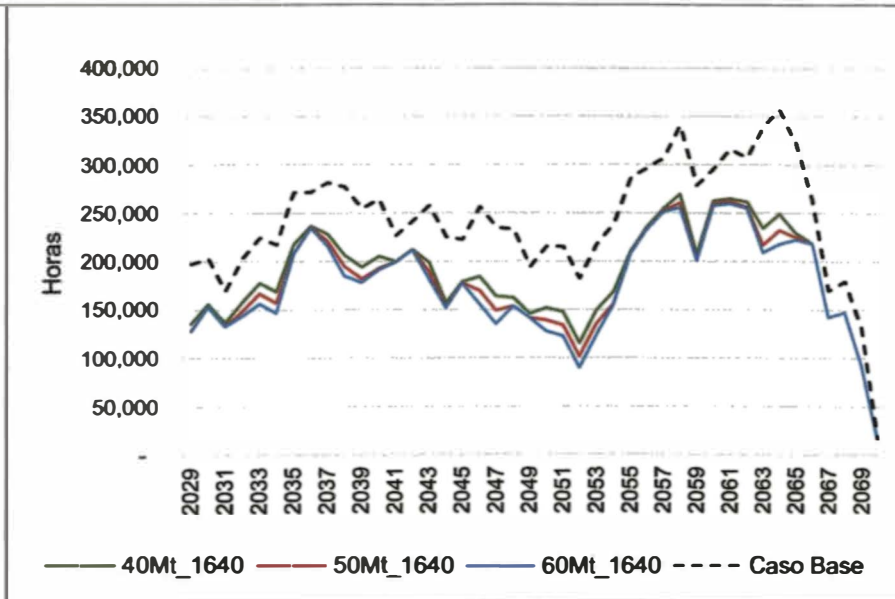
Horas camión IPCC capacidad 60 Mt



Fuente: Elaboración propia

Figura 46

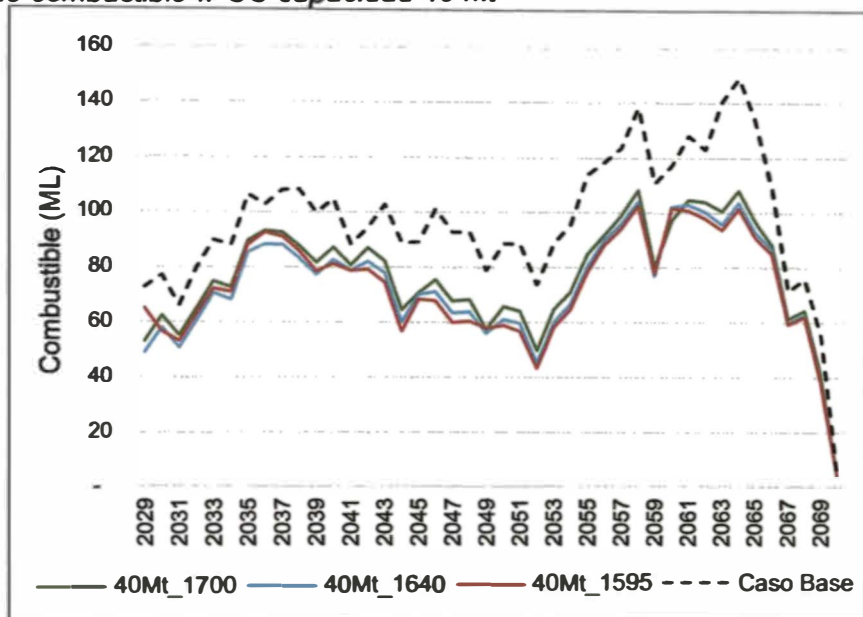
Horas camión IPCC nivel 1640



Fuente: Elaboración propia

Figura 47

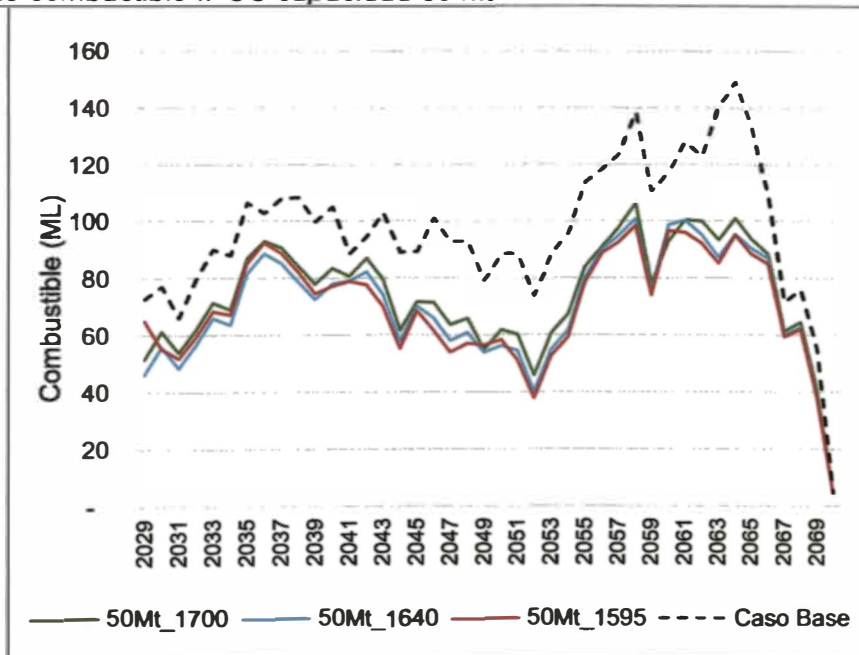
Consumo de combustible IPCC capacidad 40 Mt



Fuente: Elaboración propia

Figura 48

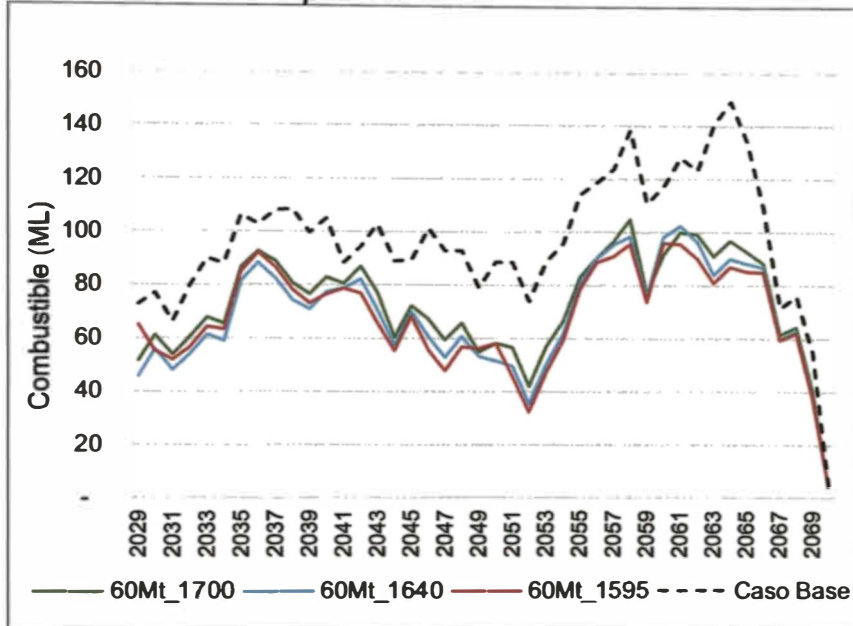
Consumo de combustible IPCC capacidad 50 Mt



Fuente: Elaboración propia

Figura 49

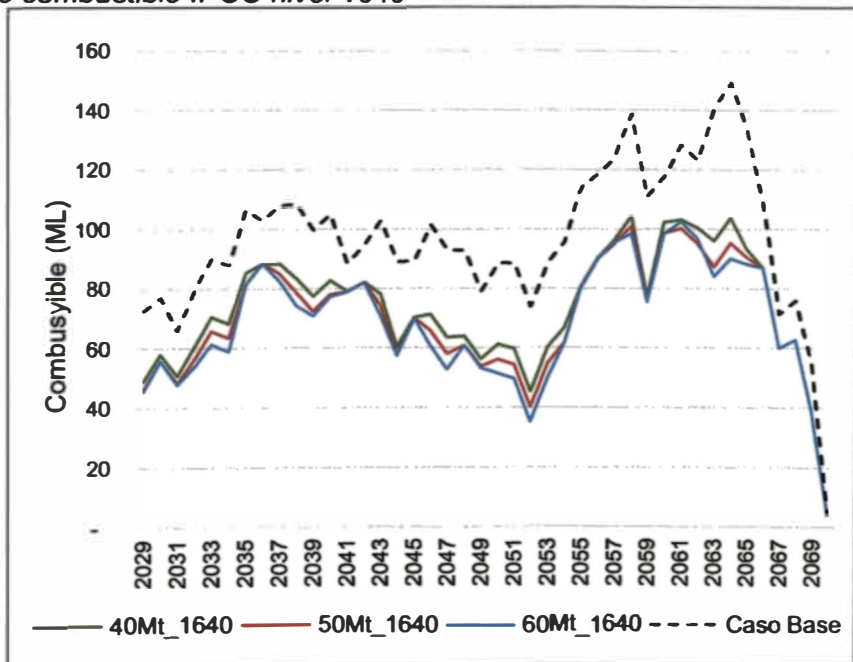
Consumo de combustible IPCC capacidad 60 Mt



Fuente: Elaboración propia

Figura 50

Consumo de combustible IPCC nivel 1640

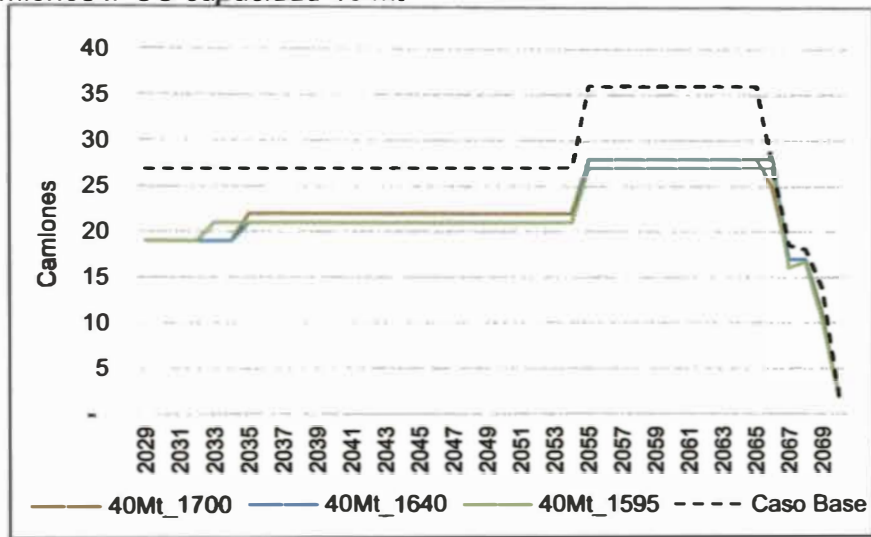


Fuente: Elaboración propia

La simulación también nos permitió obtener el perfil de requerimiento de camiones mineros para el cumplimiento del plan de cada escenario IPCC. Los gráficos muestran el perfil obtenido para cada caso y se comparan con respecto al caso base.

Figura 51

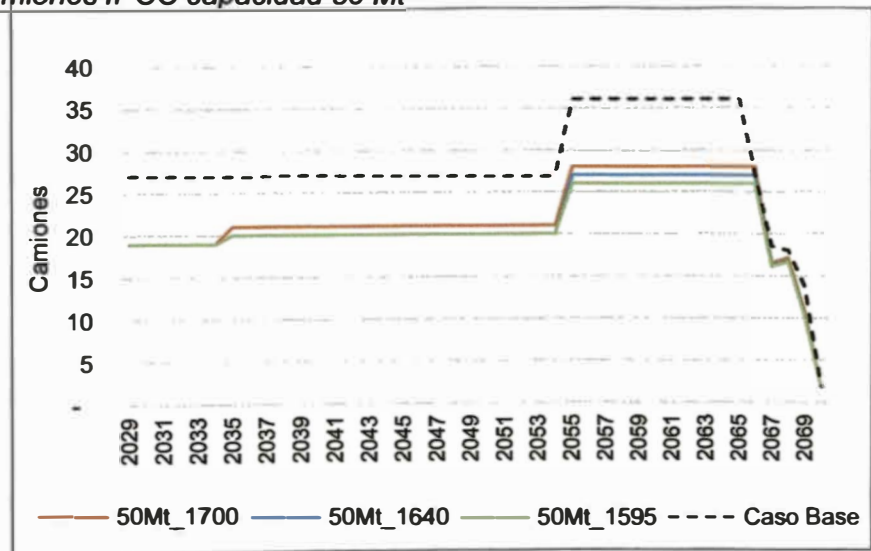
Perfil de camiones IPCC capacidad 40 Mt



Fuente: Elaboración propia

Figura 52

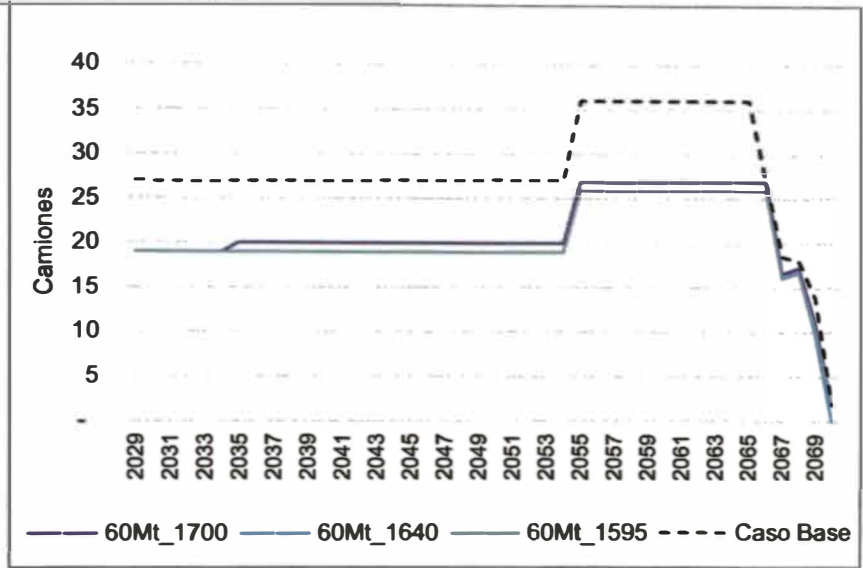
Perfil de camiones IPCC capacidad 50 Mt



Fuente: Elaboración propia

Figura 53

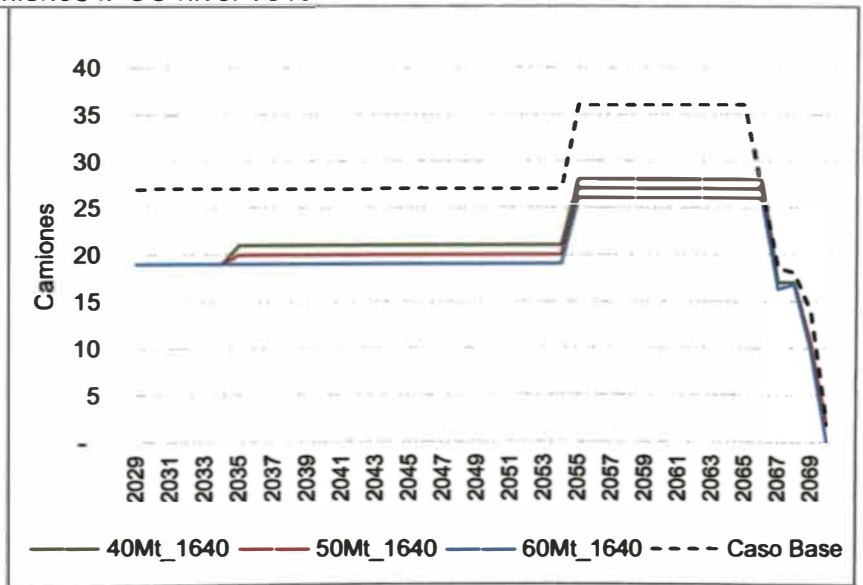
Perfil de camiones IPCC capacidad 60 Mt



Fuente: Elaboración propia

Figura 54

Perfil de camiones IPCC nivel 1640



Fuente: Elaboración propia

3.2.6 Etapa VI: Evaluación económica

En la presente etapa se estimó el Valor Presente Neto (NPV) a nivel estratégico para los 9 casos IPCC definidos en el árbol de opciones, además del caso base utilizando los mismos parámetros económicos para que puedan ser comparables.

Para la estimación del Capex y Opex de la tecnología IPCC, se realizó un benchmarking de otros estudios conceptuales de implementación de la tecnología IPCC

en minas de Perú, de esa forma se obtuvo valores válidos para este nivel de análisis. Los valores de Capex y Opex para el IPCC que se consideraron para este trabajo fueron los siguientes:

Tabla 6

Valores de Capex y Opex IPCC

Capacidad Chancador Inpit	Capex (M\$)	Opex (\$/t)
40 Mt	210	0.30
50 Mt	230	0.30
60 Mt	250	0.30

Fuente: Benchmarking IMSS

Capex de los Casos IPCC:

Para calcular el Capex se consideró principalmente 2 indicadores:

- Inversión del IPCC
- Inversión en compra de camiones (según perfil de requerimiento de cada caso, se asume que cada camión nuevo cuesta 6M\$).

La inversión para el chancador inpit se considera el año 2028, un año antes de su inicio en el plan minero (2029). El perfil de camiones fue obtenido de cada simulación determinística del transporte de materiales hecha en el software MineHaul.

Opex de los casos IPCC:

La estimación del costo de operación mina estuvo compuesta de los costos fijos: perforación, voladura, carguío, servicios auxiliares, sostenimiento; y del costo variable: transporte (incluyendo transporte de camiones y operación de la tecnología IPCC).

Los parámetros económicos utilizados en la mina en estudio fueron los siguientes:

Tabla 7

Costos unitarios de minado

Costos Unitarios de Minado		Unidad
Perforación	0.2	\$/t
Voladura	0.29	\$/t
Carguío	0.25	\$/t
Auxiliares	0.25	\$/t
Costo de Sostenimiento	0.25	\$/t
Costo Camiones mineros		
Costo de Combustible	0.88	\$/litro
Costo Horario de Camión	480	\$/hora
Costo Tecnologia IPCC		
Costo operativo IPCC	0.30	\$/t

Fuente: Mina en estudio

La estimación del costo de operación planta considera los parámetros económicos que detalla la Tabla 8.

Tabla 8

Costos unitarios de planta

Costos de Procesamiento		Unidad
Costo de Proceso	9.20	\$/t
G&A	2.70	\$/t

Fuente: Mina en estudio

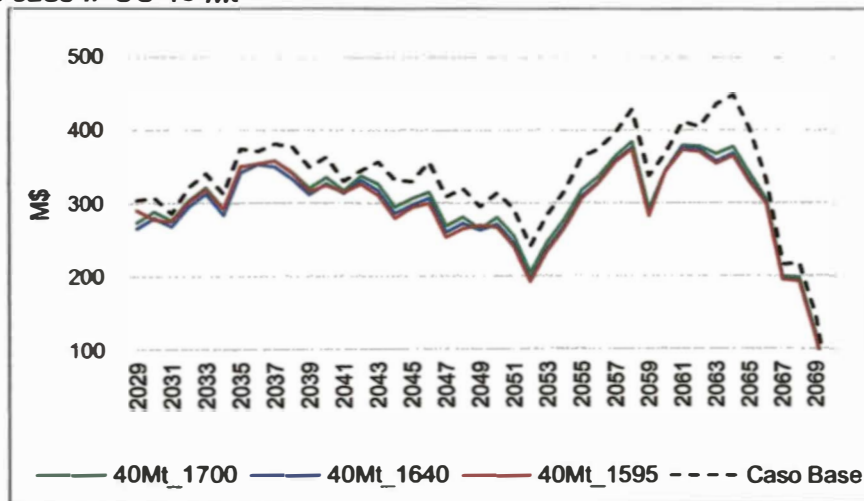
El costo de transporte de los casos IPCC es una combinación entre el costo de transporte por camiones y el costo de operación del IPCC, ya que el material que tiene como destino el chancador inpit es transportado por camiones y posteriormente la faja del chancador transporta el material al destino final (Botadero). Es importante mencionar que en los casos IPCC el mineral sigue siendo transportado por camiones hacia su destino final (Chancador o stocks) y no todo el desmonte es enviado al Chancador inpit, también hay material desmonte que es transportado por camiones hacia los botaderos. La principal diferencia es que en el caso base todo el material del tajo (mineral y desmonte) es transportado con camiones hasta su destino final.

Una vez calculado el costo de transporte de cada caso, procedemos a calcular el costo de minado adicionando los demás costos fijos (Perforación, voladura, carguío,

sostenimiento). La principal métrica para el presente trabajo es el costo de minado. Las Figuras siguientes muestran el costo de minado por periodo que fue calculado para cada caso IPCC por ubicación espacial y capacidad.

Figura 55

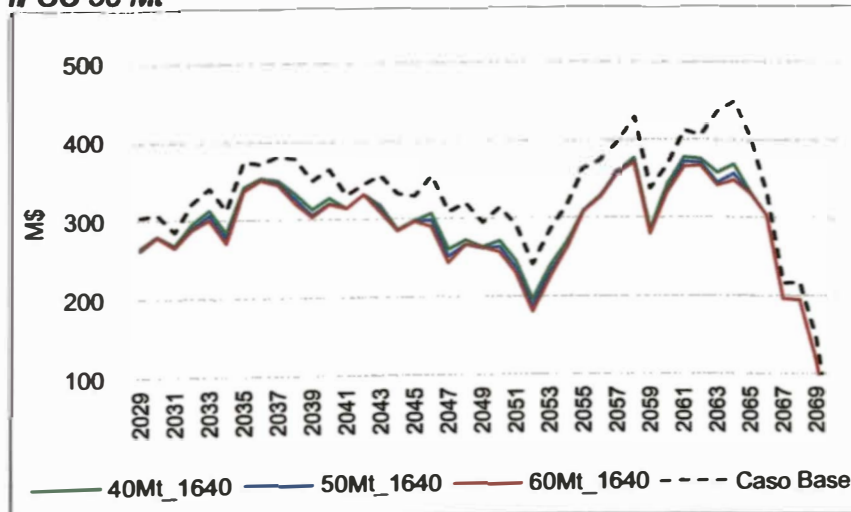
Costo mina caso IPCC 40 Mt



Fuente: Elaboración propia

Figura 56

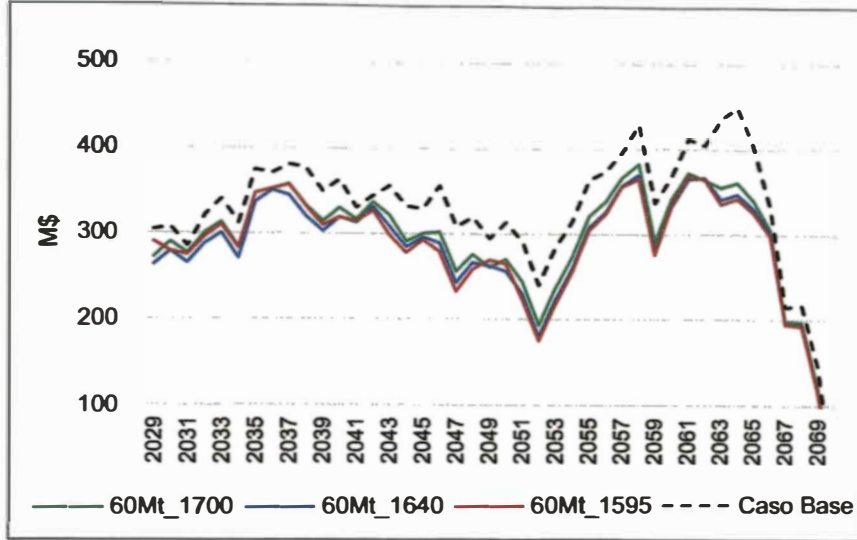
Costo mina IPCC 50 Mt



Fuente: Elaboración propia

Figura 57

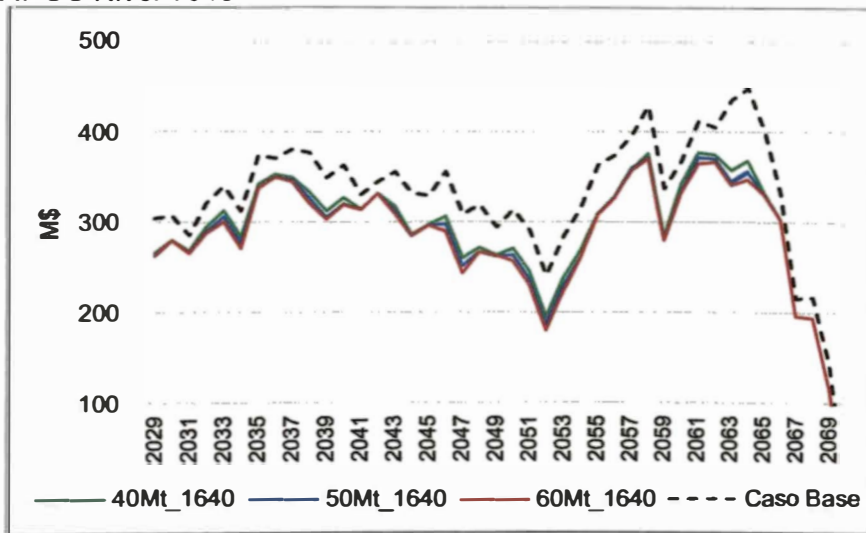
Costo mina IPCC 60 Mt



Fuente: Elaboración propia

Figura 58

Costo mina IPCC Nivel 1640



Fuente: Elaboración propia

En base a los ingresos, costos de capital, costos operativos de mina y planta se realizó el cálculo del valor presente neto (NPV) desde el año 2028 para poder comparar los diversos casos.

Las fórmulas utilizadas fueron las siguientes:

$$\text{Opex} = \text{Costo Operativo Mina} + \text{Costo Operativo Planta} \quad (\text{iii})$$

$$\text{Flujo de Caja} = \text{Ingresos} - \text{Opex} - \text{Capex} \quad (\text{iv})$$

La Tabla 9 muestra los valores obtenidos de NPV para cada caso con tecnología IPCC y además el caso base.

Tabla 9

Valor presente neto casos IPCC

Caso	NPV (M\$)
Caso base	2,616
40Mt_1700	2,681
40Mt_1640	2,759
40Mt_1595	2,718
50Mt_1700	2,689
50Mt_1640	2,782
50Mt_1595	2,729
60Mt_1700	2,684
60Mt_1640	2,786
60Mt_1595	2,729

Fuente: Elaboración propia

Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados

4.1 Costo de minado y consumo de combustible

En los casos IPCC, la reducción de las horas de trabajo y consumo de combustible de los camiones mineros lograron una disminución en el costo de transporte, generando una reducción importante en el costo de minado con respecto al caso base. Además, el costo operativo del chancador Inpit es menor que el costo de transporte con camiones y ese reemplazo genera una ventaja en la reducción de costo de minado. La Tabla 10 detalla el ahorro de horas camión, consumo de combustible y costo de minado para cada caso.

Tabla 10

Reducción de horas y combustible casos IPCC

Caso	Ahorro de Horas	Ahorro de Combustible	Reducción Costo de minado
40Mt_1700	18.6%	19.8%	9.2%
40Mt_1640	21.5%	23.0%	11.3%
40Mt_1595	21.2%	23.3%	11.4%
50Mt_1700	20.8%	22.2%	10.2%
50Mt_1640	24.0%	25.9%	12.6%
50Mt_1595	23.5%	26.1%	12.5%
60Mt_1700	22.0%	23.5%	10.5%
60Mt_1640	25.6%	27.3%	13.3%
60Mt_1595	24.9%	27.8%	13.2%

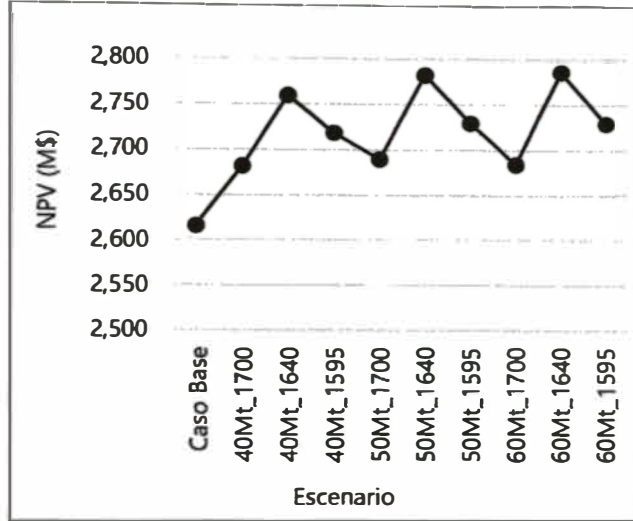
Fuente: Elaboración propia

Al realizar la comparación de valor presente neto, se obtuvo que los casos IPCC tienen un NPV mayor que el caso base, esto se debe a la reducción del costo de minado al tener menores distancias de transporte.

La Figura 59 y la Tabla 11 muestran la comparación e incremento del valor presente neto de los Casos IPCC con respecto al Caso base.

Figura 59

Valor presente neto casos IPCC



Fuente: Elaboración propia

Tabla 11

Incremento del valor presente neto casos IPCC

Caso	NPV (M\$)	Incremento
Caso Base	2,616	
40Mt_1700	2,681	2.5%
40Mt_1640	2,759	5.5%
40Mt_1595	2,718	3.9%
50Mt_1700	2,689	2.8%
50Mt_1640	2,782	6.3%
50Mt_1595	2,729	4.3%
60Mt_1700	2,684	2.6%
60Mt_1640	2,786	6.5%
60Mt_1595	2,729	4.3%

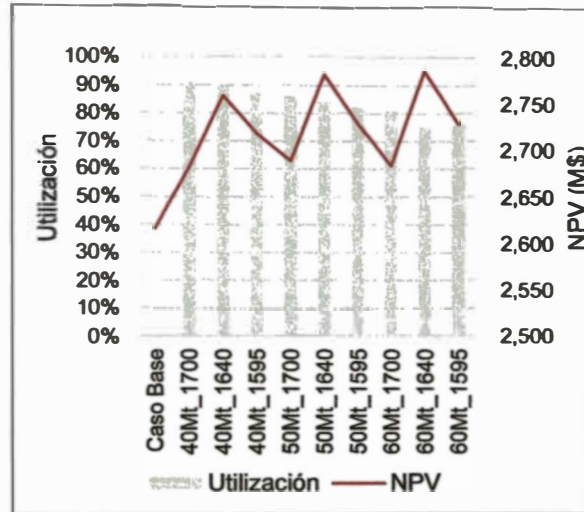
Fuente: Elaboración propia

Otro parámetro importante que evaluó es la utilización del chancador inpit. La

Figura 60 muestra la utilización y el NPV de todos los casos.

Figura 60

Utilización y NPV casos IPCC



Fuente Elaboración propia

Según solo el NPV, se pudo decidir que el caso ganador es el Caso 60 Mt_1640 porque tiene el mayor NPV, sin embargo, su utilización es una de las más bajas (75%). Finalmente, se eligió al Caso IPCC 50Mt_1640 como ganador porque obtuvo un NPV alto (Segundo lugar) y una utilización importante de 84%, la cual puede ser optimizada con un nuevo diseño de fases para ayudar a las rutas al IPCC.

El Caso IPCC 50Mt_1640 logró una reducción del 12.3 % en el costo de minado y un incremento del 6.3% en el NPV, además, logró una reducción del 26% en consumo de combustible con respecto al caso base.

Tabla 12

Incremento del valor presente neto Caso IPCC 50Mt_1640

Caso	NPV (M\$)
Caso Base	2,616
IPCC 50Mt_1640	2,782
Incremento	166
	6.3 %

Fuente: Elaboración propia

Prueba de hipótesis

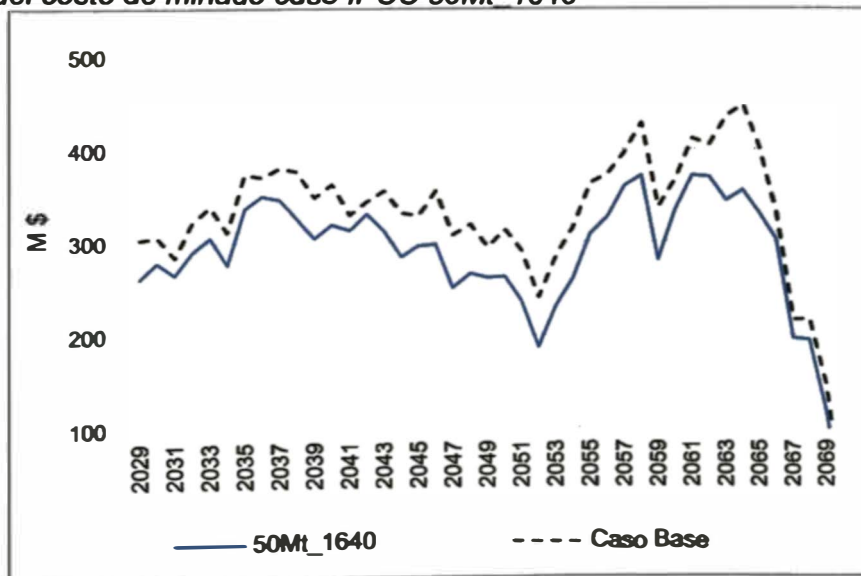
- Hipótesis Nula Ho: El valor presente neto del caso IPCC no reduce el costo de minado y no logra reducir el consumo de combustible.
- Hipótesis Alternativa: El valor presente neto del caso IPCC reduce el costo de minado y logra reducir el consumo de combustible.

El caso desarrollado (Caso IPCC 50 Mt_ Nv 1640), al tener menores distancias de transporte por la incorporación de un chancador inpit, logra reducir el costo de minado en un 12.3% y el consumo de combustible en un 26% según el análisis estratégico.

De acuerdo con los resultados obtenidos en la presente investigación, se valida la hipótesis alternativa y se descarta la hipótesis nula.

Figura 61

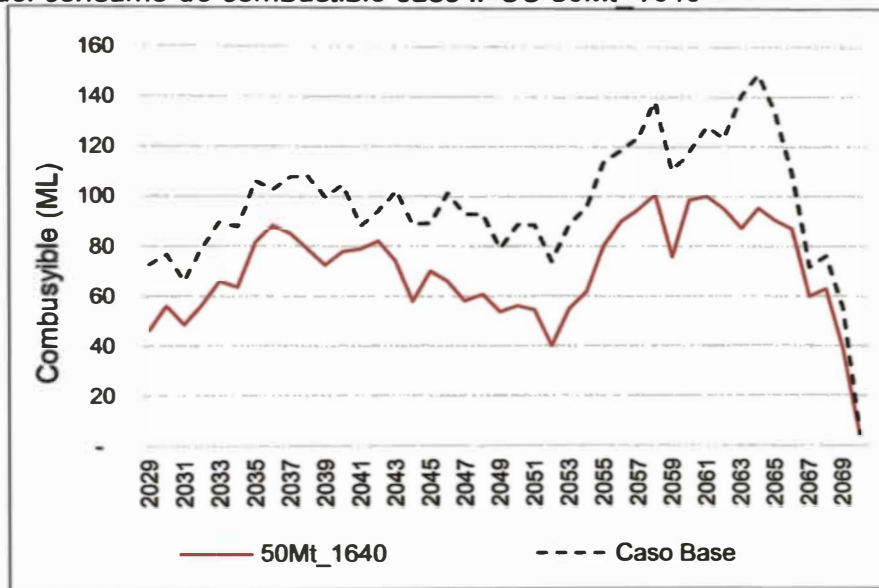
Reducción del costo de minado caso IPCC 50Mt_ 1640



Fuente: Elaboración propia

Figura 62

Reducción del consumo de combustible caso IPCC 50Mt 1640



Fuente: Elaboración propia

Conclusiones

Según el análisis estratégico realizado en el presente trabajo, el caso IPCC 50Mt_Nv.1640 incrementó el valor presente neto de la mina en estudio en un 6.3%, lo cual demuestra que el IPCC logra reducir el costo de minado y obtiene una ventaja económica respecto al caso base.

El caso IPCC 50Mt_Nv.1640 obtuvo una utilización de 84% según las corridas a este nivel estratégico, sin embargo, esto podría mejorar optimizando el diseño de fases para generar conexiones al IPCC, y así, incluso podría mejorar el valor presente neto.

Con la tecnología IPCC, la mina en estudio requiere menor cantidad de horas de trabajo de los camiones y menor consumo de combustible, lo cual representa un impacto ambiental positivo porque se emite menos CO₂ al ambiente y reduce la huella de carbono, este logro es importante porque hoy en día la industria minera busca reducir los niveles de contaminación y la tecnología IPCC ayuda a cumplir este objetivo.

El presente estudio está realizado a nivel estratégico en los planes de minado y estimación de equipos, principalmente se centra en la metodología para definir la ubicación, materiales, capacidad y periodo de implementación de la tecnología IPCC, puede ser mejorado en un nivel de detalle operativo, por ejemplo, realizar un diseño de fases a detalle conectando todas las rampas al IPCC al menos los 10 primeros años, realizar un diseño del chancador y la faja. Al tener resultados positivos, el estudio abre las puertas para pasar a un nivel de detalle mayor.

Recomendaciones

La tecnología IPCC idealmente debe ser evaluada en minas de vida extensa, ya que permite capturar el ahorro en Opex que justifique su Capex.

El Capex de la tecnología IPCC debe realizarse en un periodo cuando se tenga planificada una inversión en camiones, esta sinergia es clave para optimizar el valor del plan de minado considerando la tecnología IPCC.

El estudio despierta interés en siguientes análisis para optimizar la tecnología IPCC, por ejemplo, al tener un menor costo de minado, se puede realizar una nueva optimización de pit y el tajo sería más grande. Incluso, la ley de corte sería menor, incrementando el mineral y reduciendo el stripping ratio. Para ese caso, se debe realizar otra vez el ciclo de planificación a largo plazo y los resultados económicos podrían ser mejores.

Referencias bibliográficas

- Askari, H. (2020) Strategic Mine Planning & Optimization. [Lecture Notes, Mining Optimization Laboratory] University of Alberta.
<https://sites.ualberta.ca/~hooman/Short-Courses.htm>
- Hustrulid W., Kuchta M., Martin R. (2013), Open Pit Mine Planning & Design. (3a ed., Vol. 2). CRC Press. <https://www.routledge.com/Open-Pit-Mine-Planning-and-Design-Two-Volume-Set-CD-ROM-Pack/Hustrulid-Kuchta-Martin/p/book/9781466575127>
- Loli, W. (2016). Metodología de planificación a cielo abierto considerando incorporación de Inpit Crusher and Conveyors [Tesis de maestría, Universidad de Chile]. Repositorio Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/138826>
- Parra, A. (2015). Sistemas de Transportes en Minería a Cielo Abierto [Clase, Laboratorio de Planificación Minera Delphos Universidad de Chile]. Delphos. [https://delphoslab.cl/images/workshop/ppts/Sistemas de Transporte en Minería de Cielo Abierto.pdf](https://delphoslab.cl/images/workshop/ppts/Sistemas%20de%20Transporte%20en%20Mineria%20de%20Cielo%20Abierto.pdf)
- Soto, M. (2019). Evaluación de sistemas de transporte alternativos para minería a cielo abierto [Tesis de licenciatura, Universidad de Chile]. Repositorio Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/170932>
- Whittle, D. (2005), Strategic Mine Planning (8a ed). Research Gate. [https://www.researchgate.net/profile/David-Whittle/publication/272494349 Strategic Mine Planning/links/5c1192b7299bf139c7548042/Strategic-Mine-Planning.pdf](https://www.researchgate.net/profile/David-Whittle/publication/272494349_Strategic_Mine_Planning/links/5c1192b7299bf139c7548042/Strategic-Mine-Planning.pdf)

Anexos

Pág.

Anexo 1: Resultados de simulación de transporte para el Caso IPCC 50Mt_Nv 1640 1

Anexo 2: Plantilla estratégica de evaluación económica de Caso IPCC 50Mt Nv 1640..... 2

Anexo 1: Resultados de simulación de transporte para el Caso IPCC 50Mt_Nv 1640

Period	Balance	CRUSHER	Stock_Mg	Stock_Mg	Stock_Lg	Dist.ente	Ipcc
	<A>	<A>	<A>	<A>	<A>	<A>	<A>
	Total (M)	Total (M)	Total (M)	Total (M)	Total (M)	Total (M)	Total (M)
2028		37,000.0	1,501.3	4,894.2	6,497.5	65,612.8	
2029		37,000.0	6,133.1	6,747.1	8,667.2	6,522.2	50,000.0
2030		37,000.0	713.7	8,272.1	14,615.7	4,898.1	48,908.1
2031		37,000.0	3,835.2	7,589.5	6,186.6	14,486.9	46,312.0
2032		37,000.0	2,630.1	7,327.1	17,436.9	9,546.0	50,000.0
2033		37,000.0	650.3	3,973.8	8,050.9	23,875.2	50,000.0
2034		37,000.0		2,666.0	6,998.9	24,831.2	50,000.0
2035		37,000.0		2,213.9	11,144.8	22,166.4	48,738.3
2036		37,000.0		440.8	3,138.3	46,719.7	33,574.7
2037		37,000.0		840.9	1,798.3	32,587.5	50,000.0
2038		37,000.0		5,047.9	1,812.2	26,024.5	50,000.0
2039		37,000.0		13,937.3	4,116.7	9,629.0	50,000.0
2040		37,000.0	596.0	19,915.9	4,183.2	4,380.2	50,000.0
2041		37,000.0		6,508.1	1,441.2	55,529.6	15,790.5
2042		37,000.0		7,437.2	1,711.2	31,340.2	40,419.9
2043		37,000.0		4,231.7	1,800.0	24,915.3	50,000.0
2044		37,000.0		6,697.6	2,442.2	21,250.1	50,000.0
2045		37,000.0	164.9	4,693.9	1,348.8	52,701.9	20,009.5
2046		37,000.0	154.2	2,605.9	564.7	25,451.7	50,000.0
2047		37,000.0		7,605.2		17,962.4	50,000.0
2048		36,999.7		14,677.1		17,146.4	45,614.2
2049		36,999.9		8,586.0		11,823.0	50,000.0
2050		37,000.0		3,250.2		16,282.6	50,000.0
2051		37,000.0				24,468.2	50,000.0
2052		37,000.0				18,823.1	50,000.0
2053		37,000.0				17,301.5	50,000.0
2054		36,999.9				18,781.4	49,712.5
2055		37,000.0				25,509.1	38,727.4
2056		37,000.0		2,048.7		35,075.7	28,351.6
2057		37,000.0				26,883.8	50,000.0
2058		37,000.0				38,297.9	50,000.0
2059		37,000.0				47,559.1	35,839.2
2060		37,000.0				78,406.3	819.8
2061		37,000.0				47,043.1	34,577.0
2062		37,000.0				32,936.4	50,000.0
2063		37,000.0		3,070.5		31,426.0	50,000.0
2064		37,000.0		5,527.0		24,782.9	50,000.0
2065		37,000.0				16,087.6	50,000.0

Anexo 2: Plantilla estratégica de evaluación económica de Caso IPCC 50Mt Nv 1640.

Variable	Unidad	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036
1 Consumo de combustible	lt	65,702,684.70	46,194,473.30	55,892,410.50	48,444,092.70	56,481,646.20	65,896,856.80	64,557,495.30	67,620,935.40	68,543,648.30
2 Horas	hours	174,925.80	128,700.00	153,282.70	133,402.40	148,986.80	166,860.70	157,317.20	208,631.50	235,097.30
3 Ton al IPCC	lt	0	50,000.00	48,908.10	46,312.00	50,000.00	50,000.00	50,000.00	48,738.30	33,574.70
4 Numero de Camistas		19.9	14.7	17.5	15.2	17	19	18	23.8	26.8
Perfil de Camiones Caso IPCC		19	19	19	19	19	19	19	20	20
Costo Plan		192.91	205.45	184.83	162.15	168.43	164.51	168.12	177.39	182.26
Material Inviado		115,506,025	117,009,510	114,407,729	117,410,289	123,940,044	123,550,161	105,253,980	121,270,355	120,871,568
Material Movido		115,506,025	117,009,510	114,407,729	117,410,289	123,940,044	123,550,161	121,998,108	121,270,555	120,871,568
Desmonte al IPCC			90,000,000	48,908,100	46,312,000	50,000,000	50,000,000	50,000,000	48,738,300	33,574,700
Desmonte por Camistas			8,522,156	4,888,089	14,486,982	9,546,016	23,675,225	24,821,201	22,173,707	46,719,880
Costo de Acarreo										
Combustible	M \$	58	41	49	43	50	58	56	72	78
Costo Muerto	M \$	84	62	74	64	72	80	76	100	113
Handling Cost	M \$	141.78	102.44	122.70	106.05	121.21	138.06	131.43	171.93	190.74
IPCC Cost	M \$		15	15	14	15	15	15	15	10
Ingresos	M \$	1182	1282	1142	1002	1042	1022	1042	1102	1142
Costo Mina Fijo	M \$	143	145	142	148	154	153	131	150	150
Costo Mina variable (Handling)	M \$	142	117	137	121	136	153	146	187	201
Costo Mina Caso IPCC	M \$	285	263	279	266	290	306	277	337	351
Costo Planta	M \$	352	352	352	352	352	352	352	352	352
G&A	M \$	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Costo Rehabilita	M \$	0	0	0	0	0	0	10	0	0
Costo Operativo	M \$	-736	-714	-731	-718	-741	-758	-738	-788	-802
Costo de Capital	M \$	-230	0	0	0	0	0	-6	0	0
Flujo de Cash	M \$	216	568	412	284	301	264	298	314	340
Perfil de Caja Descontado										
NPV	M \$	2782.71								