



UAI
UNIVERSIDAD ADOLFO IBÁÑEZ



NORTE
ABIERTO

Análisis del impacto de la variación de parámetros de diseño y económicos en la optimización del pit final del depósito Casale

Informe Final

Titulación Ingeniería Civil en Minas

Víctor Parra

Supervisor: Felipe Bernal

Profesor guía: Alberto Inostroza

1.0	INTRODUCCIÓN	5
1.1	Contexto de la Empresa	5
1.2	Origen de la oportunidad	6
1.3	Oportunidad Detectada	8
2.0	OBJETIVOS	8
2.1	Objetivo General	8
2.2	Objetivos Específicos	9
3.0	ESTADO DEL ARTE	9
3.1	Antecedentes Teóricos.....	9
3.1.1	Planificación Minera a Rajo Abierto	9
3.1.2	Optimización del Pit Final	10
3.1.3	Algoritmos utilizados	12
4.0	MATRIZ DE RIESGO	14
5.0	METODOLOGÍAS	15
6.0	MEDIDAS DE DESEMPEÑO	16
7.0	PLANIFICACIÓN	18
8.0	DESARROLLO DEL PROYECTO	19
8.1	Exploración del modelo de bloques	19
8.2	Construcción de variables para optimización.....	24
8.3	Simulación de la optimización del Caso Base	29
8.4	Optimización de Cerro Casale 2023	33
8.5	Comparación Caso Base con Caso Proyecto.....	36
9.0	RESULTADOS CUALITATIVOS Y CUANTITATIVOS	38
10.0	CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN	41
11.0	REFERENCIAS.....	42
12.0	ANEXOS.....	43

Resumen Ejecutivo

El presente informe describe un proyecto de titulación asociado a la ingeniería en minas para la Universidad Adolfo Ibáñez llevado a cabo en Norte Abierto, un proyecto minero que trabaja con el depósito Cerro Casale, ubicado a 187 km de Copiapó, el cual está compuesto de oro, plata y cobre. Además, el proyecto se encuentra finalizando la etapa conceptual y preparándose para la prefactibilidad.

Actualmente, en la empresa cambiaron algunas variables críticas en cuanto a la optimización del pit de Cerro Casale, donde luego de una campaña de sondeos en el año 2018 y un nuevo estudio geotécnico se recomendó un aumento en los ángulos inter-rampa del pit. También, aumentaron los precios de los metales que componen el yacimiento y las recuperaciones metalúrgicas sufrieron una disminución importante.

A partir de las variaciones mencionadas previamente, este proyecto se centró en la evaluación de las nuevas variables de entrada económicas y de diseño en la optimización del pit de Cerro Casale para así poder entregar las bases a la empresa para tomar la decisión de rediseñar las fases operativas del pit. Para ello se calculó las diferencias entre el pit del caso base con el pit generado por este proyecto. La optimización del yacimiento se realizó mediante el software Vulcan, herramienta minera 3D, donde se utilizó el algoritmo de Lerchs-Grossmann.

Los resultados finales obtenidos por la optimización derivaron en la toma de decisión a favor de rediseñar las fases operativas de Cerro Casale por parte de Norte Abierto, donde aumentó la cantidad de mineral a extraer en 399 Mt, la razón estéril-mineral disminuyó en un 19% y el valor descontado del pit en el mejor caso aumentó en 162 MUSD.

Abstract

This report describes a degree project associated with mining engineering for the Adolfo Ibáñez University carried out in Norte Abierto, a mining project that works with the Cerro Casale deposit, located 187 km from Copiapó, which is composed of gold, silver and copper. In addition, the project is completing the conceptual stage and preparing for pre-feasibility.

Currently, some critical variables have changed in the company regarding the optimization of the Cerro Casale pit, where after a drilling campaign in 2018 and a new geotechnical study, an increase in the inter-ramp angles of the pit was recommended. Also, the prices of the metals that make up the deposit increased and metallurgical recoveries suffered a significant decrease.

Based on the variations mentioned above, this project focuses on the evaluation of the new economic and design input variables in the optimization of the Cerro Casale well in order to provide the bases to the company to make the decision to redesign the operations phases. To do this, the differences between the base case and the case generated by this project were calculated. The optimization of the deposit was carried out using the Vulcan software, a 3D mining tool, where the Lerchs-Grossmann algorithm was used.

The final results obtained by the optimization led to the decision being made in favor of redesigning the operational phases of Cerro Casale by Norte Abierto, where the amount of ore to be extracted increased by 399 Mt, the waste-mineral ratio decreased by 19 % and the discounted value of the pit in the best case increased by 162 MUSD.

1.0 Introducción

1.1 Contexto de la Empresa

Norte Abierto es un proyecto minero ubicado en la Región de Atacama el cual se formó en 2017 tras el joint venture entre las empresas Newmont Mining Corporation y Barrick para el desarrollo del proyecto Casale y Caspiche principalmente, además de otros yacimientos de interés emplazados en la comuna de Tierra Amarilla, una ciudad y comuna del Norte Chico de Chile ubicada a 15 kilómetros de Copiapó, como Cerro Catedral, Jotabeche, Román, entre otros. Los yacimientos principales (Casale y Caspiche) son depósitos pórfidos de oro y cobre se encuentran a una distancia de Copiapó de 187 km y 179 km respectivamente.

Ambos depósitos se ubican en el subdistrito Aldebarán de la Franja Volcánica de Maricunga, la distancia entre ellos hay 12 km en línea recta. El cordón de Maricunga está formado por una serie de rocas volcánicas que se extienden 200 km a lo largo de la cresta occidental de los Andes. Las rocas volcánicas albergan múltiples depósitos epitermales de oro y pórfidos de oro y cobre como Cerro Casale, Maricunga, Lobo Marte y La Coipa, así como muchos otros prospectos minerales más pequeños. Algunos de estos depósitos pueden observarse en la siguiente figura:

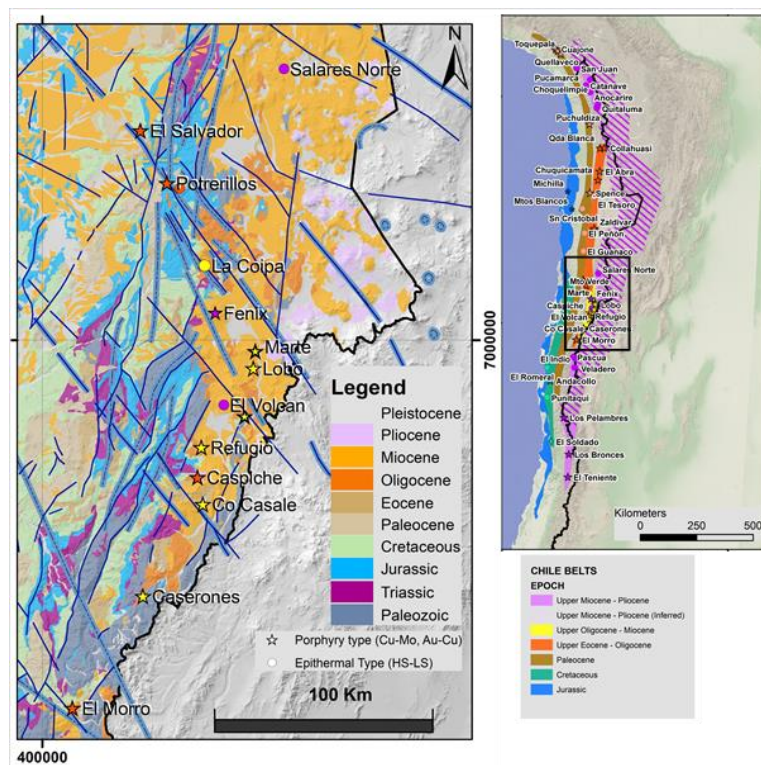


Figura 1. Cordón de Maricunga

Finalmente, agregar que Norte Abierto se encuentra realizando las preparaciones para entrar a la etapa de estudio de prefactibilidad o Fase 2 A ¹ luego de terminar con el estudio conceptual o Fase 1.

1.2 Origen de la oportunidad

Antes de comenzar con el origen de la oportunidad es necesario conocer el área en donde se desarrollará este proyecto. Dentro de las áreas de la minería existentes, este proyecto se desarrolla en el área de planificación minera, específicamente en la optimización de pit, donde se centra la oportunidad detectada.

Esta nace de la variación de los parámetros que influyen en la optimización de pit de Cerro Casale, por un lado, en cuanto a los parámetros de diseño, existe una variación de los ángulos inter-rampa del pit, debido a un estudio geotécnico realizado en el 2021, el cual trajo como resultado una mejora en la calidad de la roca y la reducción de las zonas geotécnicas de 14 a 7, luego de un proceso de clusterización² donde se homogeneizó al macizo rocoso en zonas con características geotécnicas similares, lo cual se presenta a continuación:

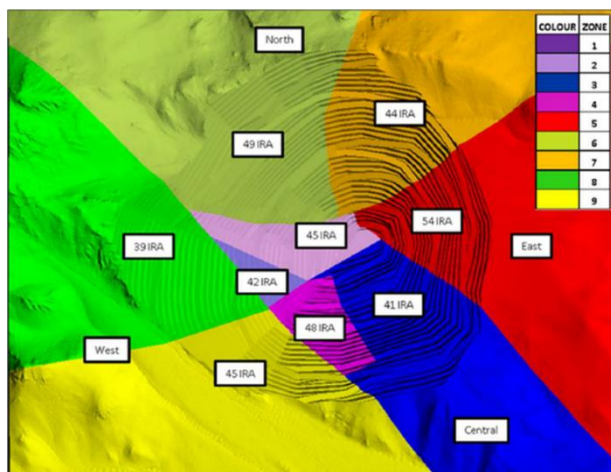


Figura 2. Zonas Geotécnicas 2011

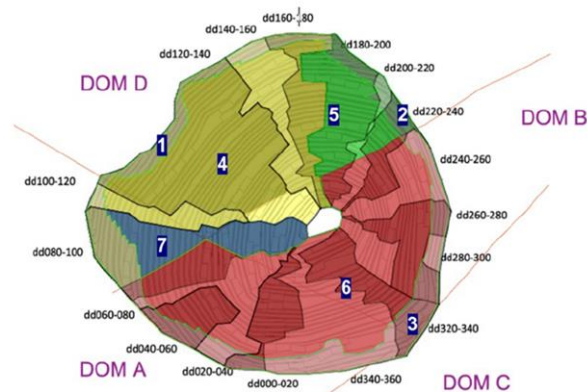


Figura 3. Zonas de Diseño Nuevas³

¹ Fase 2 A es una terminología propia de Newmont para referirse a un proyecto en etapa de prefactibilidad que incluye costos clase 4, precisión de -10%-40% y contingencia de 20%-30%

² Categorizar el macizo rocoso de zonas con características geotécnicas similares

³ Información extraída de estudio geotécnico realizado por Golder para Norte Abierto

Previos	
Sector	IRA°
0	39
1	42
2	45
3	41
4	48
5	54
6	49
7	44
8	39
9	45
10	51
11	48
12	49
13	44
14	47

Tabla 1. Ángulos IRA° previos

Nuevos	
Sector	IRA°
1	37
2	40
3	53
4	46
5	49
6	53
7	49

Tabla 2. Ángulos IRA° actuales

Por el otro lado, hubo una variación de los parámetros económicos de la optimización del pit de Cerro Casale , donde:

Los precios de los commodities presentes en el depósito Casale tuvieron las siguientes variaciones:

Mineral	Unidad	Precio (2020)	Precio Reserva (2023)
Au	USD/oz	\$1,250	\$1,400
Ag	USD/oz	\$16	\$20
Cu	USD/lb	\$2.75	\$3.5

Tabla 3. Precio Metales

Mientras que, las recuperaciones metalúrgicas disminuyeron, como se muestra a continuación:

Metal	Recuperaciones previas flotación	
	%	
Au	%	77
Ag	%	81
Cu	%	92

Metal	Recuperaciones previas lixiviación	
	%	
Au	%	77
Ag	%	28
Cu	%	0

Metal	Recuperaciones nuevas flotación	
	%	
Au	%	70
Ag	%	28
Cu	%	86

Metal	Recuperaciones nuevas lixiviación	
	%	
Au	%	60
Ag	%	24
Cu	%	10

Tabla 4. Recuperaciones previas y actuales ⁴

⁴ Información obtenida del capítulo de minería de Norte Abierto y de la guía económica de Newmont.

1.3 Oportunidad Detectada

Podemos observar en base a la información descrita previamente, que actualmente en Norte Abierto variaron parámetros críticos en relación con la optimización del pit. Por un lado, en cuanto a los parámetros de diseño, existe un aumento importante en los ángulos inter-rampa, por ejemplo, para el sector 6 (Figura 3) que abarca la mitad del pit hubo un aumento a 53.

Por el otro lado, los parámetros económicos como el precio de los metales y las recuperaciones de igual forma han tenido variaciones. En el caso de los precios estos aumentaron en todos los metales y en el caso de las recuperaciones estas disminuyeron considerablemente.

Por lo tanto, al tener en consideración las variaciones expuestas anteriormente en parámetros críticos de la optimización del rajo, esto genera una gran oportunidad para el proyecto Norte Abierto de realizar un análisis de sensibilidad y evaluar el impacto en el valor asociado a la envolvente económica final del pit. De este trabajo se espera que el nuevo pit a generar proyecte una disminución de la razón estéril mineral, un aumento del valor descontado del pit y un aumento en la cantidad de mineral a extraer

2.0 Objetivos

2.1 Objetivo General

Evaluar y analizar la sensibilidad del valor de la envolvente económica⁵ del pit de Cerro Casale ante variaciones de parámetros técnico-económicos y de estabilidad de taludes, para tomar la decisión de rediseño de las fases de operación.

⁵ La envolvente económica es aquella que define los límites físicos del pit de un yacimiento

2.2 Objetivos Específicos

1. Explorar y analizar la información base del modelo de bloques de Cerro Casale (visualización de variables, tonelajes, leyes medias, curvas tonelaje-lei)
2. Determinar y construir las variables necesarias en el modelo de bloques para generar la optimización de pit.
3. Optimizar volumen de extracción del depósito según costos, recuperaciones, precio y ángulos de talud.
4. Analizar resultados comparando el Caso Base (etapa conceptual) con los nuevos resultados obtenidos y tomar la decisión de rediseñar las fases de operación.

3.0 Estado del Arte

3.1 Antecedentes Teóricos

3.1.1 Planificación Minera a Rajo Abierto

La planificación económica de una mina a rajo abierto tiene como objetivos, en primer lugar, la estimación de la máxima reserva potencial de mineral explotable, y en segundo lugar, la determinación del programa de explotación más económico de dicha reserva mineral. Para obtener la máxima reserva explotable se debe generar la forma geométrica óptima del rajo, el cual está definido por la configuración del cuerpo mineralizado, la distribución de los elementos dentro de él, la topografía y los ángulos de talud. Finalmente, el programa de explotación nos brinda la forma más rentable de extraer las reservas minerales contenidas dentro del rajo óptimo, donde la razón estéril-mineral es sumamente importante ya que controla la economía del programa de explotación (Bernal, 2013).

3.1.2 Optimización del Pit Final

La optimización del pit es el proceso mediante el cual se determina que cantidad de material vamos a extraer en la explotación de un determinado yacimiento y cuál será la secuencia en la que se va a extraer el material de forma que entregue las mejores ganancias financieras. Por lo tanto, el pit óptimo es aquella envolvente que encierra el valor económico más alto del depósito. Es sumamente importante definir correctamente esta envolvente económica ya que esta entrega la base sobre la cual se genera un plan minero que transforme los recursos a extraer del depósito en la mejor estrategia productiva para el inversionista (Miranda, 2017).

Para esto, es necesario contar con un modelo de bloques, el cual es una representación de todo el yacimiento dividido en bloques de igual tamaño, este se visualiza normalmente en softwares mineros 3D. (Minería Chilena, 2012). Cada bloque de este modelo contiene información sobre el yacimiento (basado en sondajes, estudios geológicos, estudios geotécnicos, entre otros), necesaria para realizar una optimización del rajo. Esta información se resume en los siguientes parámetros:

- Precio del metal
- Costo de extracción (C_m)
- Costo de procesamiento (C_p)
- Costo de comercialización (C_v)
- Ley del metal
- Recuperación Metalúrgica (Rec)
- Topografía
- Ángulos de talud

El primer paso para la optimización de un pit es generar un modelo económico que refleje la interacción de todos los procesos productivos que sean necesarios de ejecutar para obtener un beneficio económico de la explotación minera (minería, procesamiento y comercialización). Este beneficio se obtiene para cada bloque donde el valor económico de cada uno de esos se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$Beneficio = T * \{Ley * Rec * (Precio - C_v) - C_p\} - T * C_m$$

Donde T es el tonelaje de material.

Por lo tanto, para que un bloque sea extraído debe tener un beneficio positivo y además pagar la extracción de todos los bloques que están por sobre él y no hayan sido extraídos anteriormente. Agregar

que un bloque negativo no significa que no será extraído debido a que puede haber uno más profundo que pague por este. Luego, el valor del diseño del pit será entonces la sumatoria del beneficio de los bloques obtenidos dentro de él.

Próximamente toda la información del modelo de bloques se procesa por un software minero como el Vulcan para la determinación de la envolvente máxima, estos programas se basan en la aplicación de algoritmos como el Cono Móvil Flotante o Lerchs-Grossman. De igual forma el software debe recibir información de estabilidad (ángulos de talud) y tasa de procesamiento. Luego, el programa hace un recorrido por todos los bloques comparando el beneficio de cada uno de ellos para generar y entregar la envolvente final del rajo que maximice el valor económico del depósito. Además, se genera un proceso iterativo donde para ponderador un llamado Revenue Factor, se generan distintas envolventes según el precio del metal, el resultado de este proceso son los llamados pits anidados.

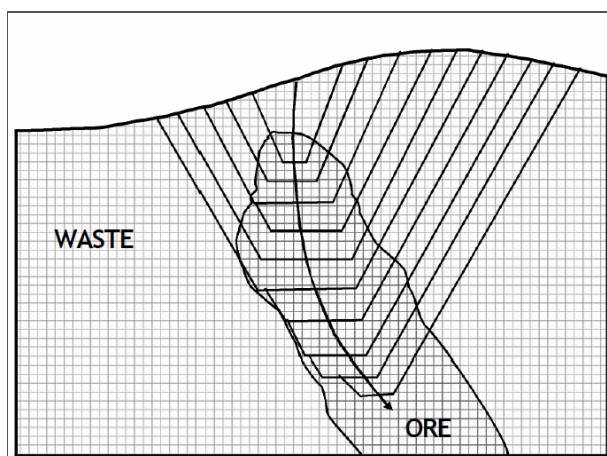


Figura 4. Pits Anidados⁶

En la figura podemos ver una curva que corta los pits anidados, esta se llama Tendencia Direccional Óptima de Explotación, y como dice su nombre, es la forma óptima de explotar el yacimiento.

De igual forma, hay que agregar la llamada ley de corte, esta discrimina entre que es considerado mineral y estéril y se obtiene igualando la ecuación de beneficio a cero, de donde se obtiene la siguiente expresión:

$$\text{Ley de Corte} = \frac{C_m - C_p}{\text{Rec} * (P - C_v)}$$

Donde, por ejemplo, un aumento en el precio del metal generaría una disminución de la ley de corte, esto debido a que con precios altos lo que era considerado estéril ahora puede ser considerado mineral y entregar un beneficio extra a la empresa. Agregar que, dependiendo de la cantidad de metales y procesos

⁶ Imagen extraída de material de Norte Abierto

para recuperarlo, se obtendrán distintas fórmulas para la ley de corte. Por ejemplo, cuando existe multielemento y multiproceso, se utiliza el concepto **del NSR de corte (“Net Smelter Return”)** el cual se **define como el mínimo valor que debe tener el concentrado producido de forma que pague todo el proceso de producción de este y sea considerado mineral**, el cual es importante conocer para este proyecto.

Finalmente, se lleva a cabo una evaluación económica, donde el software genera los llamados Caso Óptimo y Caso Peor, la primera es la estrategia que entrega la recuperación más pronta de las leyes altas, mientras que la segunda representa una explotación banco a banco. Por lo tanto, el caso real para un determinado yacimiento de encuentra entre ambos casos, y es pertinente realizar un análisis para encontrar determinado punto óptimo (Minería Chilena, 2012).

3.1.3 Algoritmos utilizados

3.1.3.1 Cono Móvil Flotante

Este método fue desarrollado en Kennecott Copper Corporation a principios de la década de 1960 y fue el primer intento computarizado de optimización de pit, que requirió un modelo de bloques tridimensional del depósito mineral. El modelo de bloques es analizado mediante la construcción de una forma cónica en dirección inversa y moviendo su vértice de un bloque de mena a otro. La forma del cono es definida de manera tal que esté conforme con las restricciones de pendiente de talud de diseño del pit en las distintas áreas del depósito. El computador es utilizado en la generación de los conos 3D y en el cálculo del valor neto de cada cono, mediante la suma de los valores de todos los bloques de mena y estéril encerrados dentro del cono. Finalmente, un límite 3D del pit es obtenido mediante la estructura global de todos los conos invertidos (Nube Minera, 2020). Agregar igualmente que este método genera un pit óptimo para un solo precio y su análisis es por máximo beneficio sin dar orientación al perfil de costos en la definición de las expansiones (Minero, 2006).

3.1.3.2 Lerchs-Grossman

Este algoritmo de programación dinámica opera tomando una sección transversal 2D de un modelo de bloques y las restricciones de ángulo de pared final definidas. El algoritmo procede calculando la suma de la columna de valores originales de bloques para cada bloque. Este valor de la suma de la columna representa un valor acumulativo, realizando una extracción de una sola columna vertical, desde la parte de arriba del modelo de bloques para cada bloque individual. A continuación, se asigna columna-por-columna iniciando desde cualquier punto final de una columna de la sección transversal, un valor de pit representando el máximo valor del pit potencial 2D es computado para cada bloque.

Este valor de pit es calculado de la suma de los valores de los bloques de la columna, y el valor predeterminado del pit de un bloque adyacente a la columna previa. Este nuevo valor es la contribución máxima posible del inicial fin de columna para la columna que contiene tal bloque para cualquier pit 2D posible que contiene el bloque en su contorno. Una flecha se usa para indicar el bloque adyacente que proporciona el máximo valor para calcular el valor del pit de un bloque en particular. El límite final del pit es entonces determinado al trazar hacia atrás las flechas obtenidas desde el bloque en el nivel superior que tiene el máximo valor de pit. (Vallejo García, Baquero Chiquiza, & Sepúlveda, 2010)

3.1.3.3 Comparativa

Podemos concluir que el algoritmo de Lerchs-Grossman es superior al de cono flotante por las siguientes razones:

- Lerchs-Grossman tiene un fundamento matemático, la programación dinámica, caso contrario del cono flotante, lo cual lo hace menos exacto que el primero.
- El algoritmo del cono flotante es más restrictivo que Lerchs-Grossman, esto debido a que no opera correctamente con yacimientos de distribuciones irregulares (Vallejo, 2010). Esto lo argumenta en base a los resultados que obtuvo al obtener el pit final de una mina teórica con ambos algoritmos, donde obtuvo que Lerchs-Grossmann selecciona más bloques útiles obtiene un VPN altamente superior (Figura 7).

Tabla 1. Datos arrojados por la macro UPL para el algoritmo de Lerchs-Grossmann

Lerchs-Grossmann UPL	
Bloques Útiles	8513
VPN (COP)	\$134.063.653.616

Tabla 2. Datos arrojados por la macro UPL para el algoritmo del cono flotante.

Cono flotante UPL	
Bloques Útiles	7820
VPN (COP)	\$93.532.092.326

Figura 5. Comparativa algoritmos

- El algoritmo del cono flotante limita la determinación del pit debido a que utiliza solamente un ángulo de talud.

Por lo tanto, para optimizar el pit de Cerro Casale se utilizará el algoritmo de Lerchs-Grossman.

4.0 Matriz de riesgo

Se realizó una matriz de riesgo que mida el impacto de ciertos eventos en la implementación o desarrollo del proyecto, los cuales son:

1. Retraso del desarrollo del proyecto por problemas con el software Vulcan.
2. Errores por parte del personal en la utilización del software
3. Falla en la utilización de la información dispuesta por la empresa.
4. Variación en parámetros de optimización durante el desarrollo del proyecto.
5. Cierre del proyecto.

El nivel de criticidad de cada situación se mide con la siguiente tabla:

Matriz de Riesgo		Probabilidad				
		Raro	Poco Probable	Moderado	Probable	Casi Seguro
Impacto		1	2	3	4	5
Muy bajo	1	1	2	3	4	5
Bajo	2	2	4	6	8	10
Moderado	3	3	6	9	12	15
Alto	4	4	8	12	16	20
Muy Alto	5	5	10	15	20	25

Tabla 5. Tabla Criticidad

Donde, los colores representan el nivel de riesgo, desde un nivel bajo (verde) a un nivel alto (rojo). Por lo tanto, se define el riesgo de la siguiente manera:

Riesgo Identificado	Impacto	Probabilidad	Valor	Nivel de Riesgo	Mitigación
Retraso del desarrollo del proyecto por problemas con el software Vulcan	5	2	10	Medio	Consultar lo antes posible con personal capacitado sobre posibles fallas del software
Errores por parte del personal en la utilización del software	3	3	9	Medio	Llevar a cabo una capacitación óptima previa al desarrollo del proyecto
Falla en la utilización de la información dispuesta por la empresa	4	2	8	Medio	Generar un documento donde se resuma la información necesaria
Variación en parámetros de optimización durante el desarrollo del proyecto	4	1	4	Bajo	Investigar o consultar previamente a la empresa sobre posibles variaciones
Cierre del proyecto	5	1	5	Medio	No existe mitigación para este riesgo

Tabla 6. Matriz de Riesgo

En base a la matriz, podemos observar que no existen grandes riesgos para el desarrollo del proyecto, sin embargo, es pertinente estar al tanto de ellos y llevar a cabo las mitigaciones.

5.0 Metodologías

De acuerdo con los objetivos planteados anteriormente, se detallarán las metodologías pertinentes para desarrollar cada uno ellos:

5.1. Objetivo Específico 1

Para ello primero será necesario realizar una capacitación sobre el software Maptek Vulcan. Dentro de las funciones a aprender se encuentra visualizar el modelo de bloques, generar leyendas para cada variable, ubicar respecto a determinada variable obteniendo reportajes de tonelaje y creación de curvas tonelaje-ley.

5.2. Objetivo Específico 2

Una vez se valore el modelo de bloques, será necesario construir las variables con las cuales se va a intervenir el modelo de bloques. Estas variables son todas aquellas que son clave para poder llevar a cabo la optimización del pit de Cerro Casale. Estas se obtendrán mediante cálculos pertinentes para cada una de ellas, definiciones simples o mediante la formulación de script de programación.

5.3. Objetivo Específico 3

Una vez intervenido el modelo de bloques con las variables de interés construidas, se deberá obtener el pit óptimo con el software Vulcan mediante la herramienta “pit optimiser”, en la cual se utilizará el algoritmo de Lerchs-Grossmann para generar los pits anidados, esto debido a su ventaja sobre otros algoritmos y ser utilizado por Norte Abierto. Agregar que, previamente se simulará el caso base del proyecto para generar una comparación más directa posteriormente.

5.4. Objetivo Específico 4

Para ello, se llevará a cabo un análisis comparando los nuevos resultados con los parámetros del Caso Base, es decir, observar variaciones en la cantidad de mineral, razón estéril-mineral, valor descontado del pit, entre otros, y en base a ellos tomar la decisión de rediseñar el pit.

6.0 Medidas de Desempeño

Objetivo Específico 1

6.1. La medida de desempeño para este objetivo será del tipo binaria, la cual mida si se realiza o no el análisis de la información del modelo de bloques. Lo cual se representa de la siguiente manera:

$$W = \frac{\sum_{i=1}^4 X_i}{4} \cdot 100\%$$

$$X_i = \begin{cases} 1, & \text{si se cumple con analizar la información} \\ 0, & \text{caso contrario} \end{cases}$$

Donde $i = \{\text{visualización de variables, tonelaje, leyes medias, leyes de corte, curvas tonelaje – ley}\}$

Se espera que W sea igual a 100%.

Objetivo Específico 2

6.2. Para este caso aplica de igualmente una medida de desempeño binaria, donde se mida si se construyeron las variables para poder optimizar el pit. Lo cual se representa de la siguiente manera:

$$Z = X \cdot 100\%$$

$$X = \begin{cases} 1, & \text{si se contruyen las variables} \\ 0, & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

Por lo tanto, Z debe ser igual a 100%.

Objetivo Específico 3

6.3. Para este objetivo específico se presentan las siguientes medidas de desempeño:

- Cantidad de mineral:
 - Que proyecte un aumento del 25% en cantidad de mineral total

- Valor descontado del pit

$$VPN = \sum \frac{Ingresos - Costos}{(1 + tasa\ de\ descuento)^n}$$

- Que proyecte un aumento en el valor descontado en un 2%

- Razón estéril-mineral

$$Razón \frac{E}{M} = \frac{toneladas\ de\ estéril}{toneladas\ de\ mineral}$$

- Que proyecte una disminución del 15%

Objetivo Específico 4

6.4. Para este objetivo específico se plantea la siguiente medida de desempeño:

$$Y = X * 100\%$$

$$X = \begin{cases} 1, si\ se\ toma\ la\ decisión\ de\ rediseñar\ el\ pit \\ 0, caso\ contrario \end{cases}$$

Se espera que Y sea igual a 100% al final del proyecto.

7.0 Planificación

De forma de llevar un orden cronológico del proyecto se desarrolló una carta Gantt que contiene todas las actividades relevantes a desarrollar y su respectiva fecha. Dentro de estas actividades encontramos inducciones realizadas al ingresar a la empresa, aprendizajes sobre estudios de la empresa y aquellas relacionadas al cumplimiento del proyecto (Tabla 7).

			Junio			Julio			Agosto				Septiembre				Octubre				Noviembre				Diciembre					
Actividad	Inicio	Final	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
Inducción HSEC	4	5																												
Inducción Código de Conducta	4	5																												
Inducción Recursos Humanos	4	5																												
Inducción Sustentabilidad	4	5																												
Realización cursos ACHS	5	7																												
Refresco Técnico	5	8																												
Estudio Caso de Negocio NA	7	11																												
Estudio Geología NA	7	11																												
Estudio Metalurgia NA	7	11																												
Estudio Proceso Minero NA	7	11																												
Estudio Reservas/Recursos NA	7	11																												
Estudio OPEX/CAPEX	7	11																												
Levantamiento Información	10	12																												
Lectura nuevo modelo Geotech	10	12																												
Aprendizaje software Vulcan	10	16																												
Formulación oportunidad	11	13																												
Definición del Proyecto	11	13																												
Definición Objetivo General y Específicos	11	13																												
Definición Metodologías	13	14																												
Definición medidas de desempeño	13	14																												
Estado del Arte	14	16																												
Analizar información modelo de bloques	17	18																												
Construir variables necesarias para la optimización	17	18																												
Optimizar volumen de extracción	19	20																												
Comparación resultados con caso base	19	20																												
Generar informe de recomendaciones de diseño minero	21	22																												
Presentación final en la empresa	23	24																												

Tabla 7. Carta Gantt

8.0 Desarrollo del proyecto

8.1 Exploración del modelo de bloques

En primer lugar, en cuánto al modelo de bloques este tiene las siguientes especificaciones:

- Número de bloques: 3,185,312 de bloques
- Tamaño de un bloque: 25m x 25m x 15m

En segundo lugar, la exploración del modelo bloques inicia observando las variables de origen que fueron entregadas por la empresa, para las cuales se hicieron leyendas y vistas transversales para observar su disposición en el modelo con la herramienta “*legend editor*” (**Anexo A**), algunos ejemplos son:

- **Ley de oro**

Esta variable en el modelo tiene el nombre de “*au_ppm*” y se puede observar en la siguiente figura:



Figura 6. Plano Ley de Oro

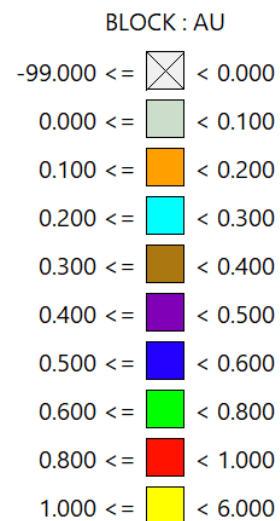


Figura 7. Leyenda Oro

A simple vista ya se genera una idea de cómo están distribuidas las leyes, donde las más altas se encuentran al centro del depósito, justo por donde se encuentran los intrusivos por donde subieron los flujos hidrotermales. A la derecha de la figura se encuentra la leyenda generada para visualizar las leyes de oro, medidas en gramos/tonelada, presentes en el depósito.

- **Ley de cobre**

Esta variable tiene el nombre de “cue_pct” en el modelo de bloques y puede visualizarse en la siguiente figura:

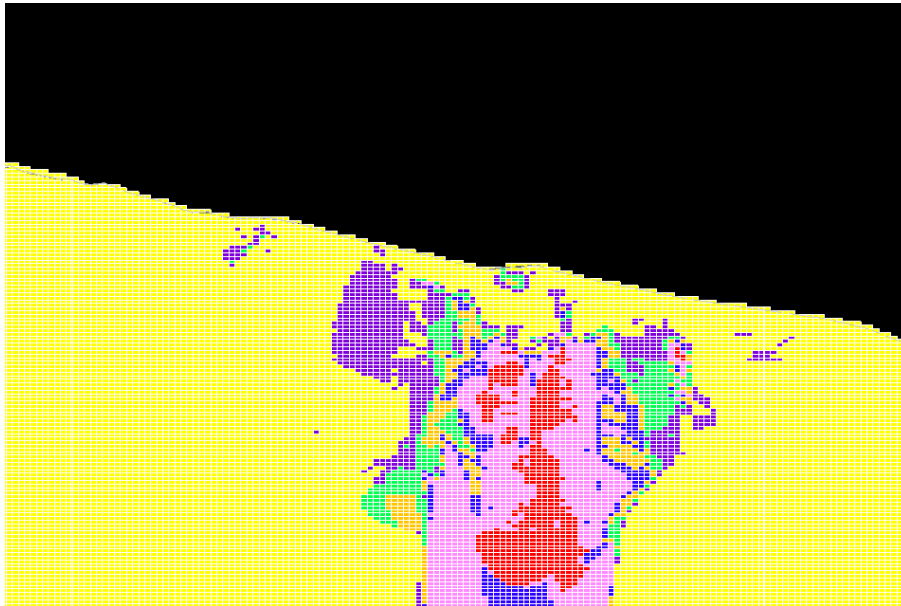


Figura 8. Plano Ley de Cobre

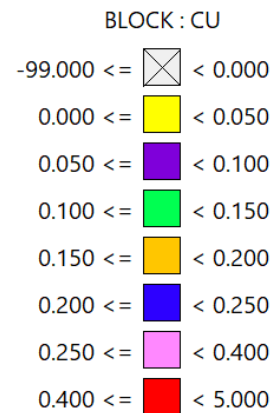


Figura 9. Leyenda Cobre

Al igual que para la ley de oro, podemos observar cómo se dispone las leyes de cobre y como responde a los intrusivos que se mencionaron previamente, donde las leyes más altas se concentran al medio del depósito. A la derecha de la figura se puede observar la leyenda con las leyes de cobre que se encuentran en el depósito.

- **Mineralogía**

Esta variable tiene el nombre de “mineralog” en el modelo, y va desde el número 1 al 6, donde:

1. No mineral
2. Lixiviado
3. Supergeno
4. Calcopirita-Bornita (CPY-BN)
5. Calcopirita-Pirita
6. Pirita

Su representación gráfica se presenta a continuación:

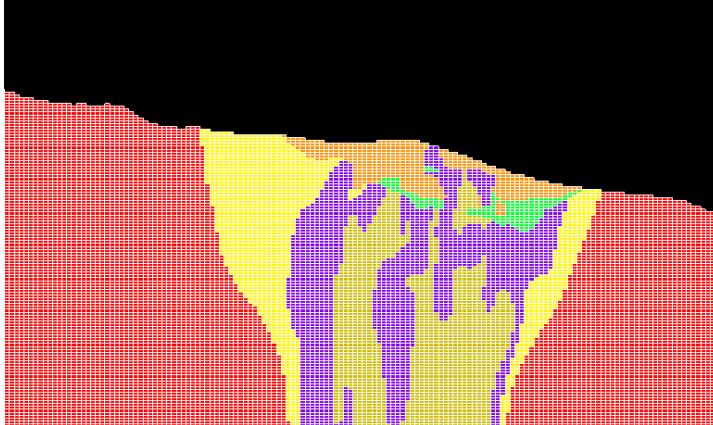


Figura 10. Plano Mineralogía



Figura 11. Leyenda Mineralogía

A la derecha podemos ver la leyenda que representa a las mineralogías detalladas anteriormente donde la escala del 1 al 6 sigue la misma que del rojo al amarillo. Por otro lado, en la figura podemos observar la forma en la que se mineralizó el yacimiento.

Otras variables que fueron entregadas por parte de la empresa fueron:

- Leyes de plata
- Categoría de los minerales, es decir, medido, indicado y referido
- Geotecnia 2011 y 2023

Las variables llamadas “*geotech_2011_adj*” y “*geotech_2023*” respectivamente en el modelo incluyen la información de las zonas geotécnicas a las cuales se les asigna un número, del 1 al 14 para la primera y del 1 al 7 para la segunda.

- MCAF

Este indicador hace referencia al “mining cost adjust factor”, el cual le da un costo de mina a cada bloque en relación con su profundidad en el depósito. Este es calculado mediante una fórmula ingresada en el software vulcan y se llama “*mcaf_stage1*” en el modelo.

- NSR de flotación y lixiviación

En tercer lugar, luego de conocer las variables del modelo de bloques y visualizarlas, se procedió a calcular cantidad de tonelajes y leyes medias para los minerales del yacimiento dentro del volumen de extracción del caso base. Para ello se utilizó la herramienta “Advanced Reserves Editor” (**Anexo B**), donde se obtuvieron los siguientes resultados:

Parámetro	Unidad	Valor
Mineral Total	Mt	1,279
Reserva Au	Moz	23.2
Ley Au	g/t	0.6
Reserva Ag	Moz	58.7
Ley Ag	g/t	1.52
Reserva Cu	Mlbs	5,779.40
Ley Cu	%	0.22

Tabla 8. Tonelaje y leyes medias

En cuarto lugar, se realizaron curvas tonelaje-ley según el NSR de corte de cada proceso, para esto se utilizó la herramienta “Advanced Grade/Tonne Report” (**Anexo C**), y se obtuvieron los siguientes gráficos:

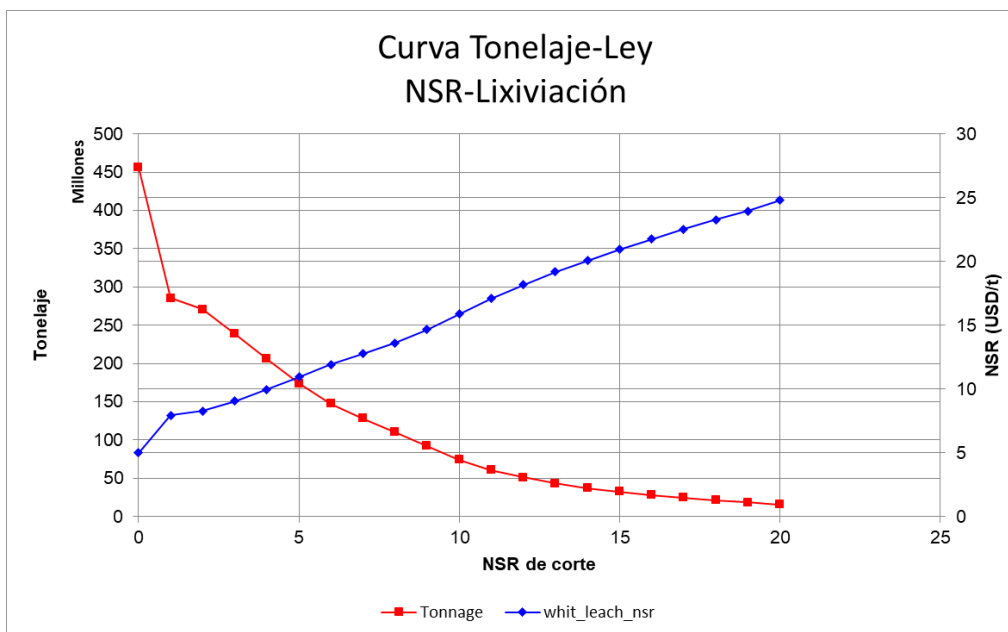


Gráfico 1. Curva tonelaje-ley – Minerales Óxido/Transición

La curva del gráfico 1 representa cómo se comporta el NSR de lixiviación versus el tonelaje de minerales de óxido y transición. Por ejemplo, para un NSR de corte de 5.25 USD/t se tiene aproximadamente 159 Mt con un NSR medio de 11 USD/t. Igualmente, podemos observar que a medida que aumenta el NSR medio el tonelaje disminuye, debido a que son menos los bloques con un NSR elevado.

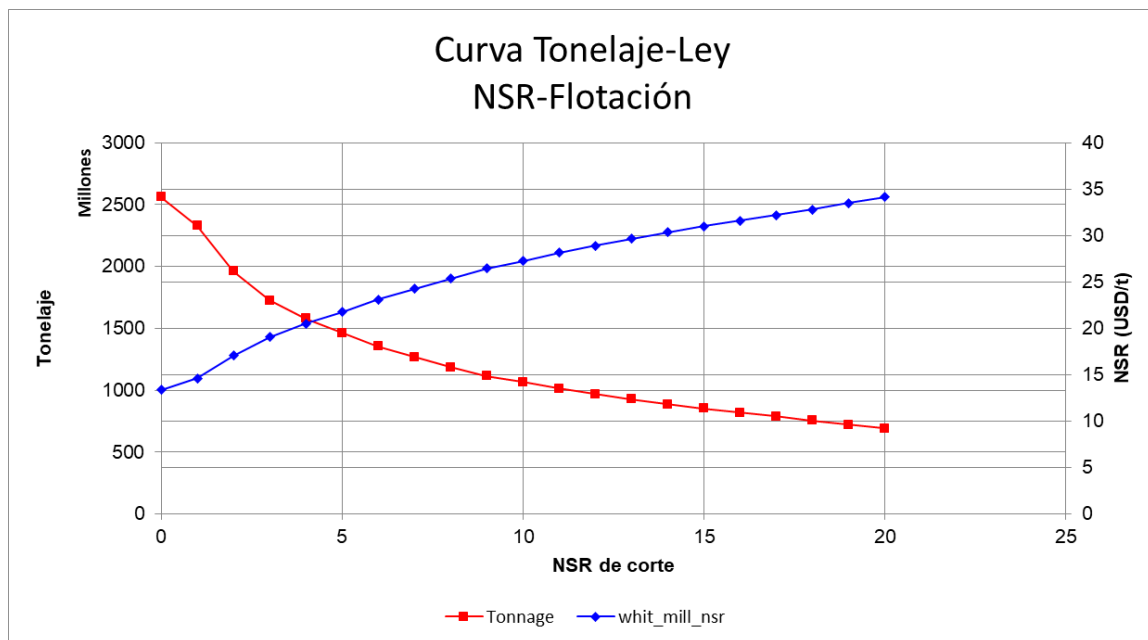


Gráfico 2. Curva tonelaje Flotación

De igual manera, en el gráfico 2, podemos observar como se comporta el NSR de flotación versus el tonelaje de mineral enviado a proceso, donde, para un NSR de corte de 10.38 USD/t se tienen aproximadamente 1,120 Mt con un NSR medio de 27 USD/t.

8.2 Construcción de variables para optimización

El siguiente paso del proyecto fue construir las variables necesarias en el modelo de bloques para realizar la optimización de pit (**Anexo D**), las cuales son:

- Banco

Esta variable se construyó con la herramienta “*Block Calculate*” (**Anexo D**), donde se calculó para cada bloque el centroide de este menos la mitad de la altura del banco, para así obtener la pata de este, lo cual se utiliza a la hora de optimizar.

- Variable de relleno (fillpct)

Esta variable se generó para que el software conozca que bloques son roca, lo cual se le asigna un valor del 100%, y que bloques son aire, los cuales tienen un valor de 0%. Para ello se utilizó la herramienta “*Mine*” (**Anexo G**).

- Geotecnia Stage 1

Esta variable se llamó “*geotech_stage1*” y se creó para poder asignarle el valor del ángulo de talud global a cada zona geotécnica del stage 1 mediante un código de programación (Figura 12).

```
File Edit View [Icons] Vulcan Script

if (geotech_2011_adj eq 0) then
  geotech_stage1=36
endif
if (geotech_2011_adj eq 1) then
  geotech_stage1=38
endif
if (geotech_2011_adj eq 2) then
  geotech_stage1=41
endif
if (geotech_2011_adj eq 3) then
  geotech_stage1=37
endif
if (geotech_2011_adj eq 4) then
  geotech_stage1=43
endif
if (geotech_2011_adj eq 5) then
  geotech_stage1=49
endif
if (geotech_2011_adj eq 6) then
  geotech_stage1=44
endif
if (geotech_2011_adj eq 7) then
  geotech_stage1=40
endif

if (geotech_2011_adj eq 8) then
  geotech_stage1=36
endif
if (geotech_2011_adj eq 9) then
  geotech_stage1=41
endif
if (geotech_2011_adj eq 10) then
  geotech_stage1=46
endif
if (geotech_2011_adj eq 11) then
  geotech_stage1=43
endif
if (geotech_2011_adj eq 12) then
  geotech_stage1=44
endif
if (geotech_2011_adj eq 13) then
  geotech_stage1=40
endif
if (geotech_2011_adj eq 14) then
  geotech_stage1=43
endif
```

Figura 12. Código asigna ángulos de talud

- Recuperaciones Caso Base

En el caso de las recuperaciones del caso base se tuvieron que crear diez variables asociadas a las fórmulas entregadas por Norte Abierto. En este caso, los minerales de óxido y transición (mineralog 2 y 3) se procesan por cualquiera de los dos procesos (flotación y lixiviación), mientras que los sulfuros solo se procesan por flotación (mineralog 3,4,5, y 6). A continuación, se presentan las variables generadas:

- Lixiviación:

- Recuperación de oro
- Recuperación de plata
- Recuperación de cobre

- Flotación:

- Recuperación de oro:
 - ❖ Recuperación por flotación
 - ❖ Recuperación dore
 - ❖ Recuperación total
- Recuperación de plata:
 - ❖ Recuperación por flotación
 - ❖ Recuperación dore
 - ❖ Recuperación total
- Recuperación de cobre

Luego, las recuperaciones fueron calculadas mediante el siguiente código de programación:

```

if(fillpct gt 0) then
**leaching
  if (whit_leach_nsr ge 5.26) then
    if ((mineralog eq 2) or (mineralog eq 3)) then
      if (cue_pct le 0.06) then
        rec_au_hl= max(min((-77.011*cue_pct + 71.686)/100,1),0)
        rec_cu_hl= 0
        rec_ag_hl= 0.4*rec_au_hl/100
      endif
    endif
  endif
endif

**Flotation
  if (whit_mill_nsr ge 10.39) then
    if ((mineralog eq 2) or (mineralog eq 3) or (mineralog eq 4) or (mineralog eq 5) or (mineralog eq 6)) then
      rec_au_flot= max(min((30.393*cue_pct + 59.496)/100, 1),0)
      rec_au_dore=(-13.467*cue_pct + 12.747)/100
      rec_au_total=rec_au_flot+rec_au_dore

      rec_cu_flot= max(min((17.064*cue_pct + 85.783)/100,1),0)
      rec_ag_flot= max(min((1.08*rec_au_flot),1),0)
      rec_ag_dore= max(min(0.87*rec_au_dore,1),0)
      rec_ag_total=rec_ag_flot+rec_ag_dore
    endif
  endif
endif

```

Figura 13. Recuperaciones caso base

Lo que realiza este código es calcular la recuperación de un bloque según el NSR de corte para cada proceso. Primero pasa por un filtro para ver si el bloque es de roca (fillpct>0%), luego decide hacia donde enviar el bloque según el tipo de mineral y el NSR que tenga el bloque, si es óxido o transición puede ir a cualquier proceso, o si es sulfuro es enviado solo a flotación. En el caso de las fórmulas para calcular las recuperaciones, estas fueron entregadas por parte de Norte Abierto.

- Recuperaciones 2023

Actualmente cualquier especie mineralógica puede ser enviada a cualquier tipo de procesamiento. Es por ello, que se obtuvieron nuevas fórmulas para recuperaciones por lixiviación y flotación para cada mineralogía (2 al 6). A continuación, se presenta el código de programación generado para obtener las recuperaciones:

```

if(fillpct gt 0) then

    if (mineralog eq 2) then

        rec2023_cu_cleaner=85.71/100
        rec2023_cu_rougher=min((158.14*(cue_pct)+18.94)/100,0.8)
        rec2023_cu_flot=((rec2023_cu_cleaner*rec2023_cu_rougher)+(11.7)/100)

        rec2023_au_cleaner=74.32/100
        rec2023_au_rougher=min((40.65*(cue_pct)+49.7)/100,0.65)
        rec2023_au_flot=((rec2023_au_cleaner)*(rec2023_au_rougher)+(11.7)/100)

        rec2023_ag_cleaner=0.4*rec2023_au_cleaner
        rec2023_ag_rougher=0.4*rec2023_au_rougher
        rec2023_ag_flot=0.4*rec2023_au_flot

        rec2023_cu_hl=8/100
        rec2023_au_hl=min((-0.0045*cue_pct+ 70/100),0.9)
        rec2023_ag_hl=0.4*rec2023_au_hl

    endif

```

Figura 14. Recuperaciones zona lixiviada

```

if (mineralog eq 3) then

    rec2023_cu_cleaner=85.71/100
    rec2023_cu_rougher=min((3.48*ln(cue_pct)+86.8)/100,0.9)
    rec2023_cu_flot=((rec2023_cu_cleaner)*(rec2023_cu_rougher)+(13)/100)

    rec2023_au_cleaner=74.32/100
    rec2023_au_rougher=min((3.53*ln(cue_pct)+70.94)/100,0.75)
    rec2023_au_flot=((rec2023_au_cleaner)*(rec2023_au_rougher)+(13)/100)

    rec2023_ag_cleaner=0.4*rec2023_au_cleaner
    rec2023_ag_rougher=0.4*rec2023_au_rougher
    rec2023_ag_flot=0.4*rec2023_au_flot

    rec2023_cu_hl=12/100
    rec2023_au_hl=min((-0.0045*cue_pct+70/100)*0.8,0.9)
    rec2023_ag_hl=0.4*rec2023_au_hl

endif

```

Figura 15. Recuperaciones zona supergena

```

if (mineralog eq 4) then

    rec2023_cu_cleaner=92.63/100
    rec2023_cu_rougher=min((-0.985*(1/(cue_pct))+92.39)/100,0.96)
    rec2023_cu_flot=((rec2023_cu_cleaner)*(rec2023_cu_rougher)+(9.9)/100)

    rec2023_au_cleaner=82.71/100
    rec2023_au_rougher=min((4.94*ln(cue_pct)+80.89)/100,0.85)
    rec2023_au_flot=((rec2023_au_cleaner)*(rec2023_au_rougher)+(9.9)/100)

    rec2023_ag_cleaner=0.4*rec2023_au_cleaner
    rec2023_ag_rougher=0.4*rec2023_au_rougher
    rec2023_ag_flot=0.4*rec2023_au_flot

    rec2023_cu_hl=10/100
    rec2023_au_hl=min((-0.0045*cue_pct+70/100)*0.85,0.9)
    rec2023_ag_hl=0.4*rec2023_au_hl

endif

```

Figura 16 Recuperaciones calcopirita-pirita

```

if (mineralog eq 5) then

    rec2023_cu_cleaner=92.63/100
    rec2023_cu_rougher=min((4.35*ln(cue_pct)+92.661)/100,0.94)
    rec2023_cu_flot=((rec2023_cu_cleaner)*(rec2023_cu_rougher)+(9.2)/100)

    rec2023_au_cleaner=82.71/100
    rec2023_au_rougher=68.955/100
    rec2023_au_flot=((rec2023_au_cleaner)*(rec2023_au_rougher)+(9.2)/100)

    rec2023_ag_cleaner=0.4*rec2023_au_cleaner
    rec2023_ag_rougher=0.4*rec2023_au_rougher
    rec2023_ag_flot=0.4*rec2023_au_flot

    rec2023_cu_hl=10/100
    rec2023_au_hl=min((-0.0045*cue_pct+70/100)*0.8,0.9)
    rec2023_ag_hl=0.4*rec2023_au_hl
endif

```

Figura 17. Recuperaciones calcopirita-bornita

```

if (mineralog eq 6) then

    rec2023_cu_cleaner=92.63/100
    aux=(-0.985*(1/(cue_pct))+92.39)/100

    if (aux ge 0 and aux le 0.96) then

        rec2023_cu_rougher=aux
        rec2023_cu_flot=((rec2023_cu_cleaner)*(rec2023_cu_rougher)+(9.9)/100)

    rec2023_au_cleaner=82.71/100
    rec2023_au_rougher=min((4.94*ln(cue_pct)+80.89)/100,0.85)
    rec2023_au_flot=((rec2023_au_cleaner)*(rec2023_au_rougher)+(9.9)/100)

    rec2023_ag_cleaner=0.4*rec2023_au_cleaner
    rec2023_ag_rougher=0.4*rec2023_au_rougher
    rec2023_ag_flot=0.4*rec2023_au_flot

    endif

    rec2023_cu_hl=10/100
    aux_1=(-0.0045*cue_pct+70/100)*0.85

    if (aux_1 ge 0 and aux_1 le 0.9) then

        rec2023_au_hl=aux_1
        rec2023_ag_hl=0.4*rec2023_au_hl
    endif
endif

```

Figura 18. Recuperaciones pirita

La función de este código es calcular las nuevas recuperaciones metalúrgicas, donde para cada especie mineralógica calcula una recuperación para lixiviación y otra para flotación, luego el software decidirá a que procesa enviar el bloque según la recuperación más alta.

8.3 Simulación de la optimización del Caso Base

Luego de construir las variables necesarias para realizar la optimización de pit se generó la simulación para el caso base de Norte Abierto. Esta se llevó a cabo con la herramienta “*pit optimiser*” y se utilizaron los siguientes datos de entrada:

Inputs	Unidad	Valor
Precio Au	USD/oz	1250
Precio Ag	USD/oz	16
Precio Cu	USD/lb	2.75
Costo Mina	USD/t	1.47
Costo Flotación Sulfur	USD/t	10.99
Costo Flotación OT	USD/t	10.38
Costo Lixiviación	USD/t	5.25
Costo Venta Au	USD/oz	5
Costo Venta Ag	USD/oz	1
Costo Venta Cu	USD/lb	0.4
Recuperación Au	%	Modelo
Recuperación Ag	%	Modelo
Recuperación Cu	%	Modelo

Tabla 9. Parámetros de optimización Caso Base

Zona	Ángulo Global
0	36
1	38
2	41
3	37
4	43
5	49
6	44
7	40
8	36
9	41
10	46
11	43
12	44
13	40
14	43

Tabla 10. Ángulos de talud globales Caso Base

Una vez ingresados los datos de entrada se le solicitó el software que optimizara el pit, y que además realizara un análisis pit by pit para un revenue factor que variara entre 0,3 y 1,3 con un incremento de 0,025. El proceso realizado en el software Vulcan se encuentra en el **Anexo E**, de donde se obtuvieron los siguientes resultados:

Pit	Revenue Factor	Razón E/M	Mineral (Mt)	Estéril (Mt)	Roca (Mt)	Au (g/t)	Ag (g/t)	Cu (%)	V.D Mejor Caso (MUSD)	V.D Peor Caso (MUSD)
1	0.300	0.000	7.41	0.00	7.42	0.96	3.97	0.06	156	156
2	0.325	0.000	12.04	0.00	12.05	0.91	3.05	0.08	244	244
3	0.350	0.002	18.02	0.04	18.06	0.85	2.55	0.10	345	345
4	0.375	0.004	25.52	0.10	25.62	0.79	2.60	0.09	435	435
5	0.400	0.282	302.85	85.47	388.32	0.56	1.47	0.15	3,045	3,006
6	0.425	0.513	583.65	299.13	882.79	0.57	1.64	0.18	5,548	5,301
7	0.450	0.676	772.01	522.03	1,294.04	0.58	1.58	0.20	6,955	6,545
8	0.475	0.770	870.70	670.27	1,540.96	0.58	1.59	0.20	7,587	7,054
9	0.500	0.848	947.62	803.96	1,751.58	0.58	1.58	0.21	8,017	7,378
10	0.525	0.888	989.58	878.75	1,868.33	0.58	1.58	0.21	8,227	7,528
11	0.550	1.030	1,109.07	1,142.41	2,251.48	0.58	1.56	0.21	8,727	7,868
12	0.575	1.095	1,155.40	1,264.85	2,420.25	0.58	1.55	0.21	8,902	7,959
13	0.600	1.113	1,180.76	1,313.93	2,494.69	0.58	1.54	0.21	8,980	7,988
14	0.625	1.232	1,277.65	1,574.44	2,852.08	0.58	1.51	0.21	9,243	8,050
15	0.650	1.278	1,314.27	1,679.77	2,994.03	0.58	1.50	0.21	9,328	8,050
16	0.675	1.364	1,406.52	1,917.83	3,324.34	0.57	1.48	0.21	9,504	7,994
17	0.700	1.467	1,531.82	2,247.41	3,779.23	0.56	1.44	0.21	9,689	7,827
18	0.725	1.556	1,605.05	2,496.94	4,101.99	0.55	1.43	0.21	9,783	7,630
19	0.750	1.638	1,675.03	2,743.39	4,418.42	0.55	1.41	0.21	9,858	7,453
20	0.775	1.686	1,704.07	2,872.51	4,576.58	0.55	1.40	0.21	9,887	7,332
21	0.800	1.730	1,735.02	3,002.24	4,737.26	0.55	1.40	0.21	9,911	7,193
22	0.825	1.783	1,764.27	3,145.59	4,909.86	0.55	1.39	0.21	9,933	7,066
23	0.850	1.821	1,779.36	3,240.14	5,019.50	0.55	1.39	0.21	9,943	6,981
24	0.875	1.848	1,799.71	3,325.27	5,124.98	0.54	1.38	0.21	9,951	6,888
25	0.900	1.868	1,811.21	3,383.29	5,194.49	0.54	1.38	0.21	9,956	6,836
26	0.925	1.889	1,821.68	3,441.95	5,263.63	0.54	1.38	0.21	9,959	6,788
27	0.950	1.916	1,838.71	3,522.43	5,361.14	0.54	1.37	0.21	9,963	6,692
28	0.975	1.964	1,860.13	3,653.45	5,513.58	0.54	1.37	0.21	9,965	6,542
29	1.000	1.996	1,876.30	3,745.35	5,621.65	0.54	1.37	0.21	9,964	6,442
30	1.025	2.005	1,879.71	3,768.42	5,648.13	0.54	1.37	0.21	9,964	6,422
31	1.050	2.006	1,880.04	3,770.77	5,650.81	0.54	1.37	0.21	9,964	6,420
32	1.075	2.023	1,886.00	3,815.85	5,701.86	0.54	1.36	0.21	9,963	6,382
33	1.100	2.090	1,916.66	4,005.90	5,922.57	0.54	1.36	0.21	9,955	6,144
34	1.125	2.095	1,918.66	4,020.47	5,939.12	0.54	1.36	0.21	9,955	6,133
35	1.150	2.095	1,918.68	4,020.47	5,939.15	0.54	1.36	0.21	9,955	6,133
36	1.175	2.109	1,922.28	4,053.50	5,975.78	0.54	1.35	0.21	9,953	6,104
37	1.200	2.136	1,931.75	4,127.04	6,058.79	0.54	1.35	0.21	9,948	5,999
38	1.225	2.149	1,935.95	4,161.30	6,097.25	0.54	1.35	0.21	9,946	5,960
39	1.250	2.214	1,955.78	4,330.35	6,286.13	0.53	1.35	0.21	9,934	5,765
40	1.275	2.219	1,957.36	4,343.55	6,300.91	0.53	1.35	0.21	9,934	5,745
41	1.300	2.220	1,957.58	4,345.97	6,303.55	0.53	1.35	0.21	9,933	5,742

Tabla 11. Resultados Optimización Caso Base

Para poder visualizar el pit seleccionado en el caso base en esta simulación, se buscó el pit que tenga una cantidad similar de roca total, donde el valor corresponde a 3,500 Mt. En la tabla 11 podemos observar que el pit 16 (R.F=0.675) tiene una cantidad de roca total de 3,324 Mt, por lo tanto, ese será el pit final del caso base con el que se trabajará. A continuación, se presenta la información del pit 16:

Parámetro	Unidad	Valor
Razón E/M	-	1.36
Costo Mina	MUSD	5,008
Mineral Total	Mt	1,407
Estéril Total	Mt	1,918
Roca Total	Mr	3,324
Ley Au	g/t	0.57
Reserva Au	Moz	19.6
Ley Ag	g/t	1.48
Reserva Ag	Moz	49.7
Ley Cu	%	0.21
Reserva Cu	Mlbs	5,829
V.D Mejor Caso	MUSD	9,504
V.D Peor Caso	MUSD	7,994

Tabla 12. Parámetros Pit Final Caso Base

Luego, con la herramienta “*Pit Optimiser Viewing*” se generaron las triangulaciones del pit 1 al 16 y con estas se formó un sólido con la herramienta “*Create 3D Solid*” para poder visualizar el volumen de extracción, el cual se presenta a continuación:

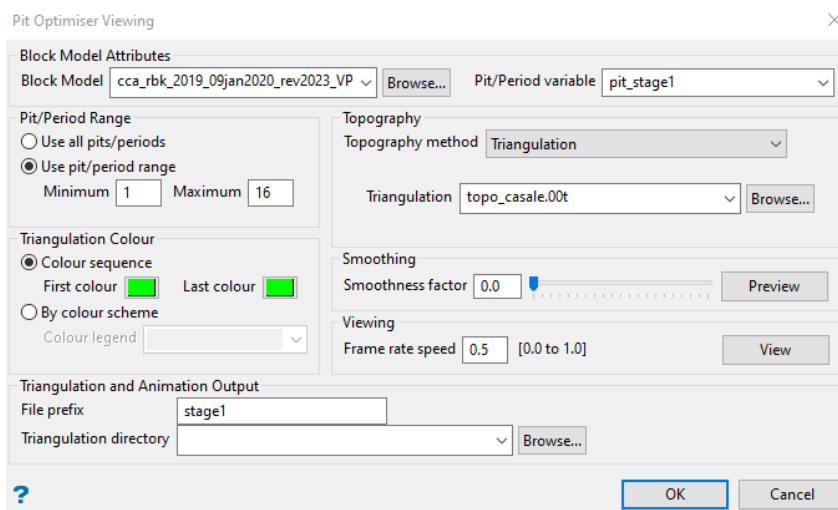


Figura 19. Triangulaciones

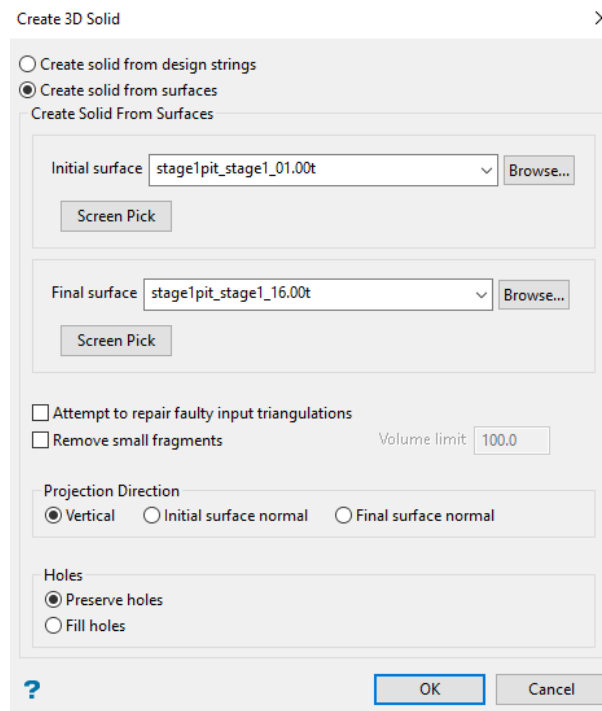


Figura 20. Generación de sólido

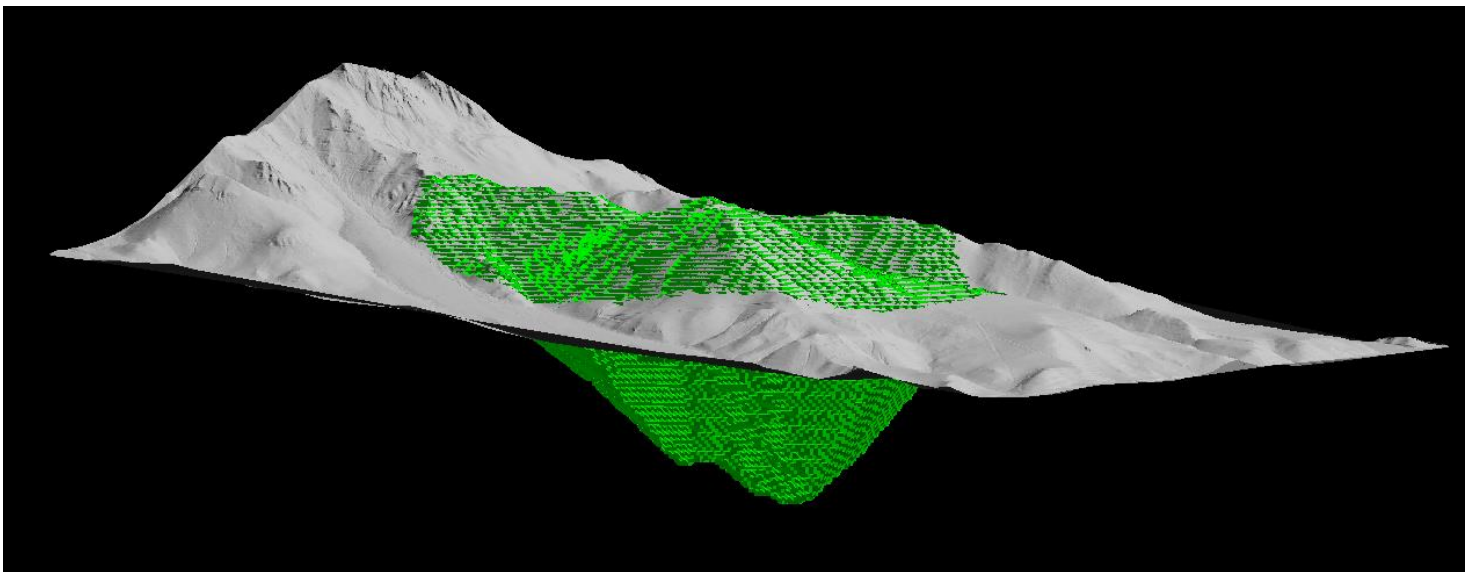


Figura 21. Volumen de extracción

8.4 Optimización de Cerro Casale 2023

El siguiente paso fue evaluar el impacto de las nuevas variables de entrada en la optimización del pit de Cerro Casale, es decir, ángulos de talud, recuperaciones metalúrgicas y precios de los metales. Para ello, se calculó los nuevos ángulos de talud globales para las nuevas zonas geotécnicas, esto se llevó a cabo con la siguiente fórmula:

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{H_{ir}}{\left(\frac{H_{ir}}{H_b} \right) \times (b + B) + A_r} \right)$$

Donde:

- Hir: Altura inter-rampa
- Hb: Altura de banco
- b: Break-back⁷
- B: Ancho de berma
- Ar: Ancho de rampa

Por lo tanto, a continuación, se presentan los inputs de la fórmula y los ángulos obtenidos:

Zona	IRA°	Ángulo Banco	Altura Banco	Breakback	Berma	Step Out	Hir	Ángulo Global
1	37	65	15	6,99	13,2	35	225	34
2	40	75	15	4,02	13,8	35	225	37
3	53	75	15	4,02	7,3	35	225	48
4	46	65	30	13,99	15,4	35	300	42
5	49	70	30	10,92	18,5	35	300	42
6	53	72	30	9,75	14,8	35	300	47
7	49	70	30	10,92	18,5	35	300	42

Tabla 13. Nuevos ángulos de talud

⁷ Distancia horizontal proyectada en un banco

Una vez obtenido los nuevos ángulos de talud se procedió a optimizar el pit de Cerro Casale junto con las nuevas recuperaciones y precios previamente mencionados (**Anexo F**), además de realizar un análisis pit by pit con revenue factor entre 0.3 y 1.3, donde se obtuvieron los siguientes resultados:

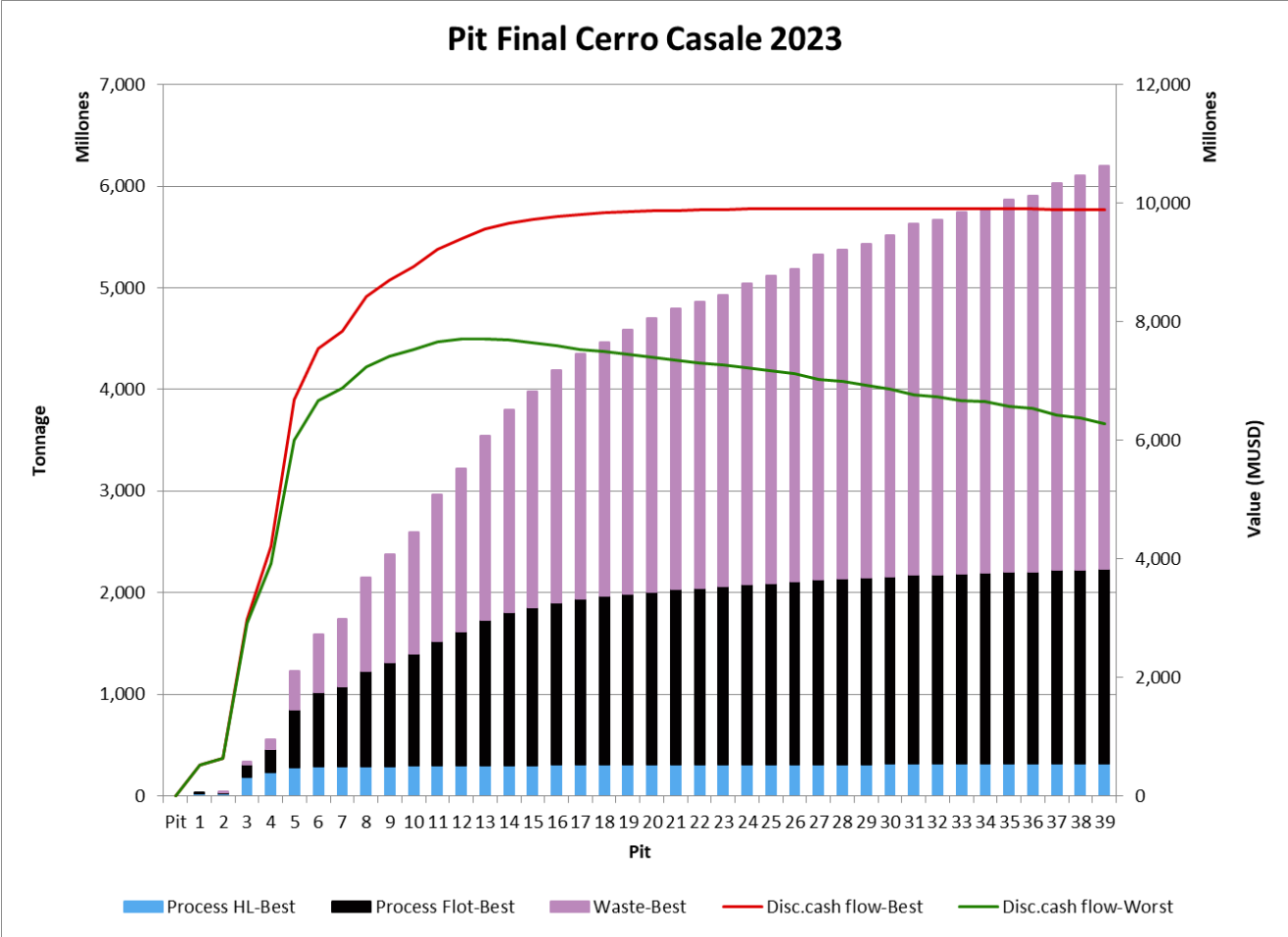


Gráfico 3. Análisis pit by pit Cerro Casale

Del gráfico 6 podemos observar que a partir del pit 14 la curva de valor descontado para el mejor caso comienza a ser constante, es decir, a medida que se va profundizando en el depósito a partir de esta envolvente el valor descontado no presenta variaciones importantes. Esto se puede ver en el siguiente análisis porcentual:

Pit	Variación Porcentual
14	1.08%
15	0.60%
16	0.55%
17	0.37%
18	0.24%
19	0.19%
20	0.13%
21	0.11%
22	0.06%
23	0.06%
24	0.06%
25	0.04%
26	0.02%
27	0.03%
28	0.00%

Tabla 14. Variación porcentual VPN

Donde, podemos observar que luego del pit 14 la variación del VPN es menor al 1%. Además, por ejemplo, para pasar del pit 14 al 20, implica extraer 687 Mt de estéril para capturar 206 Mt de mineral adicional, lo cual se traduce en varios años más de operación, para lograr aumentar el valor descontado en un 2%, lo cual no es conveniente. Por lo tanto, por normativa de Norte Abierto de definir el pit final con un umbral del 1% para la variación del pit final, y por el análisis desarrollado previamente, no es conveniente extraer una envolvente económica superior al pit 14, el cual es seleccionado como pit final de Cerro Casale.

Finalmente, se generó el volumen de extracción en el software vulcan, el cual se presenta a continuación:

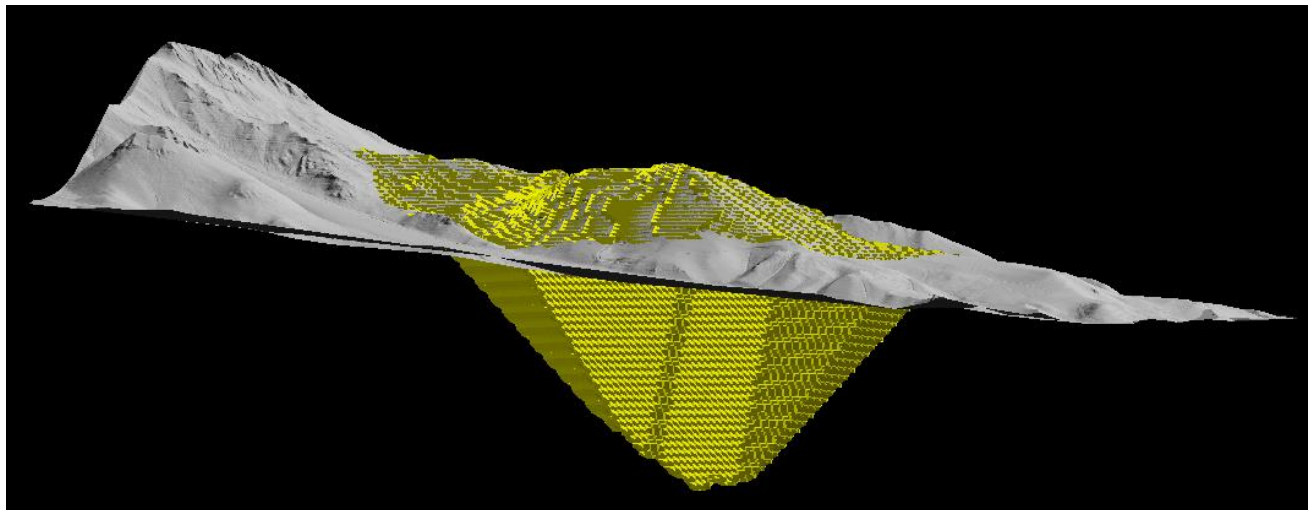


Figura 22. Volumen de extracción pit Cerro Casale 2023

8.5 Comparación Caso Base con Caso Proyecto

El paso final de este proyecto es observar las variaciones finales entre cada caso de la optimización de Cerro Casale para así tomar la decisión de rediseñar las fases operativas del pit. Los resultados se obtuvieron restando los valores para las distintas variables de cada caso, además se calcularon diferencias porcentuales, las cuales se presentan a continuación:

Parámetro	Unidad	Caso Base	Caso con Proyecto	Variación
Razón E/M	-	1.36	1.108	-19%
Costo Mina	MUSD	5,008	5,974	19%
Reservas Au	Moz	19.6	20.6	1.05
Reservas Cu	MIbs	5,829	6,974	1,146
Reservas Ag	Moz	49.7	21.6	-28.1
Mineral	Mt	1,407	1,805	399
Estéril	Mt	1,918	1,999	82
V.D Mejor Caso	MUSD	9,504	9,666	162
V.D Peor Caso	MUSD	7,994	7,692	-302
Mediana V.D	MUSD	8,749	8,679	-70

Tabla 15. Resultados finales comparativa casos

Los valores obtenidos en la tabla 15 hacen sentido con las variaciones expuestas anteriormente, donde hay una disminución de la razón estéril-mineral en un 19%, con un aumento de la cantidad de mineral de 399 Mt, esto es debido a que el pit se profundizó y a la subida de los precios. De igual forma podemos ver, por un lado, un valor adicional de 162 MUSD para el mejor caso, lo cual es alentador para el negocio debido a que el diseño minero siempre buscará acercarse al mejor caso del VPN, y por el otro lado, en el peor caso existe una diferencia de -302 MUSD para el Caso con Proyecto, sin embargo, el diseño minero jamás buscará acercarse a ese caso debido a que es extremadamente inconveniente explotar el pit banco a banco.

Finalmente, se podría llegar a pensar que debido a la disminución de las recuperaciones el mineral total a extraer sería menor en el nuevo caso, pero como los precios aumentaron algunos bloques que previamente eran considerados estéril ahora se transformaron en mineral y por ello aumentó su cantidad de tonelaje.

Por lo tanto, por las razones expuestas previamente podemos concluir que la nueva optimización de Cerro Casale tiene un valor agregado y debido a ello la empresa ha tomado la decisión a favor de rediseñar las fases operativas del pit.

Finalmente, se presenta la comparativa entre los pits del caso base y del proyecto en el software vulcan:

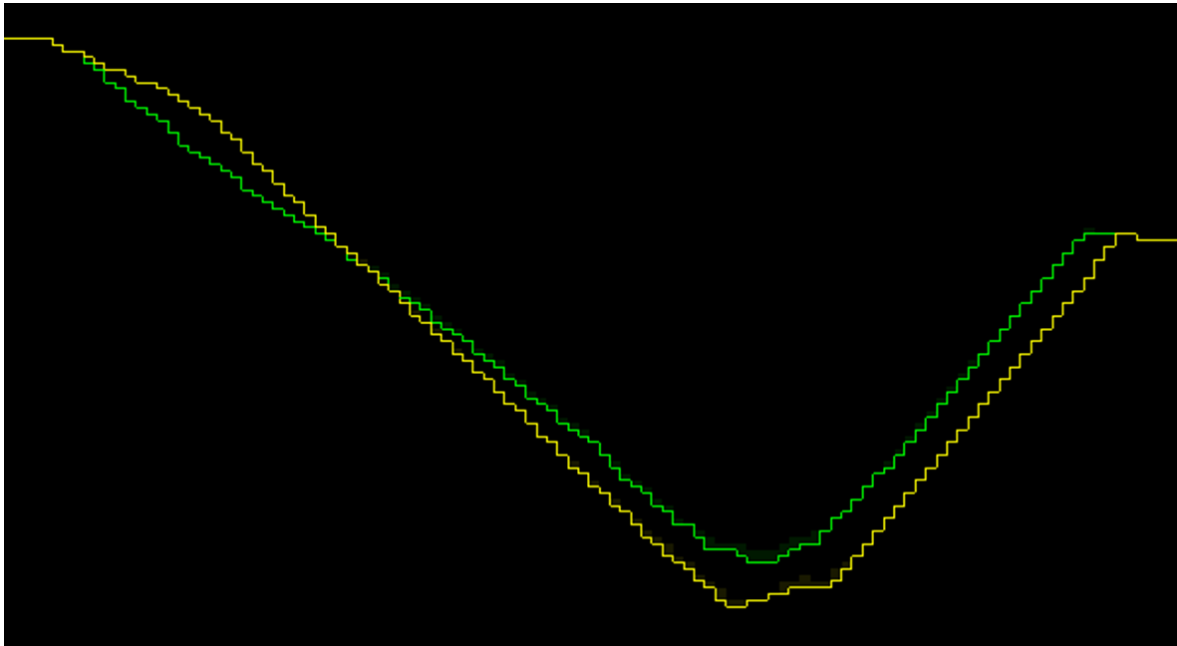


Figura 23. Pits

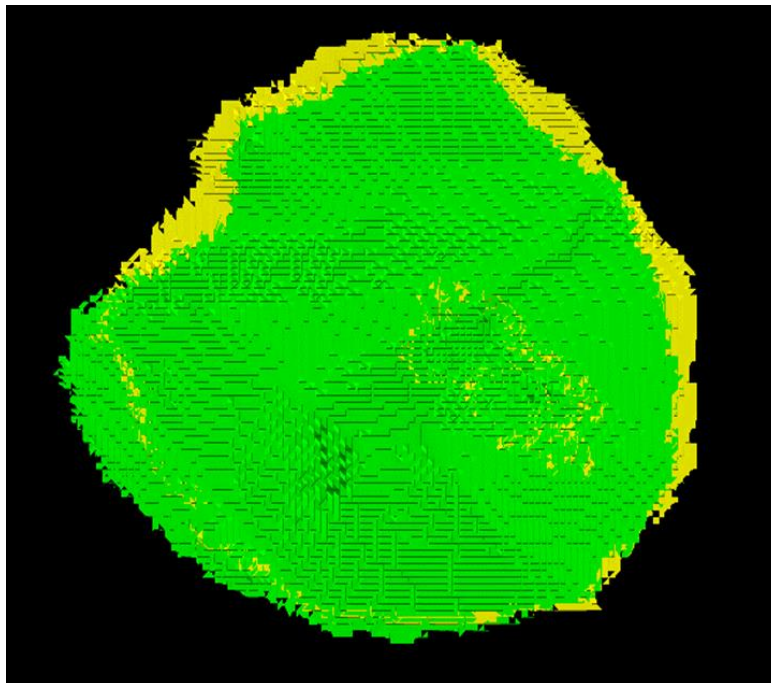


Figura 23. Volúmenes de extracción

9.0 Resultados cualitativos y cuantitativos

A continuación, se presentan los resultados finales asociados al proyecto llevado a cabo, de forma de observar el cumplimiento de las medidas de desempeño propuestas.

Objetivo específico 1

- **Medida de desempeño:**

$$W = \frac{\sum_{i=1}^4 X_i}{4} \cdot 100\%$$
$$X_i = \begin{cases} 1, & \text{si se cumple con analizar la información} \\ 0, & \text{caso contrario} \end{cases}$$

En el desarrollo del proyecto se cumplió con analizar cada una de las variables propuestas en el objetivo específico por lo que $X_i = 1$ para cada caso, entonces, se tiene que:

$$W = \frac{(1 + 1 + 1 + 1)}{4} * 100\% = 100\%$$

Por lo tanto, se cumplió con el objetivo específico 1 con un 100% de cumplimiento

Objetivo específico 2

- **Medida de desempeño**

$$Z = X \cdot 100\%$$
$$X = \begin{cases} 1, & \text{si se contruyen las variables} \\ 0, & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

Previamente se mostró cuales variables y como se construyeron para la optimización del pit de Cerro Casale por lo que $X = 1$, entonces, se tiene que:

$$Z = 1 * 100\% = 100\%$$

Por lo tanto, se cumplió con el objetivo específico 2 con un cumplimiento del 100%.

Objetivo específico 3

- **Medida de desempeño N°1:** Cantidad de mineral

La cantidad de mineral del Caso Base es de 1,407 Mt, mientras que en el Caso con Proyecto es de 1,805 Mt, entonces, la variación de mineral se presenta como:

$$\text{Variación Mineral} = \frac{(1,805 - 1,407)}{1,407} * 100\% = 28\% > 25\%$$

Por lo tanto, podemos observar que la variación en cantidad de mineral es superior al proyectado en la medida de desempeño, por lo que se cumple el indicador propuesto.

- **Medida de desempeño N°2:** Valor descontado del pit

Para el mejor caso en la optimización de pit, tenemos que para el pit del Caso Base se tiene que:

$$VPN_{\text{Caso Base}} = \frac{(41,264 \text{ MUSD} - 21,294 \text{ MUSD})}{(1 + 5\%)^{32}} = 9,504 \text{ MUSD}$$

Mientras que, para el pit del proyecto, se tiene que:

$$VPN_{\text{Caso Proyecto}} = \frac{(53,680 \text{ MUSD} - 26,708 \text{ MUSD})}{(1 + 5\%)^{32}} = 9,666 \text{ MUSD}$$

Por lo tanto, la variación porcentual sería:

$$\text{Variación VPN} = \frac{(9,666 - 9,504)}{9,504} * 100\% = 2\%$$

La variación de VPN resultó exactamente la misma propuesta en la medida desempeño, por lo que se cumplió con el indicador presentado.

- **Medida de desempeño N°3:** Razón estéril-mineral

Para el caso base, se tiene que:

$$\text{Razón } \frac{E}{M} = \frac{1,918 \text{ Mt}}{1,407 \text{ Mt}} = 1,36$$

Mientras que, para el caso del proyecto, se tiene que:

$$\text{Razón } \frac{E}{M} = \frac{1,999 \text{ Mt}}{1,805 \text{ Mt}} = 1,12$$

Entonces, la variación porcentual es de:

$$\text{Variación Razón } \frac{E}{M} = \frac{(1,108 - 1,36)}{1,36} * 100\% = -19\%$$

Por lo tanto, la disminución de la razón estéril-mineral es superior al 15% planteado, por lo que se cumplió con el indicador planteado.

Objetivo específico 4

- **Medida de desempeño:**

$$Y = X * 100\%$$

$$X = \begin{cases} 1, & \text{si se toma la decisión de rediseñar el pit} \\ 0, & \text{caso contrario} \end{cases}$$

Como se mencionó previamente, Norte Abierto tomó la decisión a favor de rediseñar el pit de Cerro Casale acorde a los resultados obtenidos en este proyecto, por lo que $X = 1$, entonces, se tiene que:

$$Y = 1 * 100\% = 100\%$$

Por lo tanto, se cumplió con el objetivo específico con un 100% de cumplimiento.

10.0 Conclusiones y discusión

Los resultados expuestos previamente evidencian el cumplimiento del objetivo general propuesto, es decir, se llevó a cabo la evaluación de los nuevos datos en la optimización del pit de Cerro Casale lo cual trajo un nuevo escenario mejorado bajo el cual Norte Abierto tomó la decisión de rediseñar las fases operativas del pit. Esto se logró desarrollando cada uno de los objetivos específicos, alcanzando un cumplimiento de ellos en su totalidad demostrado en las medidas de desempeño planteadas, específicamente en los indicadores de optimización de pit, donde se alcanzó la meta proyectada para la cantidad de mineral, valor descontado del pit y la razón estéril-mineral, incluso se superó en algunos casos, lo cual es aún más positivo ya que entregó más valor al proyecto y a la empresa.

En cuanto al nuevo pit generado, los ángulos de talud no presentan un aumento notorio en el lado derecho del pit (Figura 23), esto es debido a que no se tiene la información suficiente respecto al yacimiento en ese sector y los ángulos recomendados en el estudio geotécnico son bajos para esos sectores, por lo que con la nueva campaña de sondaje a llevarse a cabo en el 2024 se espera que esos ángulos de talud puedan aumentar y así tener la oportunidad de obtener un pit más beneficioso.

Por lo tanto, se hace la invitación a la empresa Norte Abierto a que una vez finalizada la campaña de sondaje del 2024 y sus respectivos análisis se vuelva a utilizar este proyecto para observar los efectos que tendrán en la optimización de pit de Cerro Casale los posibles nuevos ángulos de talud y recuperaciones metalúrgicas.

11.0 Referencias

Bernal, F. (2013). Criterios de Optimización de Minas a Rajo Abierto.

Elphos. (2023). Obtenido de Elphos: <https://delphoslab.cl/index.php/55-dec/pde-3/276-planificacion-minera>

Ludeña, L. (2020). *Modelamiento, cálculo de reservas y diseño de pit final*.

Minería Chilena. (3 de Abril de 2012). Obtenido de <https://www.mch.cl/reportajes/optimizacion-del-rajo-que-es-y-como-se-hace/#>

Minero, P. (2006). *Manual General de Minería y Metalurgia*.

Miranda, F. (2017). *Alineamiento de la selección del pit final con la optimización del secuenciamiento estratégico*.

Nube Minera. (2020). Obtenido de <https://nubeminera.cl/optimizacion-pit/>

Nube Minera. (2022). Obtenido de <https://nubeminera.cl/elementos-rajo/>

Revista Seguridad Minera. (2022). Obtenido de <https://www.revistaseguridadminera.com/operaciones-mineras/desarrollan-metodo-de-calculo-de-estabilidad-de-taludes-para-mineria-de-paredes-altas/#:~:text=%C2%BFQu%C3%A9%20es%20una%20talud%3F,la%20tierra%20detr%C3%A1s%20de%20%C3%A9l.>

Rubio, E. (2010). Obtenido de <https://es.slideshare.net/aidee2010/02-horizontes-deplanificacion>

Vallejo García, M. N., Baquero Chiquiza, J. G., & Sepúlveda, G. F. (2010). ANÁLISIS DE LOS ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN MINERA: CONO FLOTANTE Y LERCHSGROSSMANN UTILIZANDO GEMCOM SURPAC Y UPL. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 15-25. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/1695/169520001002.pdf>

Vallejo, B. S. (2010). *Análisis algoritmos optimización minera*.

Wilber, Y. (2013). *Optimización y planificación para la explotación del tajo Minas pampa*.

12.0 Anexos

- Anexo A. Leyendas Vulcan

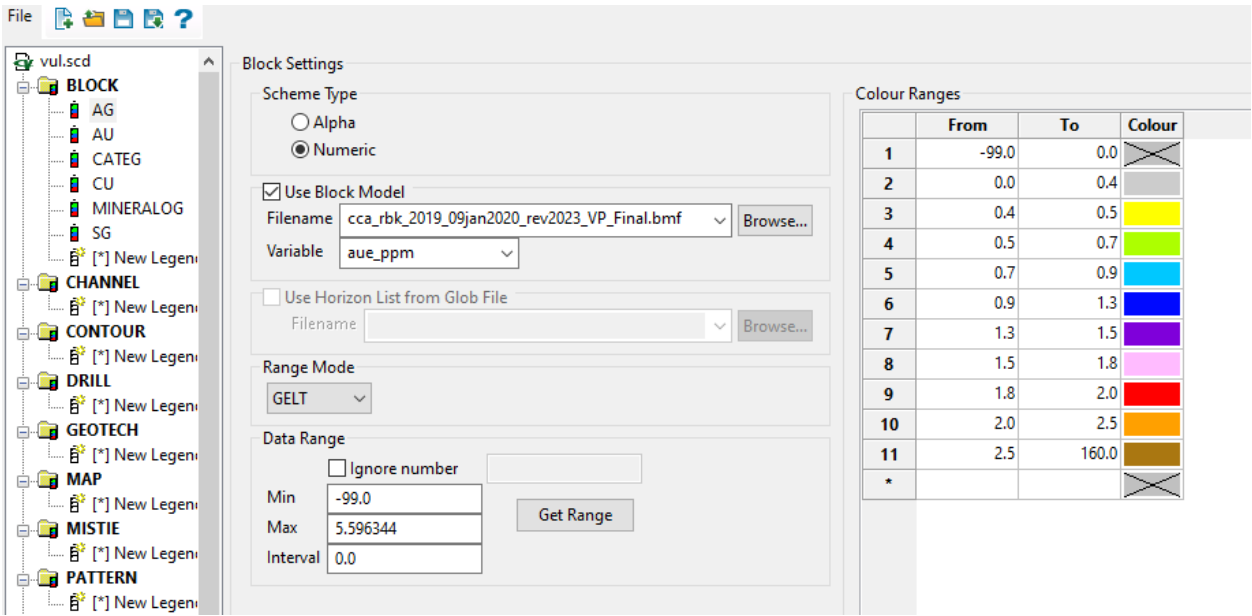


Figura 24. Menú para generar leyendas

- Anexo B. Cubicaciones

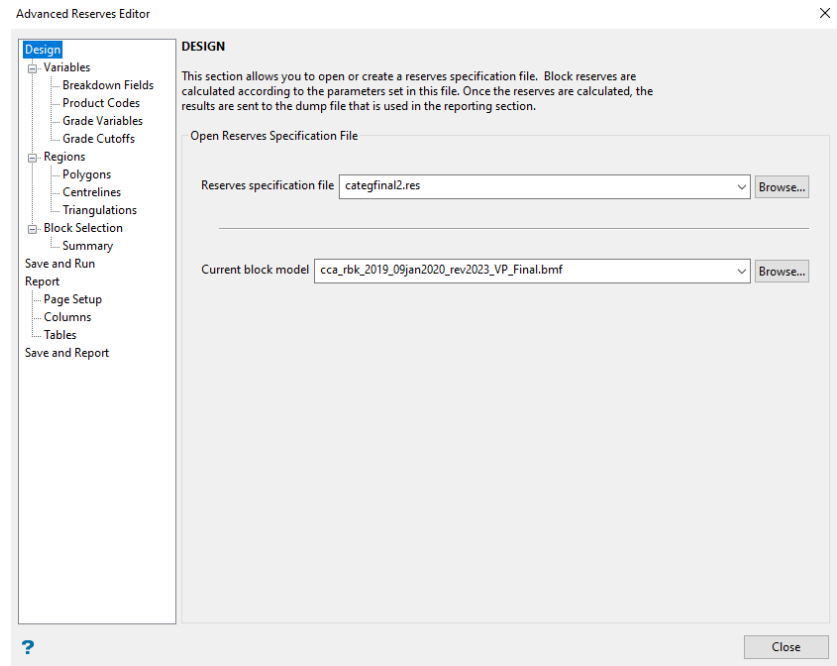


Figura 25. Nombre del archivo y selección modelo de bloques

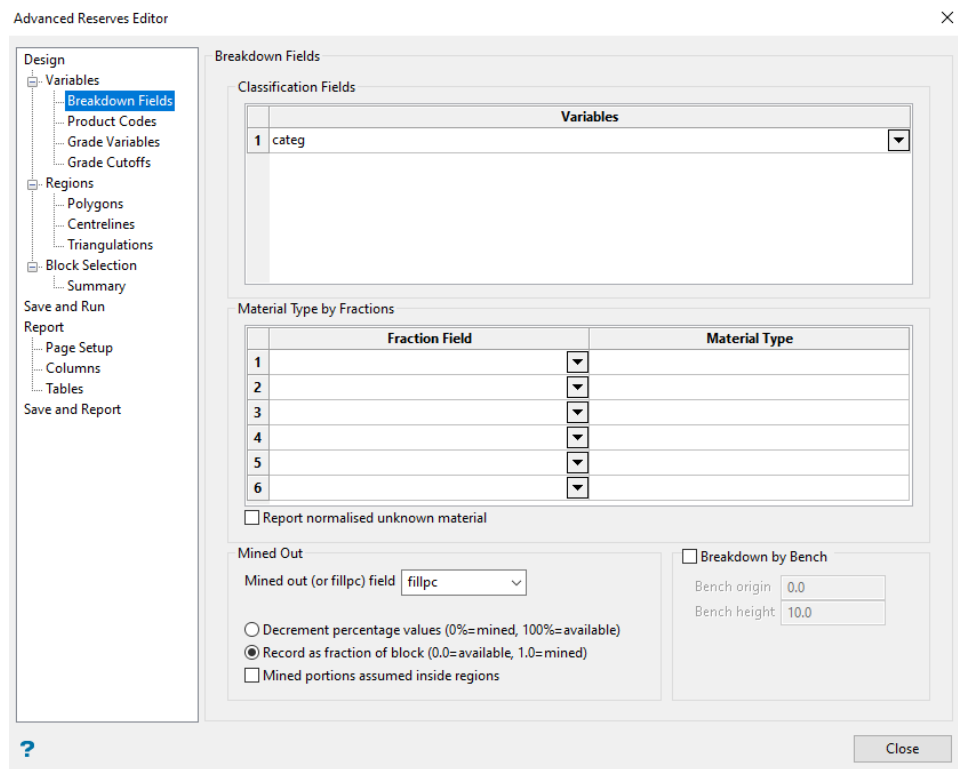


Figura 26. Selección variables de clasificación

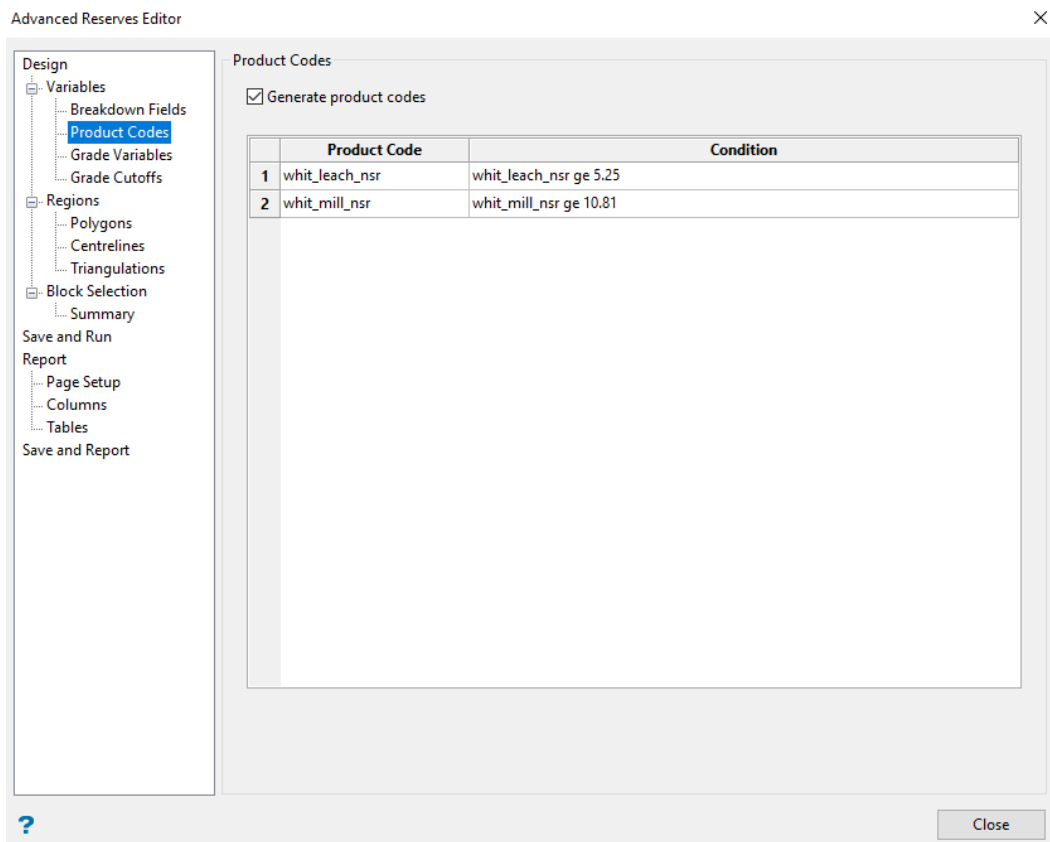


Figura 27. Generación de productos

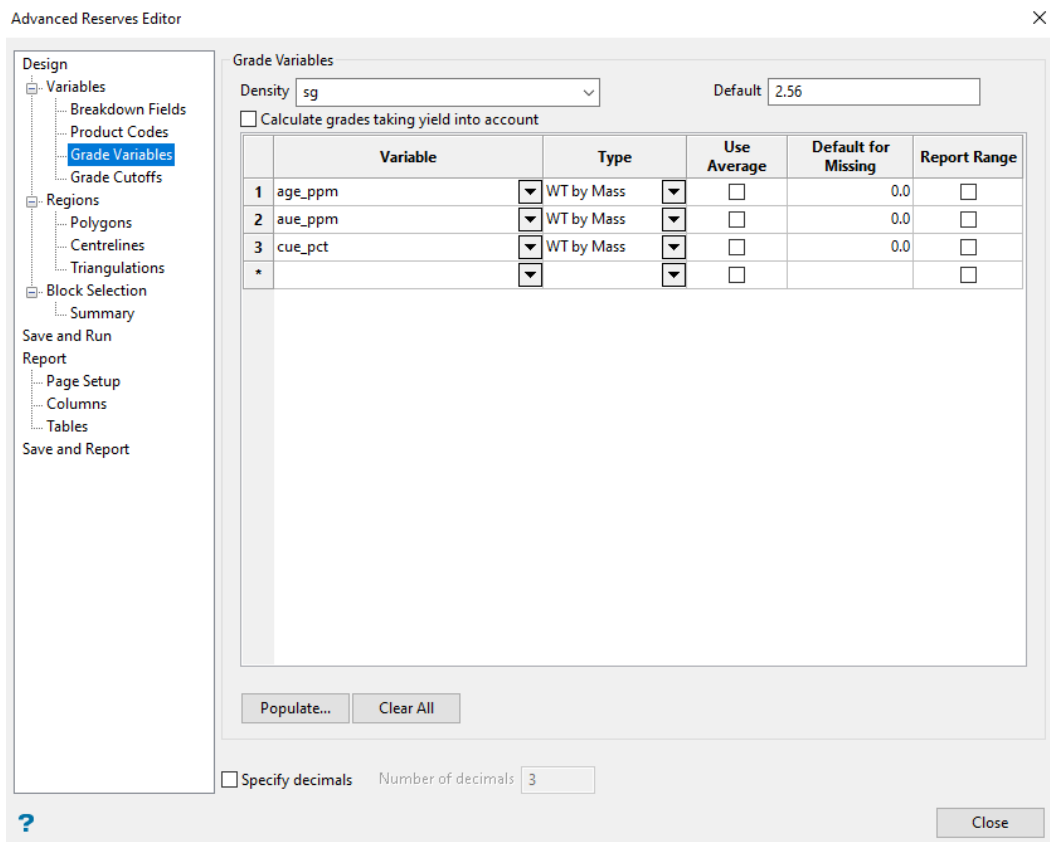


Figura 28. Variables a cubicar

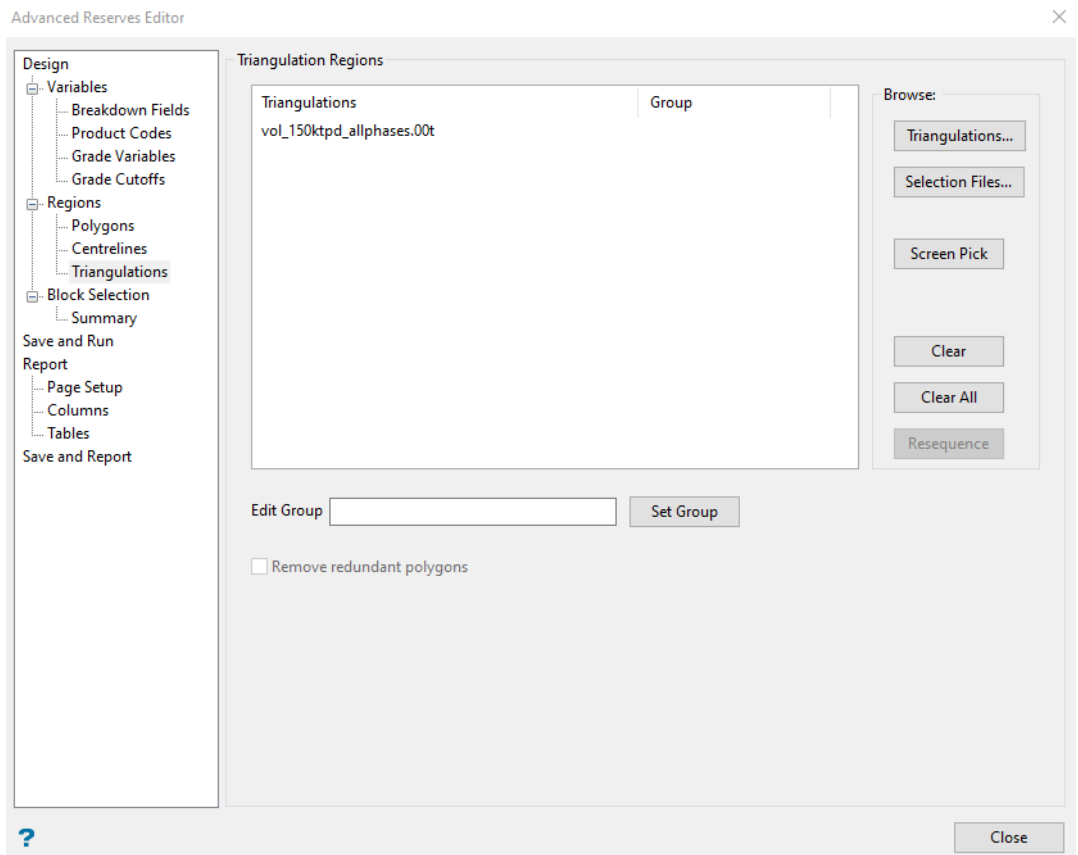


Figura 29. Selección triangulación donde se va a cubicar

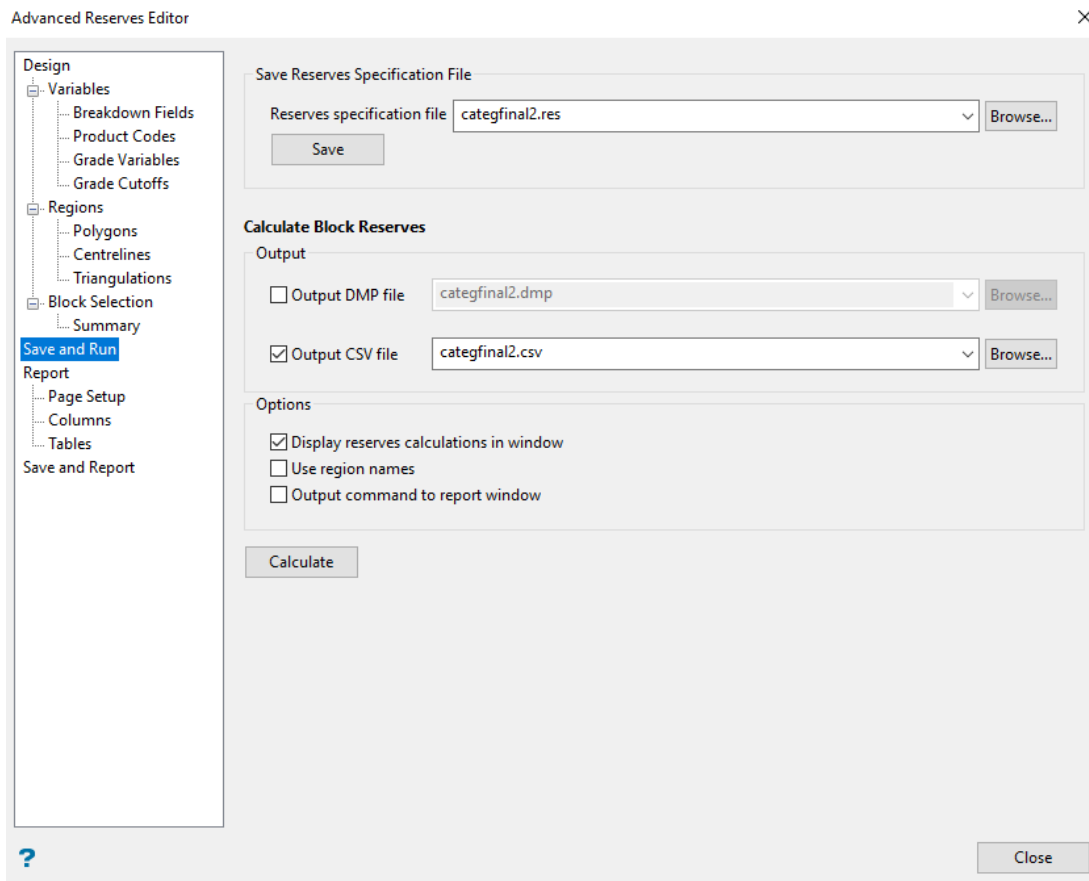


Figura 30. Guardado y ejecución

- **Anexo C. Curvas tonelaje-ley**

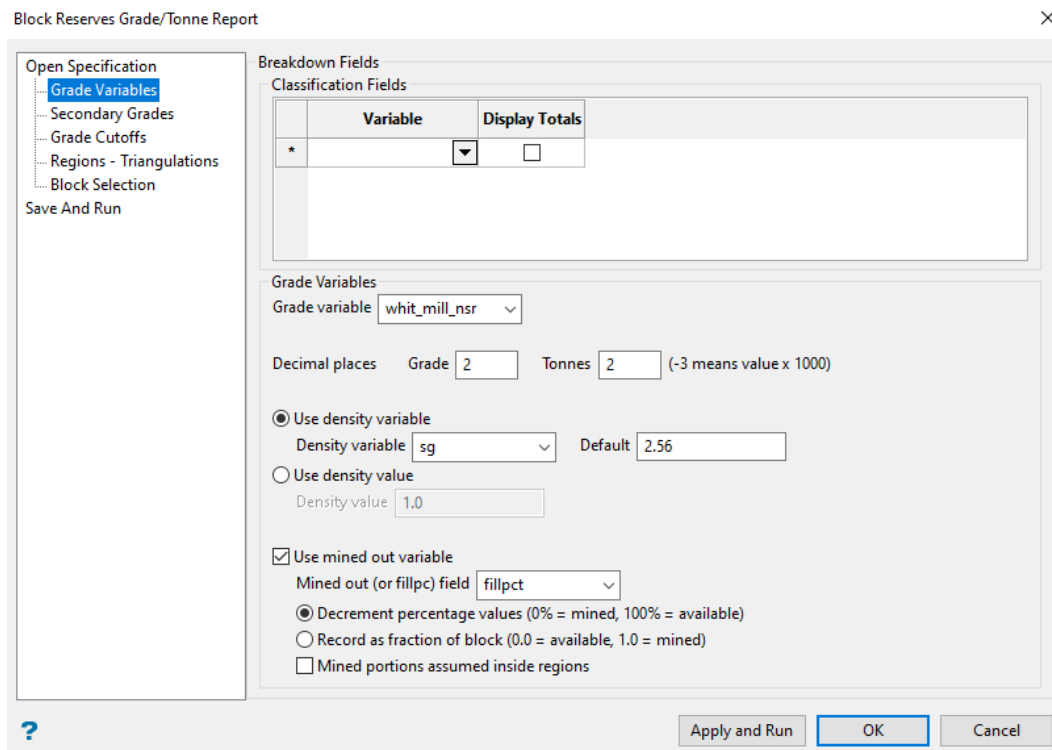


Figura 31. Selección variable de grado principal (Lixiviación o flotación)

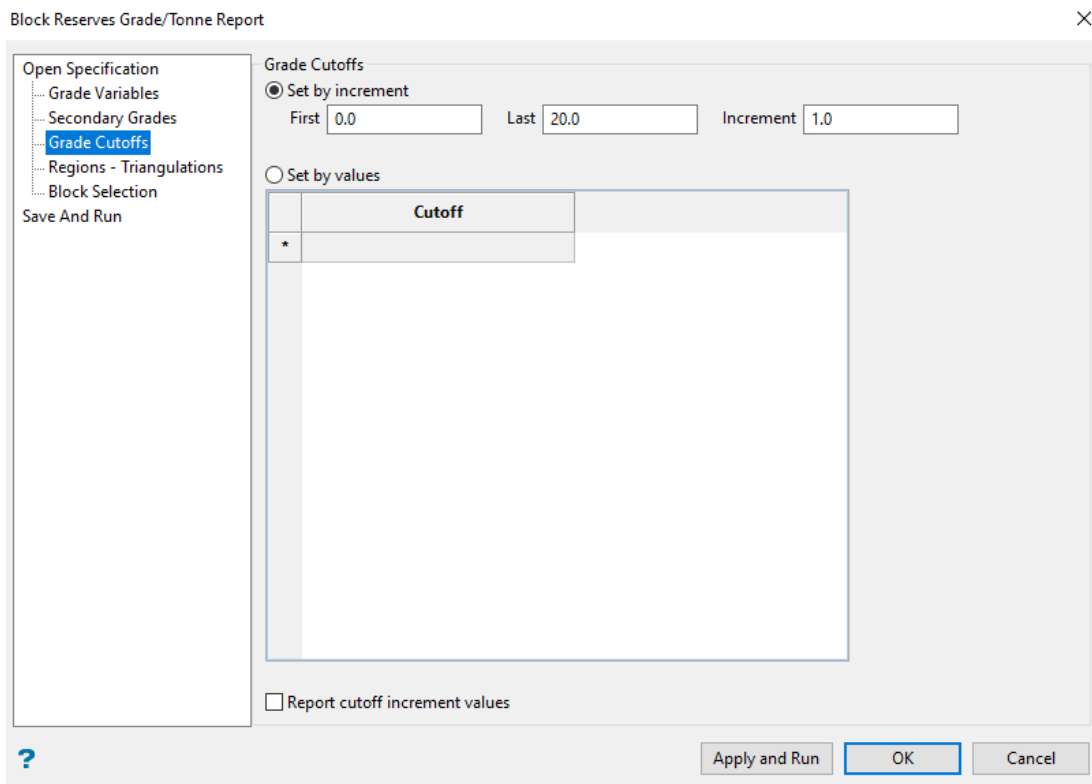


Figura 32. Selección ley de corte por incremento

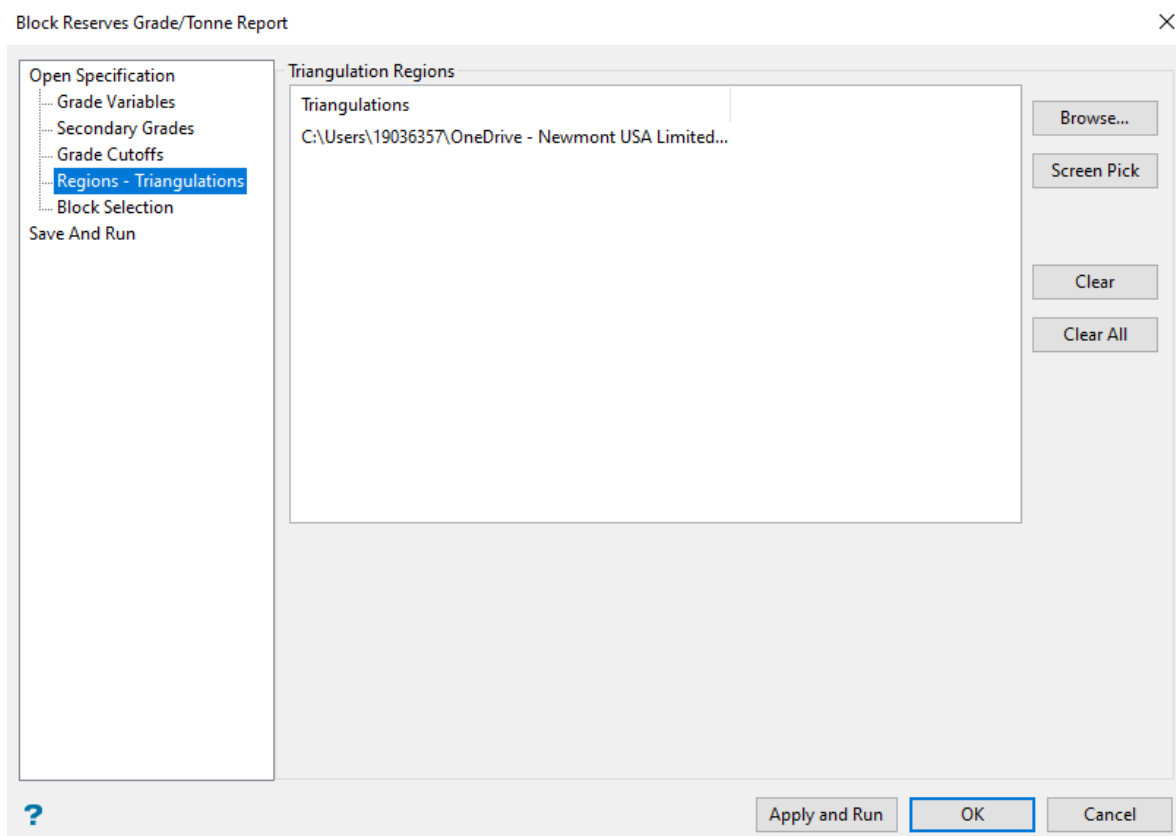


Figura 33. Selección triangulación

Block Reserves Grade/Tonne Report

Open Specification
 Grade Variables
 Secondary Grades
 Grade Cutoffs
 Regions - Triangulations
Block Selection
 Save And Run

Block Selection

☐ All blocks

☒ Specific blocks

☐ Variable

☒ Condition

☐ Bounding triangulation

Triangulation Browse...

☐ Section thickness Define section

☐ Use bounding surfaces

Upper triangulation Browse...

Lower triangulation Browse...

☐ Use bounding box

Block model coordinates (X, Y, Z CENTRE) should be used

Minimum X Maximum X

Minimum Y Maximum Y

Minimum Z Maximum Z

Interactive box

☐ Use block centroids ☒ Proportional cell evaluation

Apply and Run OK Cancel

Figura 34. Selección de bloques por condición (Lixiviación o flotación)

- Anexo D. Generación variables

Add Block Model Variable

Block Model

Browse...

Add Variables

	Variable	Type	Default Value	Description	Condition
*		Double	-99.0		Empty

OK Cancel

Figura 35. Menú crear variable

Block Calculation

Block model: C:\Users\19036357\OneDrive - Newmont USA Limited\Escritorio\VulcanVparra\cca_rbk_2019_09jan2020_rev2023_VP_Final.bmf

Variable name

Calculation =

☐ Recurse calculation through a triangulation selection file

Selection file Browse... Build

OK Cancel

Figura 36. Menú de cálculo

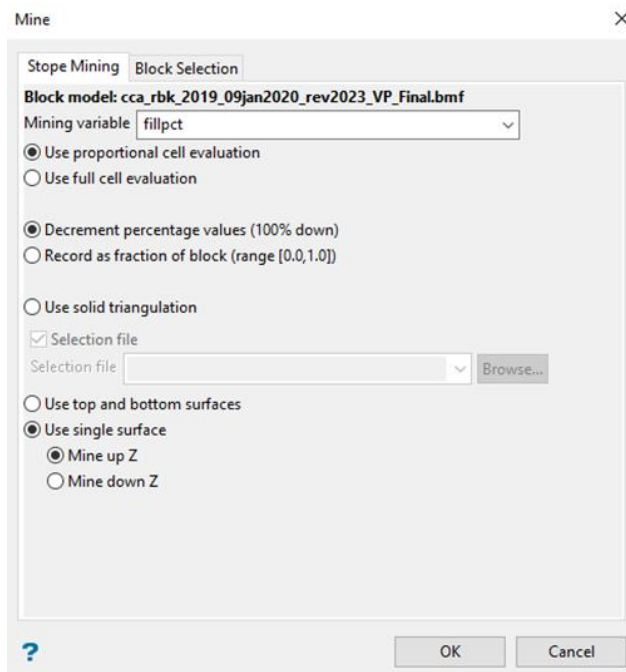


Figura 37. Menú minado

- Anexo E. Optimización de Pit Caso Base

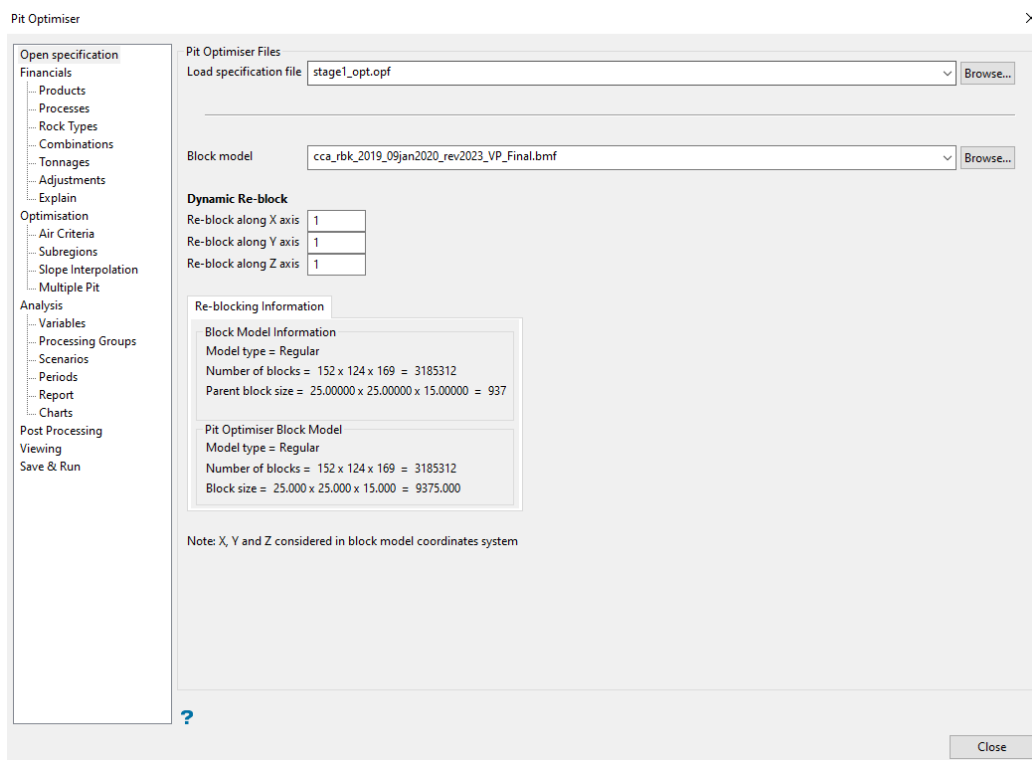


Figura 38. Nombre de archivo y selección modelo de bloques

Pit Optimiser

Open specification

- Financials
 - Products
 - Processes
 - Rock Types
 - Combinations
 - Tonnages
 - Adjustments
 - Explain
- Optimisation
 - Air Criteria
 - Subregions
 - Slope Interpolation
 - Multiple Pit
- Analysis
 - Variables
 - Processing Groups
 - Scenarios
 - Periods
 - Report
 - Charts
- Post Processing
- Viewing
- Save & Run

Economic Block Value

☐ Supply Economic Value

☐ Create variable Block value variable

☐ Run script Run script

☒ Calculate Economic Value

☐ Use single product / process / rock type method

☒ Use multiple product / process / rock type method

Currency units

Selection criteria to decide if a block is worth processing

☐ By cutoff

☒ By revenue

Sub-block process mode

☒ Send all sub-blocks to the same process.

☐ Best process for each sub-block.

?

Figura 39. Parámetros financieros

Pit Optimiser

Open specification

- Financials
 - Products
 - Processes
 - Rock Types
 - Combinations
 - Tonnages
 - Adjustments
 - Explain
- Optimisation
 - Air Criteria
 - Subregions
 - Slope Interpolation
 - Multiple Pit
- Analysis
 - Variables
 - Processing Groups
 - Scenarios
 - Periods
 - Report
 - Charts
- Post Processing
- Viewing
- Save & Run

Products

Grade 1 Grade 2 Grade 3

Base price US\$ per

☐ Add Premiums/Penalties from variable

Product Units

☒ Calculate units

Grade variable

☐ Supply units

Units of product variable

Values measured in per

Selling Cost

Cost to sell a unit of recovered product

☒ Use selling cost value ☐ Variable

Selling cost measured in US\$ per

Figura 40. Datos de entrada para el oro (Caso Base)

Pit Optimiser

Open specification

Financials

- Products
- Processes
- Rock Types
- Combinations
- Tonnages
- Adjustments
- Explain

Optimisation

- Air Criteria
- Subregions
- Slope Interpolation
- Multiple Pit

Analysis

- Variables
- Processing Groups
- Scenarios
- Periods
- Report
- Charts

Post Processing

Viewing

Save & Run

Products

Grade 1 Grade 2 Grade 3

Base price 16.0 US\$ per ounce troy (oz t)

☐ Add Premiums/Penalties from variable

Product Units

☒ Calculate units

Grade variable age_ppm

☐ Supply units

Units of product variable

Values measured in weight ppm (pp) per metric tonne (t)

Selling Cost

Cost to sell a unit of recovered product

☒ Use selling cost value 1.0 ☐ Variable

Selling cost measured in US\$ per ounce troy (oz t)

Add Product Remove Last

Figura 41. Datos de entrada para la plata (Caso Base)

Pit Optimiser

Open specification

Financials

- Products
- Processes
- Rock Types
- Combinations
- Tonnages
- Adjustments
- Explain

Optimisation

- Air Criteria
- Subregions
- Slope Interpolation
- Multiple Pit

Analysis

- Variables
- Processing Groups
- Scenarios
- Periods
- Report
- Charts

Post Processing

Viewing

Save & Run

Products

Grade 1 Grade 2 Grade 3

Base price 2.75 US\$ per pound (lb av)

☐ Add Premiums/Penalties from variable

Product Units

☒ Calculate units

Grade variable cue_pct

☐ Supply units

Units of product variable

Values measured in weight percent (wt) per metric tonne (t)

Selling Cost

Cost to sell a unit of recovered product

☒ Use selling cost value 0.4 ☐ Variable

Selling cost measured in US\$ per pound (lb av)

Add Product Remove Last

Figura 42. Datos de entrada para el cobre (Caso Base)

Open specification

- Financials
 - Products
 - Processes
 - Rock Types
 - Combinations
 - Tonnages
 - Adjustments
 - Explain
- Optimisation
 - Air Criteria
 - Subregions
 - Slope Interpolation
 - Multiple Pit
- Analysis
 - Variables
 - Processing Groups
 - Scenarios
 - Periods
 - Report
 - Charts
- Post Processing
- Viewing
- Save & Run

Processes

Indicate the name for the processes

	Process Name
1	HL
2	Flot
*	

Processing cost adjustment factor (PCAF)

☒ Use PCAF value
☐ Variable

Figura 43. Procesos (Lixiviación y Flotación)⁸

Pit Optimiser

Rock Types

Rock type variable

	Rock Type	Mining Cost Adjustment Factor	Rehabilitation Cost
1	2	1.0	0.0
2	3	1.0	0.0
3	4	1.0	0.0
4	5	1.0	0.0
5	6	1.0	0.0
*		1.0	0.0

☐ Use rock type mining cost adjustment factor variable

Default rock type mining cost adjustment factor value

☐ Use rehabilitation cost variable

Default rehabilitation cost value

Rehabilitation cost measured in US\$ per

?

Close

Figura 44. Tipos de mineralogía

⁸ HL: lixiviación, Flot: flotación

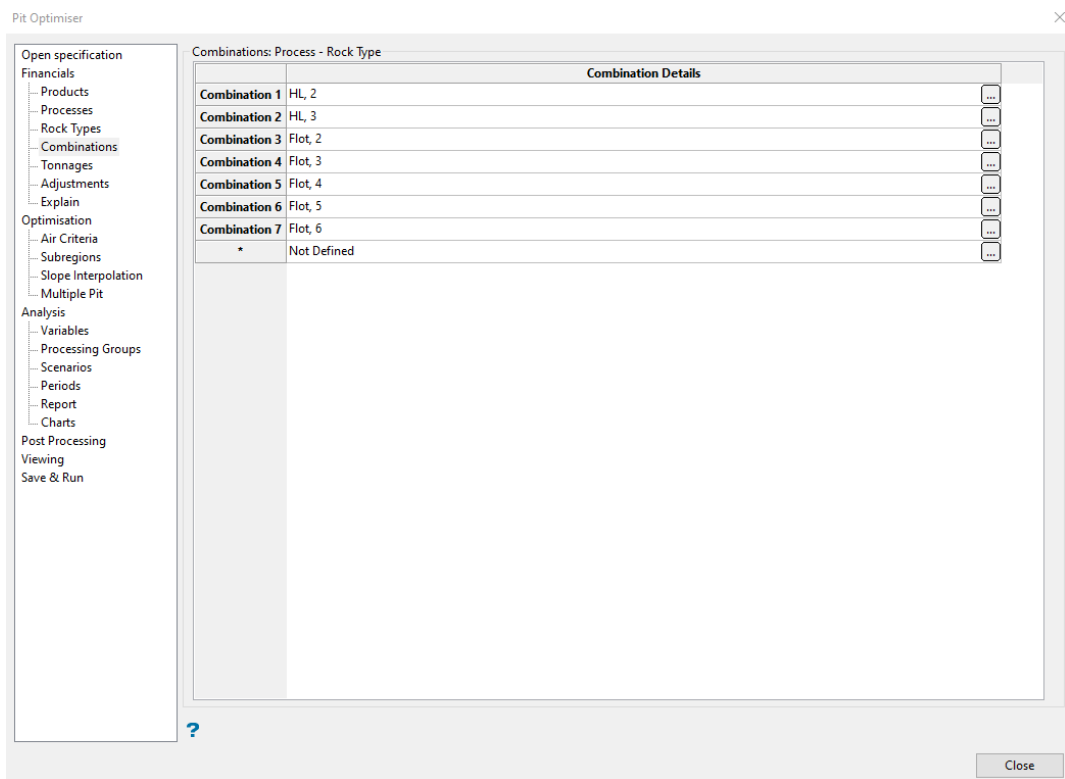


Figura 45. Combinaciones procesos con mineralogía

Combination Definition

Process: HL

Rock type: 2

Rock type processing cost

☒ Value: 5.25

☐ Variable:

Processing cost measured in per metric tonne (t)

Use contaminant in the combination ☒

Variable	Min.Grade	Max.Grade
categ	0.9	3.1
	0.0	0.0

Products

Grade 1 Grade 2 Grade 3

Product: aue_ppm

☐ Use cut-off: Min. 0.0 Max. 0.0

☐ Use threshold grade: 0.0

Grades measured in weight percent per metric tonne (t)

Recovery fraction

☐ Value: 1.0 ☒ Variable: rec_aui

Cost to process a unit of available product

☒ Value: 0.0 ☐ Variable:

Cost measured in per metric tonne (t)

Add Grade Remove Last

OK Cancel

Figura 46. Recuperación caso base de Au por HL en mineralog 2

Combination Definition

Process: HL

Rock type: 2

Rock type processing cost: Value 5.25

Processing cost measured in per metric tonne (t)

Use contaminant in the combination: ☒

Variable	Min.Grade	Max.Grade
categ	0.9	3.1
	0.0	0.0

Products

Grade 1 Grade 2 Grade 3

Product: age_ppm

Use cut-off: Min. 0.0 Max. 0.0

Use threshold grade: 0.0

Grades measured in per

Recovery fraction

Value 1.0 Variable rec_ag_hl

Cost to process a unit of available product

Value 0.0 Variable

Cost measured in per metric tonne (t)

Add Grade Remove Last

OK Cancel

Figura 47. Recuperación caso base de Ag por HL en mineralog 2

Combination Definition

Process: HL

Rock type: 2

Rock type processing cost: Value 5.25

Processing cost measured in per metric tonne (t)

Use contaminant in the combination: ☒

Variable	Min.Grade	Max.Grade
categ	0.9	3.1
	0.0	0.0

Products

Grade 1 Grade 2 Grade 3

Product: cue_pct

Use cut-off: Min. 0.0 Max. 0.0

Use threshold grade: 0.0

Grades measured in per

Recovery fraction

Value 1.0 Variable rec_cu_hl

Cost to process a unit of available product

Value 0.0 Variable

Cost measured in per metric tonne (t)

Add Grade Remove Last

OK Cancel

Figura 48. Recuperación caso base de Cu por HL en mineralog 2⁹

⁹ Se repite el mismo proceso para la combinación lixiviación y mineralog 3

Combination Definition

Process: Flot

Rock type: 2

Rock type processing cost: ☒ Value: 10.38

Processing cost measured in: per metric tonne (t)

☒ Use contaminant in the combination

Variable	Min.Grade	Max.Grade
categ	0.9	3.1
	0.0	0.0

Products

Grade 1 Grade 2 Grade 3

Product: aue_ppm

☐ Use cut-off: Min. 0.0 Max. 0.0

☐ Use threshold grade: 0.0

Grades measured in: per

Recovery fraction: ☐ Value: 1.0 ☒ Variable: rec_au_total

Cost to process a unit of available product: ☒ Value: 0.0 ☐ Variable:

Cost measured in: per metric tonne (t)

Add Grade Remove Last

OK Cancel

Figura 49. Recuperación caso base de Au por Flot en mineralog 2

Combination Definition

Process: Flot

Rock type: 2

Rock type processing cost: ☒ Value: 10.38

Processing cost measured in: per metric tonne (t)

☒ Use contaminant in the combination

Variable	Min.Grade	Max.Grade
categ	0.9	3.1
	0.0	0.0

Products

Grade 1 Grade 2 Grade 3

Product: age_ppm

☐ Use cut-off: Min. 0.0 Max. 0.0

☐ Use threshold grade: 0.0

Grades measured in: per

Recovery fraction: ☐ Value: 1.0 ☒ Variable: rec_ag_total

Cost to process a unit of available product: ☒ Value: 0.0 ☐ Variable:

Cost measured in: per metric tonne (t)

Add Grade Remove Last

OK Cancel

Figura 50. Recuperación caso base de Ag por Flot en mineralog 2

Combination Definition

Process: Flot

Rock type: 2

Rock type processing cost: ☒ Value: 10.38 ☐ Variable:

Processing cost measured in: per metric tonne (t)

Use contaminant in the combination: ☒

Variable	Min.Grade	Max.Grade
categ	0.9	3.1
	0.0	0.0

Products

Grade 1 Grade 2 Grade 3

Product: cue_pct

☐ Use cut-off: Min. 0.0 Max. 0.0

☐ Use threshold grade: 0.0

Grades measured in: per

Recovery fraction: ☐ Value: 1.0 ☒ Variable: rec_cu_flot

Cost to process a unit of available product: ☒ Value: 0.0 ☐ Variable:

Cost measured in: per metric tonne (t)

Add Grade Remove Last

OK Cancel

Figura 51. Recuperación caso base de Cu por Flot en mineralog 2¹⁰

Pit Optimiser

Open specification

Financials

Products

Processes

Rock Types

Combinations

Tonnages

Adjustments

Explain

Optimisation

Air Criteria

Subregions

Slope Interpolation

Multiple Pit

Analysis

Variables

Processing Groups

Scenarios

Periods

Report

Charts

Post Processing

Viewing

Save & Run

Tonnage

Block/SubCell Tonnage

☒ Calculate block tonnage

☐ Use density value: 1.0

☒ Use density variable: sg Default: 2.56

☒ Handle partially mined blocks

☐ Use air variable: fillpct

☒ Use rock variable: fillpct

Values are: %

☐ Supply block tonnage

Tonnage variable:

Tonnage measured in: metric tonne (t)

Mining Cost

Cost to mine a ton of rock: ☒ Use mining cost value: 1.47 ☐ Variable:

Cost measured in: US\$ per metric tonne (t)

Positional mining cost adjustment factor (PMCAF): ☐ Use PMCAF value: 1.0 ☒ Variable: mcaf_stage1

Mining dilution factor: 1.0

Mining recovery factor: 1.0

?

Close

Figura 52. Densidad, variable minado, tonelaje, costo mina y mcaf

¹⁰ Se repite el mismo proceso para las combinaciones de Flot con mineralog 3-6

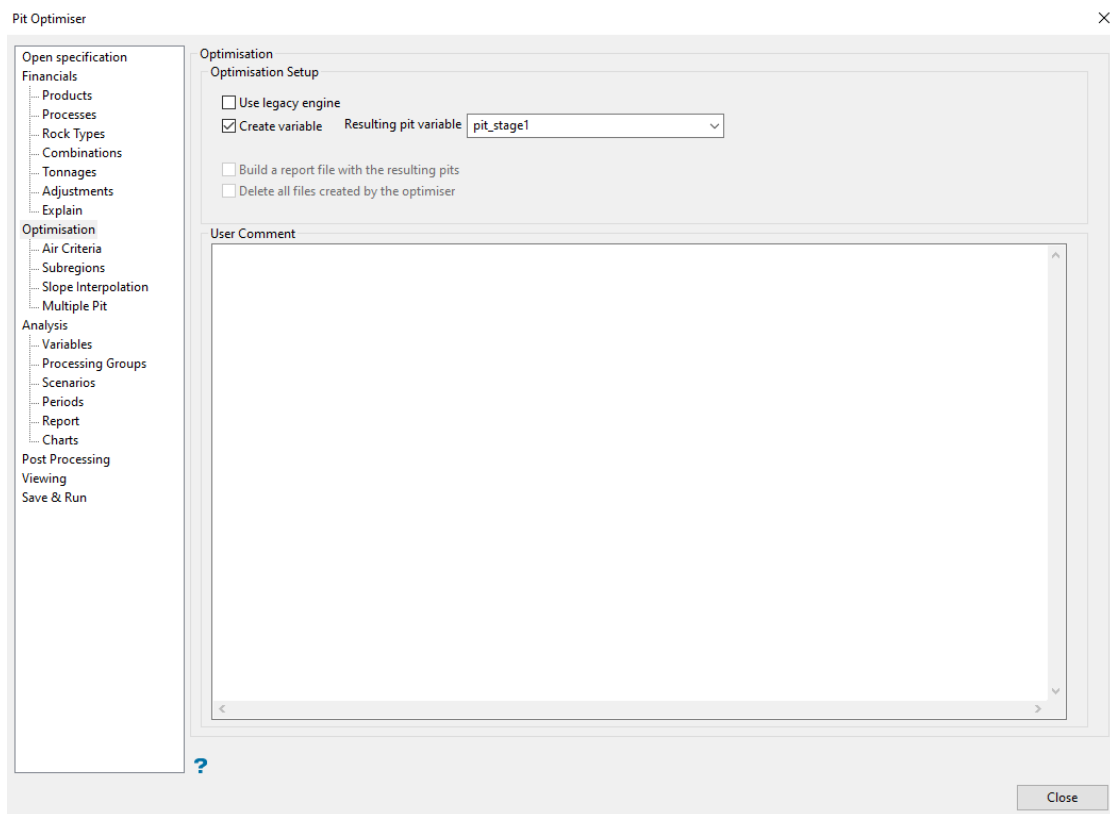


Figura 53. Creación de variable pit Caso Base

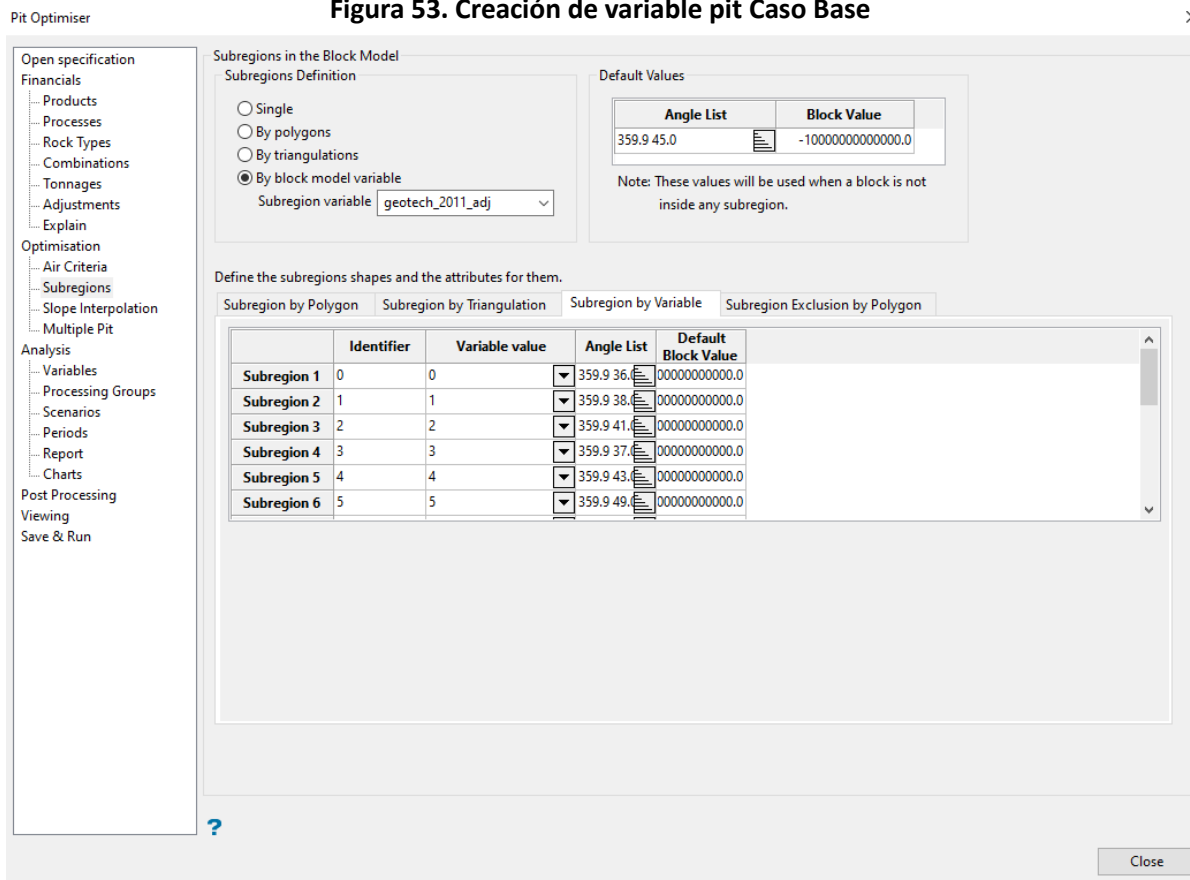


Figura 54. Ángulos de talud Caso Base

Pit Optimiser

Open specification
Financials
Products
Processes
Rock Types
Combinations
Tonnages
Adjustments
Explain
Optimisation
Air Criteria
Subregions
Slope Interpolation
Multiple Pit
Analysis
Variables
Processing Groups
Scenarios
Periods
Report
Charts
Post Processing
Viewing
Save & Run

☒ Multiple Pit Analysis
☐ Use decrements ☒ Use revenue/cost factors

Decrements
☒ Limit Number of Pits
Maximum number of pits 500
☒ Use constant decrements of \$(currency_units) 100.0 in block value
☐ Use decrements of 10.0 % in block value
☐ Specify Initial Number of Decrements
Initial number of decrements 600

Revenue Factors
☒ Set by Decrement
Select the field to compute
☐ Major ☐ Minor ☐ Decrement ☒ Number
1.3 0.3 0.02 51
☐ Set by Values
Factor
*
Use factors as Revenue factor for all products
Product number 1
☐ Use the factor list as a price list

Product price

Factor	Product 1	Product 2	Product 3
1.3	1625.0	20.8	3.575
1.28	1600.0	20.48	3.52
1.26	1575.0	20.16	3.465
1.24	1550.0	19.84	3.41
1.22	1525.0	19.52	3.355
1.2	1500.0	19.2	3.3
1.18	1475.0	18.88	3.245
1.16	1450.0	18.56	3.19
1.14	1425.0	18.24	3.135

Close

Figura 55. Análisis pit by pit (Revenue factor de 0.3 a 1.3)

Pit Optimiser

Open specification
Financials
Products
Processes
Rock Types
Combinations
Tonnages
Adjustments
Explain
Optimisation
Air Criteria
Subregions
Slope Interpolation
Multiple Pit
Analysis
Variables
Processing Groups
Scenarios
Periods
Report
Charts
Post Processing
Viewing
Save & Run

Analysis
Analysis Setup
☒ Generate reports
☒ Generate charts
☒ Best case
☒ Worst case
☐ Bench lag
Base name for excel workbook 1_stage1
☒ Open excel on completion
User Comment
Export to .dmp
Base name for .dmp file Scenario
☐ Fold by combination

Close

Figura 56. Generación de análisis Caso Base

Pit Optimiser

Open specification

- Financials
 - Products
 - Processes
 - Rock Types
 - Combinations
 - Tonnages
 - Adjustments
 - Explain
- Optimisation
 - Air Criteria
 - Subregions
 - Slope Interpolation
 - Multiple Pit
- Analysis
 - Variables
 - Processing Groups
 - Scenarios
 - Periods
 - Report
 - Charts
- Post Processing
 - Viewing
 - Save & Run

Variables

Pit

Pit variable: pit_stage1

☒ Use all pits
☐ Specify final pit: 1

☒ Report by pit variable
☐ Report by group of pits as phases

	Last Pit
*	

☐ Output phase to block model
 Phase variable:

Bench

☐ Use bench number
☒ Use bench level
☒ Toe ☐ Mid ☐ Crest

☒ Use constant lag: 1
☐ Use different lags:

Block/SubCell Tonnage

☒ Calculate block tonnage
☒ Use density value: 1.0
☐ Use density variable: Default: 0.0

☐ Supply block tonnage
 Tonnage variable:

Tonnage measured in:

Product

Recovered product variable:

Product measured in:

Close

Figura 57. Análisis pit by pit Caso Base

Pit Optimiser

Open specification

- Financials
 - Products
 - Processes
 - Rock Types
 - Combinations
 - Tonnages
 - Adjustments
 - Explain
- Optimisation
 - Air Criteria
 - Subregions
 - Slope Interpolation
 - Multiple Pit
- Analysis
 - Variables
 - Processing Groups
 - Scenarios
 - Periods
 - Report
 - Charts
- Post Processing
 - Viewing
 - Save & Run

Define processing groups

	Group name	Processes
1	HL	HL
2	Flotation	Flot
*		

Close

Figura 58. Grupos de procesamiento

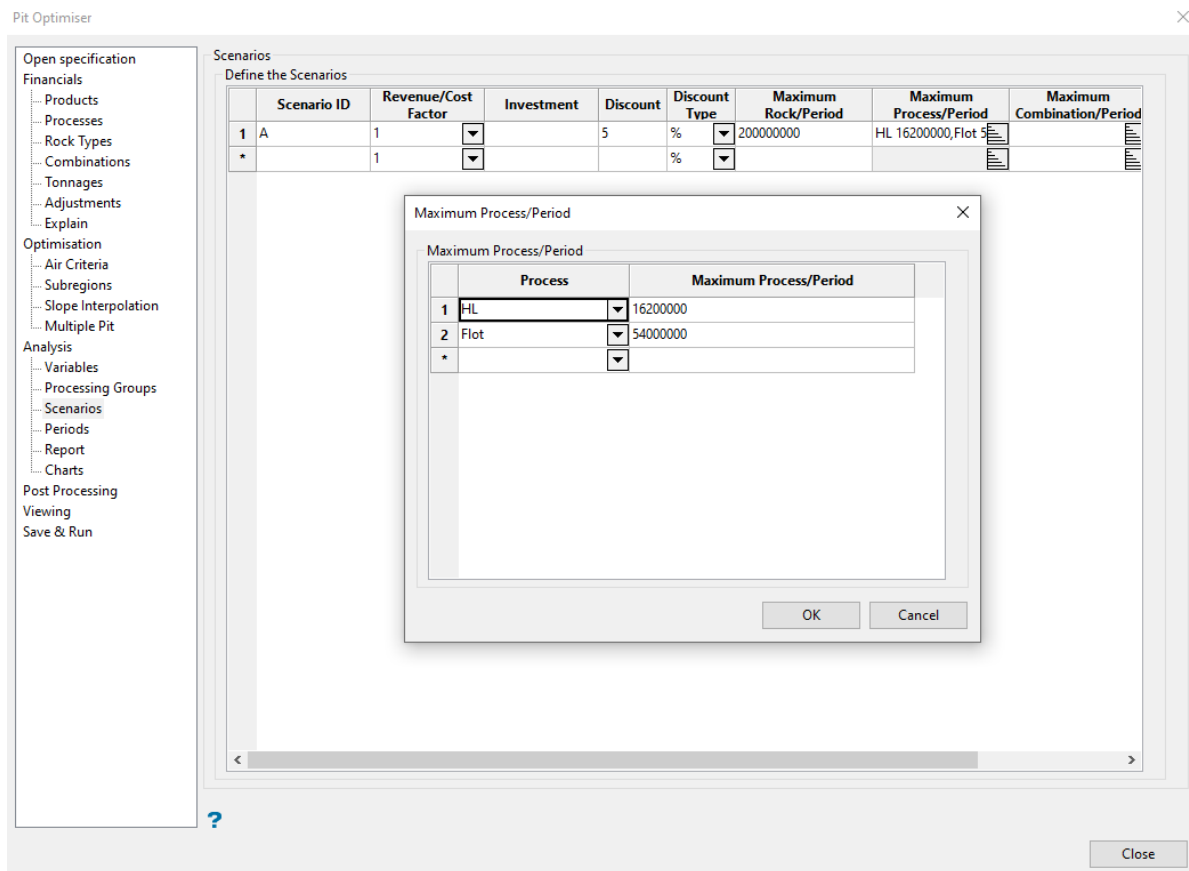


Figura 59. Selección escenario

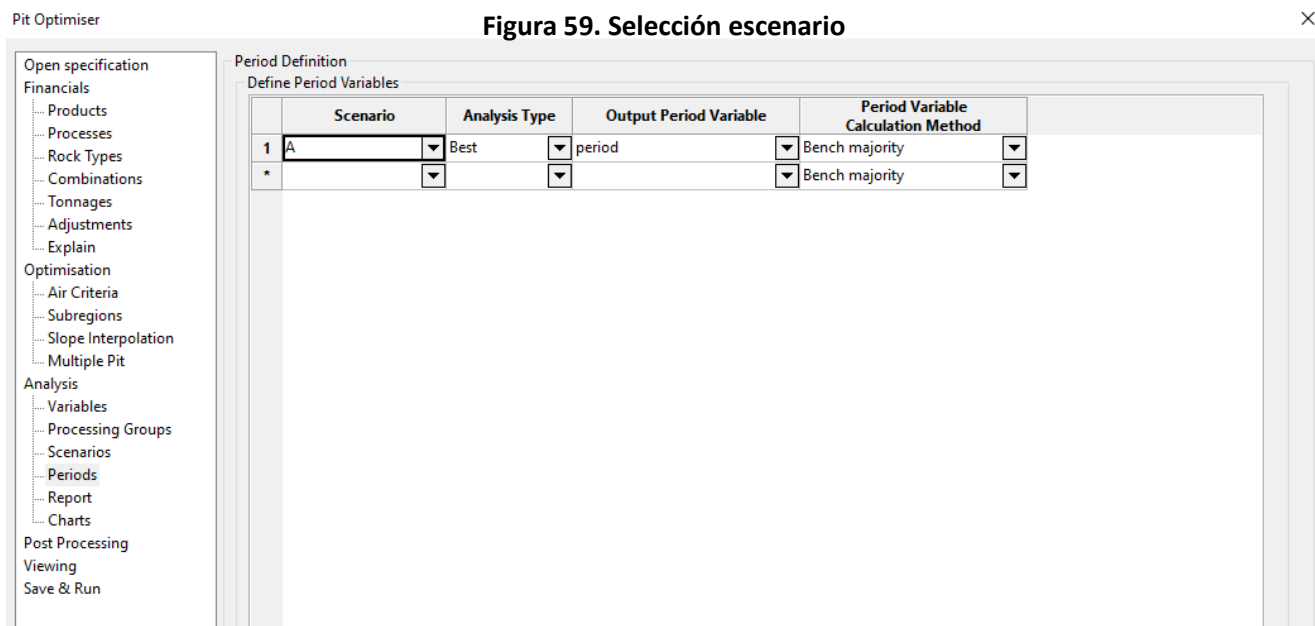


Figura 60. Generación de periodos de operación para el escenario

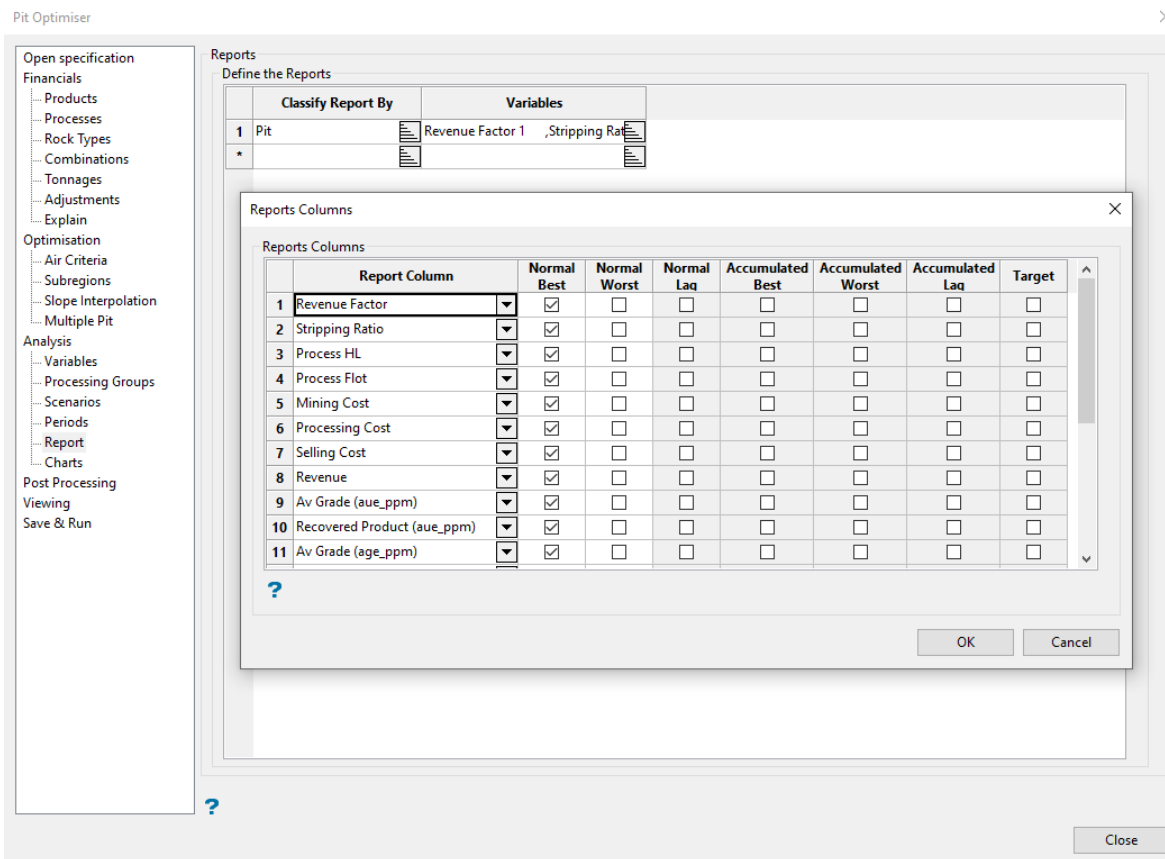


Figura 61. Selección de información necesaria para análisis

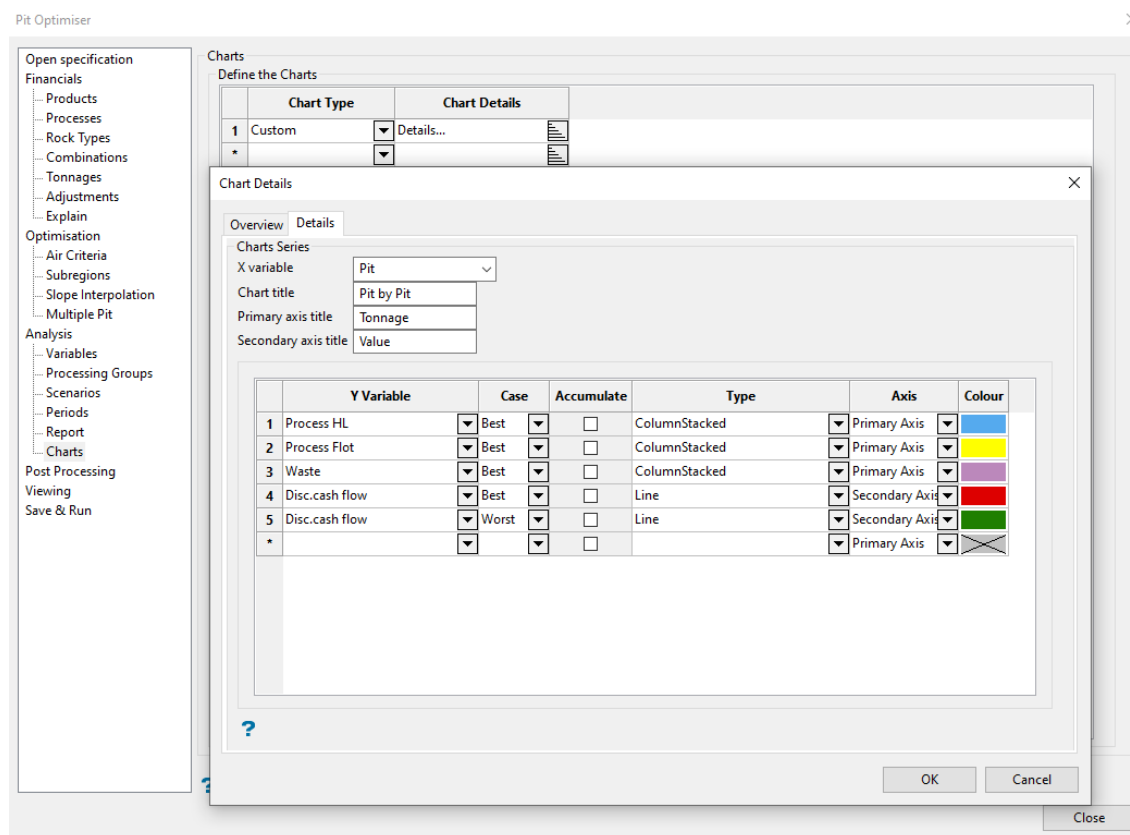


Figura 62. Creación gráficos

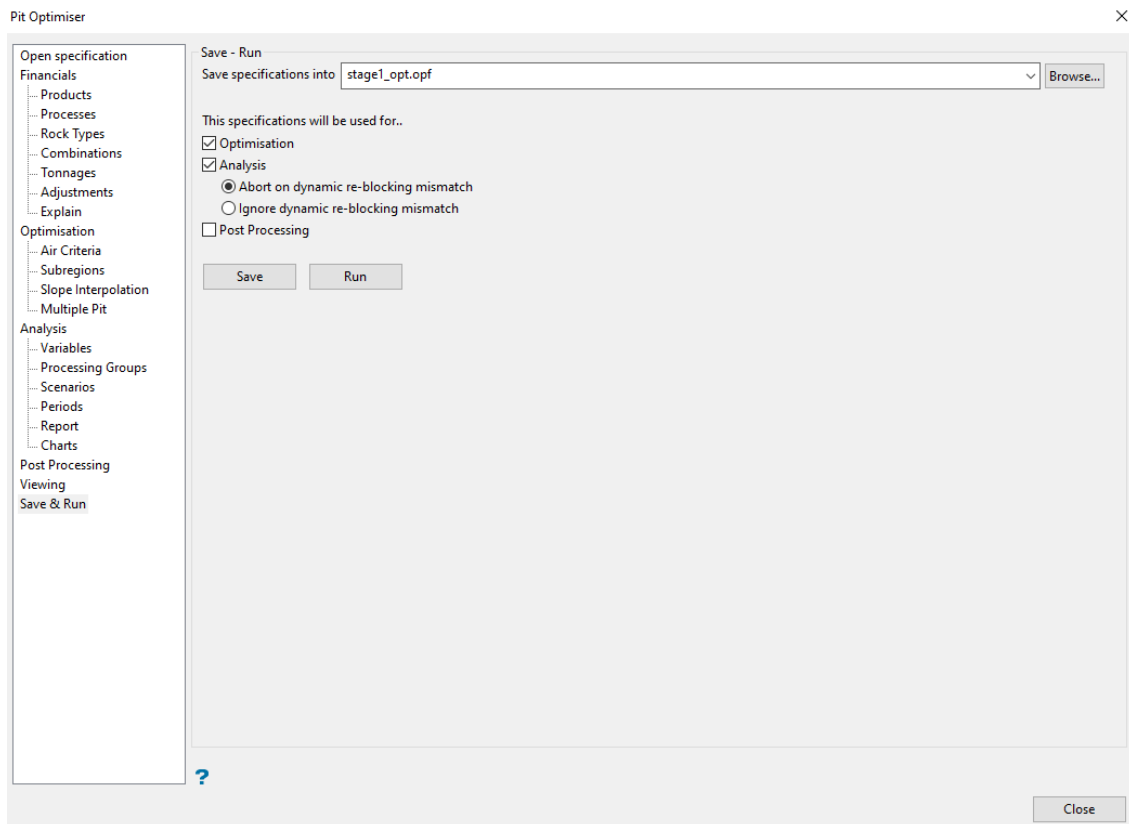


Figura 63. Guardado y ejecución

- Anexo F. Optimización 2023

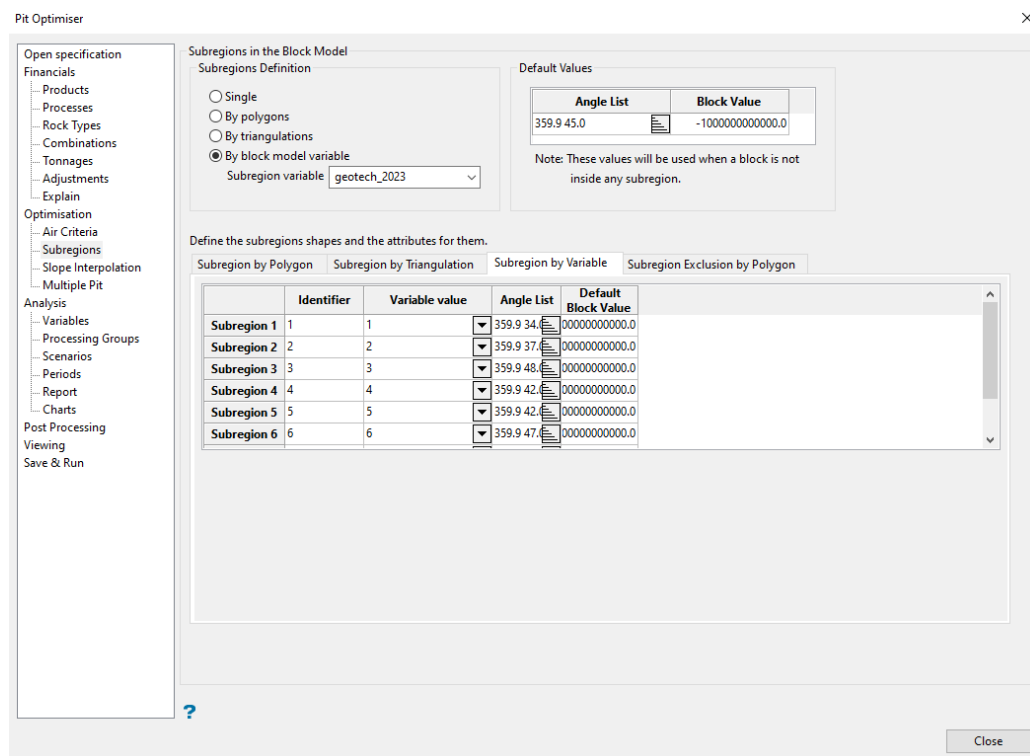


Figura 64. Selección nuevos ángulos de talud

Open specification

Financials

- Products
- Processes
- Rock Types
- Combinations
- Tonnages
- Adjustments
- Explain

Optimisation

- Air Criteria
- Subregions
- Slope Interpolation
- Multiple Pit

Analysis

- Variables
- Processing Groups
- Scenarios
- Periods
- Report
- Charts

Post Processing

Viewing

Save & Run

Combinations: Process - Rock Type

Combination Details		
Combination 1	HL, 2	...
Combination 2	HL, 3	...
Combination 3	HL, 4	...
Combination 4	HL, 5	...
Combination 5	HL, 6	...
Combination 6	Flot, 2	...
Combination 7	Flot, 3	...
Combination 8	Flot, 4	...
Combination 9	Flot, 5	...
Combination 10	Flot, 6	...
*	Not Defined	...

Figura 65. Combinaciones recuperaciones 2023

Combination Definition

Process: HL

Rock type: 2

Rock type processing cost

☒ Value: 5.25

☐ Variable

Processing cost measured in per metric tonne (t)

Use contaminant in the combination ☒

Variable	Min.Grade	Max.Grade
categ	0.9	3.1
	0.0	0.0

Products

Grade 1 Grade 2 Grade 3

Product: aue_ppm

☐ Use cut-off: Min. 0.0 Max. 0.0

☐ Use threshold grade 0.0

Grades measured in weight percent per metric tonne (t)

Recovery fraction

☒ Value: 0.7

☐ Variable: rec2023_au_hl

Cost to process a unit of available product

☒ Value: 0.0

☐ Variable

Cost measured in per metric tonne (t)

Add Grade Remove Last

OK Cancel

Figura 66. Recuperación de Au por HL en mineralog 2 (Caso Proyecto)

Combination Definition ✕

Process: HL ☒ Use contaminant in the combination

Rock type: 2

Variable	Min.Grade	Max.Grade
categ	0.9	3.1
	0.0	0.0

Rock type processing cost

☒ Value: 5.25 ☐ Variable:

Processing cost measured in per metric tonne (t)

Products

Grade 1 Grade 2 Grade 3

Product: age_ppm

☐ Use cut-off: Min. 0.0 Max. 0.0

☐ Use threshold grade: 0.0

Grades measured in per

Recovery fraction

☒ Value: 0.28 ☐ Variable: rec2023_ag_hl

Cost to process a unit of available product

☒ Value: 0.0 ☐ Variable:

Cost measured in per metric tonne (t)

Add Grade Remove Last

OK Cancel

Figura 67. Recuperación de Ag por HL en mineralog 2 (Caso Proyecto)

Combination Definition ✕

Process: HL ☒ Use contaminant in the combination

Rock type: 2

Variable	Min.Grade	Max.Grade
categ	0.9	3.1
	0.0	0.0

Rock type processing cost

☒ Value: 5.25 ☐ Variable:

Processing cost measured in per metric tonne (t)

Products

Grade 1 Grade 2 Grade 3

Product: cue_pct

☐ Use cut-off: Min. 0.0 Max. 0.0

☐ Use threshold grade: 0.0

Grades measured in per

Recovery fraction

☒ Value: 0.08 ☐ Variable: rec2023_cu_hl

Cost to process a unit of available product

☒ Value: 0.0 ☐ Variable:

Cost measured in per metric tonne (t)

Add Grade Remove Last

OK Cancel

Figura 68. Recuperación de Cu por HL en mineralog 2 (Caso Proyecto)¹¹

¹¹ Se repiten para proceso HL y mineralog 3-6

Combination Definition

Process: Flot

Rock type: 2

Rock type processing cost: ☒ Value: 10.38 ☐ Variable:

Processing cost measured in per: metric tonne (t)

☒ Use contaminant in the combination

Variable	Min.Grade	Max.Grade
categ	0.9	3.1
	0.0	0.0

Products

Grade 1 Grade 2 Grade 3

Product: aue_ppm

☐ Use cut-off: Min. 0.0 Max. 0.0

☐ Use threshold grade: 0.0

Grades measured in: weight percent per metric tonne (t)

Recovery fraction: ☒ Value: 0.5 ☐ Variable: rec2023_au_flot

Cost to process a unit of available product: ☒ Value: 0.0 ☐ Variable:

Cost measured in per: metric tonne (t)

Add Grade Remove Last

OK Cancel

Figura 69. Recuperación de Au por HL en mineralog 2 (Caso Proyecto)

Combination Definition

Process: Flot

Rock type: 2

Rock type processing cost: ☒ Value: 10.38 ☐ Variable:

Processing cost measured in per: metric tonne (t)

☒ Use contaminant in the combination

Variable	Min.Grade	Max.Grade
categ	0.9	3.1
	0.0	0.0

Products

Grade 1 Grade 2 Grade 3

Product: age_ppm

☐ Use cut-off: Min. 0.0 Max. 0.0

☐ Use threshold grade: 0.0

Grades measured in: per

Recovery fraction: ☒ Value: 0.2 ☐ Variable: rec2023_ag_flot

Cost to process a unit of available product: ☒ Value: 0.0 ☐ Variable:

Cost measured in per: metric tonne (t)

Add Grade Remove Last

OK Cancel

Figura 70. Recuperación de Ag por HL en mineralog 2 (Caso Proyecto)

Combination Definition

Process: Flot

Rock type: 2

Rock type processing cost: Value 10.38

Processing cost measured in per metric tonne (t)

Use contaminant in the combination: ☒

Variable	Min.Grade	Max.Grade
categ	0.9	3.1
	0.0	0.0

Products

Grade 1 Grade 2 Grade 3

Product: cue_pct

Use cut-off: Min. 0.0 Max. 0.0

Use threshold grade: 0.0

Grades measured in per

Recovery fraction: Value 0.34 Variable rec2023_cu_flot

Cost to process a unit of available product: Value 0.0 Variable

Cost measured in per metric tonne (t)

Add Grade Remove Last

OK Cancel

Figura 71. Recuperación de Cu por HL en mineralog 2 (Caso Proyecto)¹²

Pit Optimiser

Open specification

- Financials
 - Products
 - Processes
 - Rock Types
 - Combinations
 - Tonnages
 - Adjustments
 - Explain
- Optimisation
 - Air Criteria
 - Subregions
 - Slope Interpolation
 - Multiple Pit
- Analysis
 - Variables
 - Processing Groups
 - Scenarios
 - Periods
 - Report
 - Charts
- Post Processing
- Viewing
- Save & Run

Products

Grade 1 Grade 2 Grade 3

Base price: 1400.0 US\$ per ounce troy (oz t)

Add Premiums/Penalties from variable

Product Units

Calculate units

Grade variable: aue_ppm

Supply units

Units of product variable

Values measured in weight ppm (pp) per

Selling Cost

Cost to sell a unit of recovered product: Use selling cost value 5.0 Variable

Selling cost measured in US\$ per ounce troy (oz t)

Add Product Remove Last

Figura 72. Nuevo precio oro

¹² Se repiten para proceso Flot y mineralog 3-6

Pit Optimiser

Open specification

Financials

- Products
- Processes
- Rock Types
- Combinations
- Tonnages
- Adjustments
- Explain

Optimisation

- Air Criteria
- Subregions
- Slope Interpolation
- Multiple Pit

Analysis

- Variables
- Processing Groups
- Scenarios
- Periods
- Report
- Charts

Post Processing

Viewing

Save & Run

Products

Grade 1 Grade 2 Grade 3

Base price 20.0 US\$ per ounce troy (oz t) ▾

☐ Add Premiums/Penalties from variable ▾

Product Units

☒ Calculate units

Grade variable age_ppm ▾

☐ Supply units

Units of product variable ▾

Values measured in weight ppm (pp) ▾ per metric tonne (t) ▾

Selling Cost

Cost to sell a unit of recovered product

☒ Use selling cost value 1.0 ☐ Variable ▾

Selling cost measured in US\$ per ounce troy (oz t) ▾

Add Product Remove Last

Figura 73. Nuevo precio plata

Pit Optimiser

Open specification

Financials

- Products
- Processes
- Rock Types
- Combinations
- Tonnages
- Adjustments
- Explain

Optimisation

- Air Criteria
- Subregions
- Slope Interpolation
- Multiple Pit

Analysis

- Variables
- Processing Groups
- Scenarios
- Periods
- Report
- Charts

Post Processing

Viewing

Save & Run

Products

Grade 1 Grade 2 Grade 3

Base price 3.5 US\$ per pound (lb av) ▾

☐ Add Premiums/Penalties from variable ▾

Product Units

☒ Calculate units

Grade variable cue_pct ▾

☐ Supply units

Units of product variable ▾

Values measured in weight percent (%) ▾ per metric tonne (t) ▾

Selling Cost

Cost to sell a unit of recovered product

☒ Use selling cost value 0.4 ☐ Variable ▾

Selling cost measured in US\$ per pound (lb av) ▾

Add Product Remove Last

Figura 74. Nuevo precio cobre

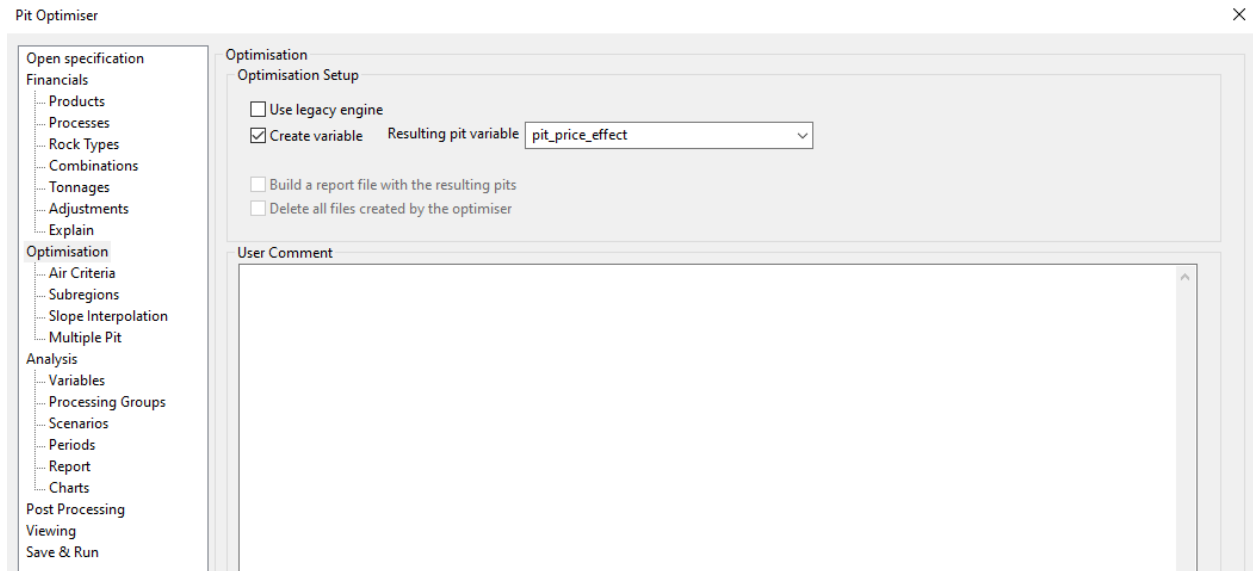


Figura 75. Creación variable pit final

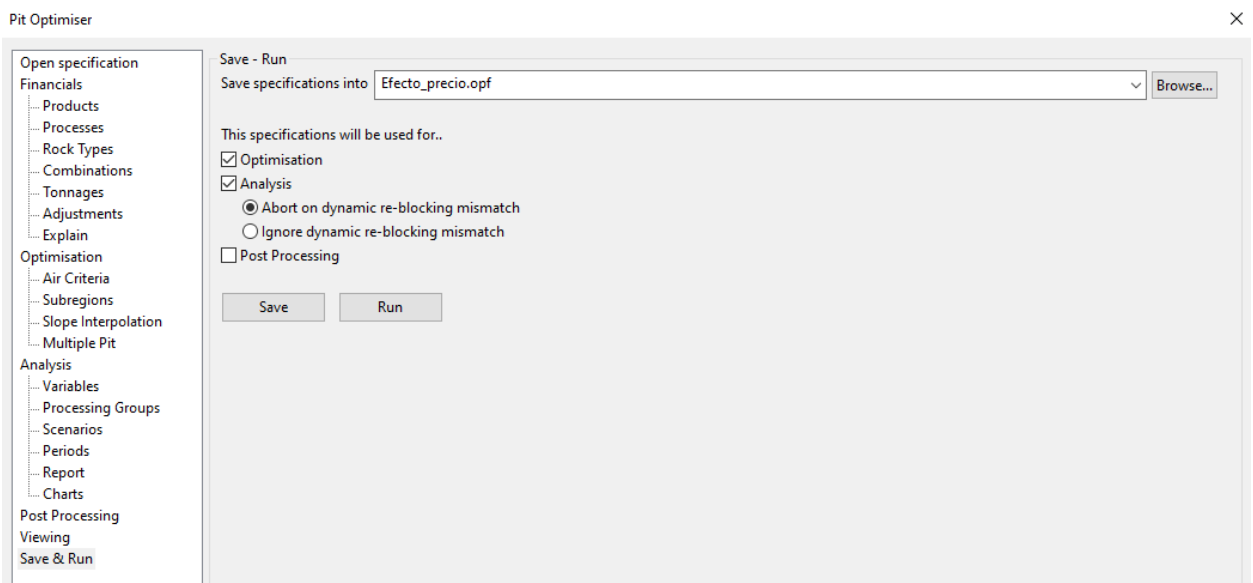


Figura 76. Guardado y ejecución

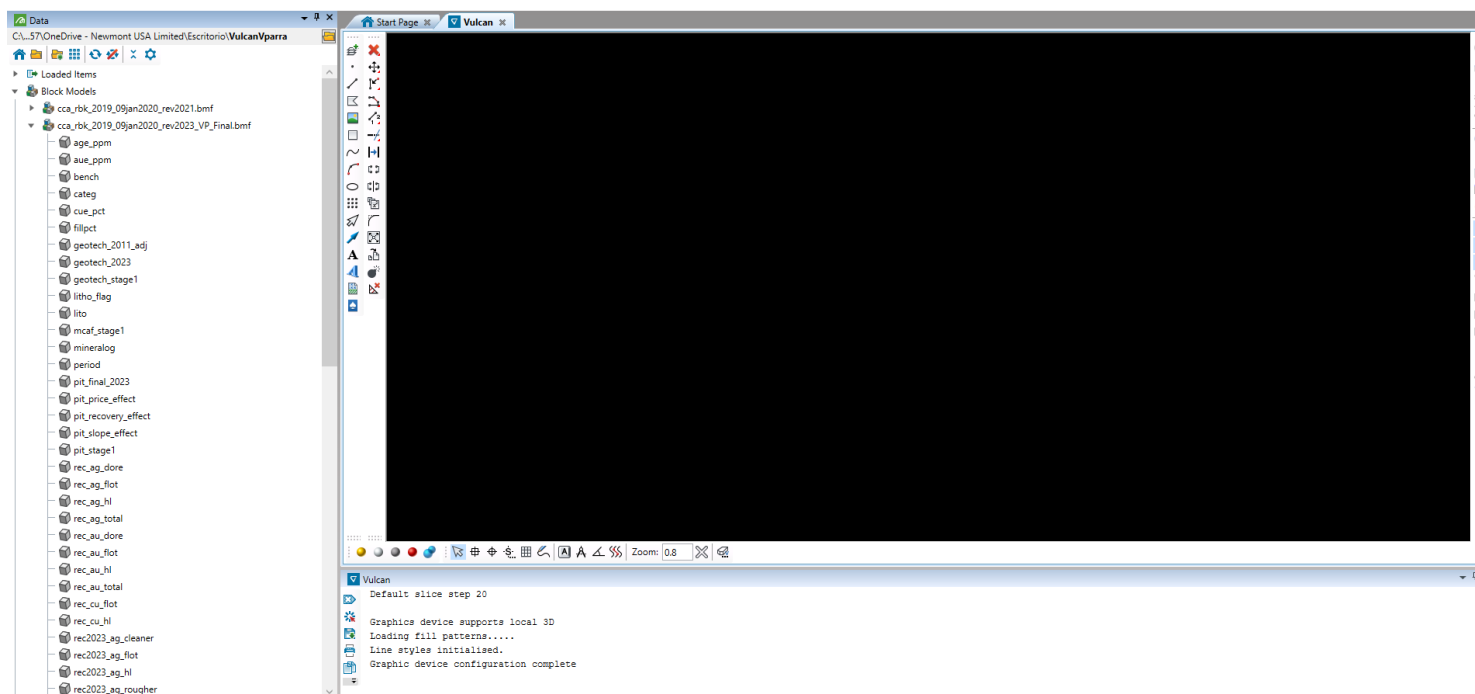


Figura 77. Modelo de bloques entregado a Norte Abierto

