



**UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA DE MINAS**

**PLAN PRODUCTIVO CONSIDERANDO INTERACCIÓN RAJO-SUBTERRÁNEA,  
MINA EL SOLDADO**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS**

**PATRICIO ALEJANDRO ALLENDE CASTRO**

**PROFESOR GUÍA:  
NELSON MORALES VARELA**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
JAVIER VALLEJOS MASSA  
MANUEL REYES JARA**

**SANTIAGO DE CHILE  
DICIEMBRE 2013**

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE:** Ingeniero Civil de Minas  
**POR:** Patricio Alejandro Allende Castro  
**FECHA:** 26/12/2013  
**PROFESOR GUÍA:** Nelson Morales Varela

**PLAN PRODUCTIVO CONSIDERANDO INTERACCIÓN RAJO-SUBTERRÁNEA,  
MINA EL SOLDADO**

La planificación minera busca construir un plan productivo que represente el mejor negocio para la compañía y que pueda ser alcanzable con los recursos disponibles de la mina. Sin embargo, existen retrasos que afectan el cumplimiento del plan y por ende afectan el valor del negocio. Particularmente, en la operación El Soldado existen retrasos provocados por la interacción que hay entre la mina a cielo abierto, actualmente en operación, y la mina subterránea ya cerrada desde el año 2010. Esta interacción ocurre producto del relleno a realizar desde la superficie del rajo a las cavidades subterráneas, las cuales representan un riesgo de estabilidad en la operación del rajo. Una manera de estudiar la interacción existente entre las dos minas es ver la relación directa entre las cavidades subterráneas y los polígonos de extracción del rajo.

El presente trabajo tiene como objetivo construir un plan productivo de mediano plazo para el año 2014 incorporando la interacción entre la mina a cielo abierto y la subterránea, logrando de esta manera obtener un mejor cumplimiento que el plan Budget 2013, en el cual no se considera la interacción.

Como metodología de trabajo se busca agendar la extracción de polígonos del rajo considerando de antemano el relleno a realizar en las cavidades subterráneas. Para esto se implementa la herramienta computacional UDESS la cual permite programar actividades de manera óptima que en este caso corresponden a polígonos de extracción y a cavidades a rellenar. Posteriormente, se realiza una validación de los resultados obtenidos para el año 2013 comparando este con el plan Budget del mismo año. Debido a que la diferencias de movimiento de material, cobre fino producido y área explotada está dentro de la aceptable para el área de planificación de El Soldado, se calcula el plan productivo para el año 2014 con la herramienta.

Los resultados muestran que para el año 2014 existe una ganancia de cobre fino de 2.403 toneladas en comparación al plan Budget, logrando de esta manera aumentar en 1.67 MUS\$ el ingreso producto de la optimización generada, versus el procedimiento manual actual en la construcción del plan de mediano plazo.

De los resultados se concluye que es posible incorporar la interacción entre la mina rajo y la subterránea al definir precedencias operacionales entre los polígonos de extracción y las cavidades a rellenar, obteniendo un plan productivo óptimo y sin retrasos operacionales. Por tanto, se recomienda para trabajos futuros utilizar la metodología de este estudio en la construcción del plan productivo de mediano plazo para el año 2017, debido a la gran cantidad de cavidades a rellenar en ese año y que no están detalladas por mes en el plan productivo construido en este trabajo. Además, se recomienda usar esta metodología en minas que presenten una transición de subterránea a cielo abierto, y en donde es necesario el relleno de labores subterráneas producto de las inestabilidades que puedan afectar al personal en la operación del rajo.

**ABSTRACT OF THESIS SUBMITTED TO OPT  
FOR THE DEGREE OF: Mining Engineer  
BY: Patricio Alejandro Allende Castro  
DATE: Dec, 26<sup>th</sup>, 2013  
GUIDANCE PROFESSOR: Nelson Morales Varela**

**PRODUCTION PLAN CONSIDERING OPEN PIT-UNDERGROUND  
INTERACTION, EL SOLDADO MIINE**

The mine planning area seeks to build a production plan that represents the best business for the company and also that can be achievable with the mine resources available. However, there are delays that affect the plan compliance and therefore affect the value of business. Particularly, at operation El Soldado there are delays caused by the interaction between open pit mine, currently in operation, and the underground mine already closed since 2010, interaction that occurs because of the filling process made from open pit surface towards underground stopes, which represents a stability risk in the open pit operation. One way to study the interaction between the two mines is to see the direct relationship between underground stopes and polygons extraction from open pit.

This work's objective is to build a medium-term production plan for 2014 incorporating the interaction between open pit and underground mine, achieving this way to get a better compliance than Budget 2013 production plan, in which interaction is not considered.

The working methodology of this study seeks to schedule the extraction of open pit polygons considering beforehand filling underground stopes. To achieve this, a computational tool (UDESS) is implemented which allows to schedule activities in an optimal way. In this case, polygons extraction and stopes to refill are defined as activities. Subsequently, a validation process of the results for 2013 is executed and compared with Budget 2013 production plan. Because this difference related to material movement, fine copper produced and mined area for 2013 is within the acceptable for the planning area of El Soldado, the production schedule for 2014 is calculated with UDESS.

The results show that there is a gain of 2.043 tonnes of fine copper obtained in 2014 compared with Budget plan, achieving an increase of 1.67 MUS\$ income, due to the optimization generated, compared with the current method to build production plan for medium term.

From the results it is concluded that it is possible to incorporate the interaction between open pit and underground mine defining operational precedences between polygons extraction and filling stopes. Also, an optimal production schedule is obtained without operational delays resulting from interaction. Therefore, it is recommended for future works to use the methodology of this study to build medium-term production plan for 2017, due to the large number of stopes to refill for that year and which are not detailed per month in the plan of this work. In addition, it is recommended to use this methodology in mines that are in transition from open pit to underground, and where it is necessary to fill underground works because of the instabilities that can affect to the crew of open pit operation.

## AGRADECIMIENTOS

A mis padres, Fabiola y Humberto, por su incondicional apoyo en todos los años de estudio, por cada ayuda y palabra de aliento que me dio fuerzas para seguir adelante, por todas las herramientas que me brindaron para facilitar enormemente el camino que tome para seguir, por cada esfuerzo que hicieron por darme siempre lo mejor, por todo el amor que siempre me han dado, por todo lo que día a día me enseñan para ser una mejor persona, no me queda más de decirles GRACIAS, sin ustedes yo no habría llegado hasta donde estoy.

A mis hermanos, Camilo, Uri y Paulina, por ser un apoyo y un pilar fundamental en cada cosa que hago, por darme motivación y fuerza para seguir día a día, por darme su amor y ánimo cuando lo necesité, por estar conmigo siempre y por ser las personas que más alegrías me han entregado.

A mis amigos de universidad, Roberto, Jaime, Sebastián, Francisco, Rodrigo, Felipe, Esteban y tantos otros con los que compartí momentos únicos, por todos esos momentos que hicieron de mi estadía en la universidad una experiencia única que jamás olvidaré.

A la operación El Soldado, por darme la oportunidad de realizar la memoria y por todo el apoyo brindado por el Área de Planificación, a Cristián, Fabián, Mary, Rodrigo D., Rodrigo C., Rodrigo G. y cada compañero que me ha ayudado a desarrollarme como profesional, además de entregarme conocimientos que me ha servido para realizar este trabajo.

Al profesor Nelson M., por darme la oportunidad de desarrollar la memoria en el laboratorio de planificación Delphos, por su ayuda y orientación cada vez que la necesité. A Maximiliano A. por ayudarme a entender el funcionamiento de UDESS y por cada día que pasamos horas mejorando el modelamiento de este trabajo. Al profesor Manuel R. por sus consejos, dedicación y colaboración en cada avance de este trabajo.

A la Universidad de Chile, por entregarme el conocimiento necesario para lograr desarrollarme como profesional y por cada experiencia vivida durante estos 6 años. A cada profesor de esta universidad, que con su paciencia y dedicación lograron ser parte fundamental de mi formación.

Finalmente agradecer a cada amigo, familiar y compañero que fue parte de este proceso, que con un consejo, ayuda, o con tan solo un gesto de ánimo contribuyó a darme fuerzas para seguir adelante.

## TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS .....	iv
TABLA DE CONTENIDO .....	v
ÍNDICE DE FIGURAS .....	viii
ÍNDICE DE TABLAS .....	x
1. Introducción.....	1
1.1.    Objetivos .....	2
1.1.1.    Objetivo General.....	2
1.1.2.    Objetivos Específicos .....	2
1.2.    Alcances .....	2
1.3.    Contenidos por Capítulo.....	3
2. Metodología de trabajo.....	4
3. Información mina el soldado .....	6
3.1.    Mina El Soldado.....	6
3.1.1.    Descripción.....	6
3.1.2.    Proceso de Planificación.....	11
3.2.    Procedimiento reconocimiento y control de cavidades.....	13
3.3.    Información Rajo y Cavidades.....	15
4. Estudio bibliográfico .....	17
4.1.    Planificación Minera en Cielo Abierto.....	17
4.2.    Procedimiento actual de El Soldado.....	18
4.2.1.    Recopilación y preparación de información plan LOM .....	18
4.2.2.    Secuenciamiento de unidades de explotación .....	19
4.2.3.    Construcción de plan productivo .....	20
4.3.    UDESS (Underground Development and Extraction Sequencing and Scheduling) ...	20
5. Antecedentes.....	23
5.1.    Polígonos de Extracción.....	23
5.2.    Cavidades .....	24
5.3.    Trabajos de Control a Cavidades .....	26
5.4.    Plan Budget 2013 .....	28
6. Caso estudio.....	31

6.1.	Precedencias Operacionales .....	31
6.1.1.	Verticales o Restricciones de Talud .....	31
6.1.2.	Horizontales.....	32
6.2.	Valorización Polígonos y Tratamiento de Cavidades .....	33
6.2.1.	Polígonos de Extracción .....	33
6.2.2.	Tratamiento a Cavidades Subterráneas.....	35
6.3.	Restricciones Operacionales Mina El Soldado .....	36
6.4.	Flota de Equipos y Rendimientos.....	37
6.5.	Interacción Polígonos y Cavidades .....	38
6.6.	Plan Productivo Largo Plazo.....	39
7.	Carga datos udess y Corridas.....	40
7.1.	Precedencias Horizontales e Interacción Cavidad-Polígonos .....	42
7.2.	Precedencias Verticales.....	42
7.3.	Equipos y Rendimientos.....	44
7.4.	Restricciones .....	45
7.5.	Corrida y Optimización.....	46
8.	Resultados udess y construcción plan productivo .....	48
8.1.	Resultados UDESS.....	48
8.2.	Programación Cronológica.....	48
8.3.	Cálculo de Tonelaje y Ley de Cobre .....	49
8.4.	Manejo de Stock.....	51
8.5.	Construcción Plan Productivo 2013.....	51
9.	Validación.....	54
9.1.	Comparación Plan Productivo UDESS vs Budget 2013.....	54
9.1.1.	Cantidad de Tonelaje por Fase .....	54
9.1.2.	Cantidad de Fino Anual .....	55
9.1.3.	Cantidad de Área Planificada .....	56
9.1.4.	Comparación con Movimiento Real.....	57
9.2.	Análisis Sensibilidad .....	58
9.2.1.	Sin Precedencias Horizontales.....	58
9.2.2.	Relajando Restricciones Operacionales.....	59
10.	Plan productivo 2014.....	61
10.1.	Plan Productivo 2014 .....	61

10.2.	Plan de Trabajo a Cavidades 2014 .....	62
10.3.	Plan Quinquenio 2014-2018.....	63
11.	Análisis de Resultados.....	65
11.1.	Resultados UDESS y Construcción Plan Productivo.....	65
11.2.	Validación .....	65
11.3.	Plan Productivo 2014 .....	67
11.4.	Valor agregado con UDESS.....	67
12.	Conclusiones.....	70
13.	Recomendaciones .....	72
14.	BIBLIOGRAFÍA.....	74
15.	ANEXOS.....	A-1
15.1.	Vistas Mina El Soldado con interacción rajo y cavidades subterráneas .....	A-1
15.2.	Cavidades por Fase necesarias para formar archivo de entrada de UDESS .....	A-2
15.3.	UDESS (Underground Development and Extraction Sequencing and Scheduling). A-3	
15.3.1.	Modelo de Programación Matemática .....	A-3
15.3.1.1.	Actividades y parámetros económicos .....	A-3
15.3.1.2.	Variables de Decisión.....	A-3
15.3.1.3.	Función Objetivo.....	A-3
15.3.1.4.	Restricciones .....	A-4
15.3.1.4.1.	Variables Estructurales.....	A-4
15.3.1.4.2.	Recursos .....	A-4
15.3.1.4.3.	Representación de Precedentes .....	A-5
15.4.	Archivo de Entrada a UDESS .....	A-6
15.5.	Valorización Polígonos y Cavidades.....	A-6
15.6.	Carga de Datos UDESS.....	A-7
15.7.	Resultados Herramienta UDESS.....	A-8
15.8.	Validación UDESS.....	A-8
15.9.	Resultados Interacción Rajo-Subterránea 2013 .....	A-9
15.10.	Resultado para año 2014 .....	A-10

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ubicación Minera El Soldado .....	6
Figura 2: Flota Camión 830-AC con Pala PC-5500 (izquierda) y Camión 830-E con Cargador 994 D (derecha) .....	7
Figura 3: Marathon LT 1850 .....	8
Figura 4: Perforadora D75 (izquierda) y Perforadora PV-271 (derecha).....	8
Figura 5: Wheldozer 824 (izquierda) y Aljibe (derecha) .....	9
Figura 6: Motoniveladora .....	9
Figura 7: Líneas de Proceso de Minerales de El Soldado .....	10
Figura 8: Vista general de Operación El Soldado .....	11
Figura 9: Diagrama del Ciclo de Planificación de El Soldado .....	12
Figura 10: Sistema de Planificación El Soldado .....	13
Figura 11: Relleno de cavidades desde banco 1055 .....	14
Figura 12: Polígonos a Explotar F2, F3 y F4 para el año 2013 .....	16
Figura 13: Vista Interacción Fases y Cavidades.....	16
Figura 14: Esquema General de la planificación minera en rajo.....	17
Figura 15: Bancos de una Fase en operación .....	18
Figura 16: Ejemplo de Cubicación a través de Minesight.....	19
Figura 17: Esquema de uso de UDESS en caso estudio.....	21
Figura 18: Ejemplo de Polígonos de extracción de Banco 920.....	23
Figura 19: Estimación de Centro de Masa de polígono de extracción con Software Minesight... ..	24
Figura 20: Selección de Cavidades a considerar en Estudio para Banco 785 .....	25
Figura 21: Estimación de Centro de Masa de Cavidad con software Minesight.....	26
Figura 22: Dimensión chimenea de relleno y posición de tiros .....	27
Figura 23: Tiempos involucrados en todo el proceso de construcción de chimenea de relleno....	28
Figura 24: Plan productivo Budget para año 2013 .....	29
Figura 25: Cobre Fino Plan Budget año 2013 .....	30
Figura 26: Precedencia Vertical entre polígonos.....	31
Figura 27: Precedencias Operacionales Verticales.....	32
Figura 28: Camino Predefinido de Pala en Banco sin corrección (izquierda) y con corrección (derecha).....	33
Figura 29: Restricción de operación en al trabajar en bancos distintos.....	36
Figura 30: Restricción operacional para trabajos en bancos distintos.....	37
Figura 31: Banco sin interacción con cavidad (izquierda) y banco con interacción con cavidad (derecha).....	39
Figura 32: Interacción de cavidad con bancos.....	39
Figura 33: Funcionamiento UDESS .....	41
Figura 34: Precedencias Horizontales e Interacción Cavidad-Polígonos .....	42
Figura 35: Criterio para considerar restricción operacional El Soldado .....	43
Figura 36: Carga de todas las precedencias operacionales en UDESS. ....	44



Figura 37: Ejemplo de extracción de polígonos previo a tratamiento de cavidad.....	47
Figura 38: Movimientos entregados por UDESS para el año 2013 .....	52
Figura 39: Plan productivo de alimentación a planta entregada por UDESS para el año 2013 ....	52
Figura 40: Producción de cobre fino por mes para el año 2013 desde UDESS .....	53
Figura 41: Movimientos por fase para plan Budget 2013 .....	54
Figura 42: Comparación de Cobre fino para el año 2013.....	55
Figura 43: Área planificada Budget Enero 2013 (izquierda) y Área planificada UDESS Enero 2013 (derecha) .....	56
Figura 44: Área planificada Budget Abril 2013 (izquierda) y Área planificada UDESS Abril 2013 (derecha) .....	56
Figura 45: Comparación Plan Budget, UDESS y movimiento Real para Fase 2 (izquierda) y Fase 3 (derecha) .....	57
Figura 46: Comparación de beneficio al variar radio de trabajos en 2 bancos distintos .....	60
Figura 47: Plan Productivo de UDESS para año 2014.....	61
Figura 48: Plan productivo de alimentación a planta para año 2014 estimado con la herramienta estimado con la herramienta UDESS .....	62
Figura 49: Extracción de polígonos 2014 junto con trabajos a cavidades.....	62
Figura 50: Plan de trabajo de relleno a cavidades .....	63
Figura 51: Plan Quinquenio entregado por UDESS para mina El Soldado .....	64
Figura 52: Cobre Fino de Quinquenio entregado por UDESS .....	64
Figura 53: ANEXO 15.1: Vista isométrica Mina El Soldado con interacción rajo-subterránea. A-1	
Figura 54: ANEXO 15.1: Vista en Corte Mina El Soldado con interacción rajo-subterránea....	A-1
Figura 55: ANEXO 15.1: Vista en Corte Mina El Soldado con interacción rajo-subterránea....	A-2
Figura 56: ANEXO 15.6: Detalle de Carga UDESS con Precedencias para 6 Bancos.....	A-7
Figura 57: ANEXO 15.8: Área planificada Budget Agosto 2013 (izquierda) y Área planificada UDESS Agosto 2013 (derecha).....	A-8
Figura 58: ANEXO 15.8: Área planificada Budget Diciembre 2013 (izquierda) y Área planificada UDESS Diciembre 2013 (derecha).....	A-9
Figura 59: ANEXO 15.9: Trabajos de cavidades para banco 905.....	A-9
Figura 60: ANEXO 15.9: Trabajos de cavidades para banco 875.....	A-10
Figura 61: ANEXO 15.10: Producción de Fino de Plan UDESS para el año 2014 .....	A-10

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Resumen Producción Mina El Soldado y proyectado .....	7
Tabla 2: Flota Carguío y Transporte.....	7
Tabla 3: Flota Perforación .....	8
Tabla 4: Equipos de Servicios .....	9
Tabla 5: Tonelaje Máximo a tratar en Planta de Procesamiento para el Año 2013 .....	29
Tabla 6: Recuperación Metalúrgica Planta para año 2013 .....	29
Tabla 7: Datos para estimar ingresos por polígono .....	34
Tabla 8: Costo Mina Estéril y Mineral desglosado .....	35
Tabla 9: Flota y rendimientos de equipos considerados en UDESS. ....	38
Tabla 10: Movimientos Plan LOM 2012.....	39
Tabla 11: Resumen de restricciones a ingresar a UDESS .....	45
Tabla 12: Archivo salida UDESS con periodo de extracción de polígono .....	48
Tabla 13: Matriz transpuesta para el cálculo del movimiento por periodo .....	49
Tabla 14: Cálculo de Tonelaje por Periodo .....	50
Tabla 15: Tonelaje de Mineral, Ley de Mineral y Estéril de resultado de UDESS.....	50
Tabla 16: Manejo de Stock con cantidad y ley media.....	51
Tabla 17: Comparación en movimiento por fase entre plan Budget y UDESS. ....	55
Tabla 18: Comparación cobre fino para año 2013 entre plan Budget y UDESS .....	55
Tabla 19: Diferencia de Área entre Plan UDESS y Budget para año 2013.....	57
Tabla 20: Comparación de corridas con y sin consideración de precedencias horizontales para 1 periodo.....	58
Tabla 21: Beneficio al extraer sin precedencias horizontales para 1 año de Fase 2 .....	59
Tabla 22: Diferencia de Cobre Fino para los años 2013 y 2014 para el plan Budget y UDESS. .	67
Tabla 23: Comparación de VAN entre Budget y UDESS para años 2013 y 2014.....	68
Tabla 24: ANEXO 15.2: Interacción Polígonos con Cavidades Fase 2 .....	A-2
Tabla 25: ANEXO 15.2: Interacción Polígonos con Cavidades Fase 3 .....	A-3
Tabla 26: ANEXO 15.4: Archivo de Entrada UDESS .....	A-6
Tabla 27: ANEXO 15.5: Valorización de Polígonos de Extracción .....	A-6
Tabla 28: ANEXO 15.5: Valorización Cavidades a Rellenar .....	A-7
Tabla 29: ANEXO 15.7: Resultados UDESS para Quinquenio.....	A-8
Tabla 30: ANEXO 15.7: Producción de Cobre Fino Quinquenio 2013-2017 con ganancia de VAN según UDESS.....	A-8

# 1. INTRODUCCIÓN

La planificación minera busca transformar un recurso mineral en un proyecto minero rentable, elaborando la mejor estrategia productiva de acuerdo a los recursos disponibles y la estrategia de negocio de la compañía minera. Para poder desarrollar el proceso de planificación minera, es necesaria la construcción de un programa de producción que corresponde al documento bancable con el cual se analiza financieramente la factibilidad de un proyecto minero [1]. De esta manera, uno de los principales objetivos de la planificación minera es obtener un programa de producción con flexibilidad para hacer frente a un escenario desconocido o con variabilidad.

En este proceso, es fundamental la consideración de variables que puedan afectar el cumplimiento del programa de producción, tales como variables geológicas, operacionales, económicas, entre otras. De no incorporar estas variables puede ocurrir una pérdida de tiempo y/o dinero para el negocio minero.

Por otro lado, de manera frecuente en las mineras se debe lidiar con problemas operacionales, por lo que se suele observar incumplimiento en los planes productivos los cuales por parte de las decisiones de planificación de corto plazo tratan de ser reducidos a un mínimo. Sin embargo, existen casos en donde se provocan retrasos por no considerar interacción de la operación con trabajos adicionales a realizar y en donde el planificador de corto plazo no puede ejercer un mayor impacto, provocando con esto, cambios en los planes productivos que pueden repercutir en otras áreas y en el valor del negocio.

Un caso particular ocurre en la operación El Soldado, en donde actualmente existe una mina explotada mediante minería a cielo abierto y que se sitúa sobre una explotación subterránea ya cerrada desde el año 2010. En los últimos 7 meses de producción ha existido interacción directa del rajo con la mina subterránea, en donde para sectores específicos del rajo (áreas) ha sido necesario realizar trabajos de reconocimiento de las cavidades subterráneas, construcción de chimeneas de relleno y posterior relleno de cavidades vacías con material estéril. Producto de estos trabajos, se han provocado retrasos en los planes productivos debido a las labores adicionales que se deben realizar en el rajo para prevenir inestabilidades geomecánicas que ponen en riesgo al personal en terreno. Una manera de reducir los retrasos es realizar reemplazos de áreas productivas, la cual corresponde a una decisión de corto plazo que afecta por un lado la cantidad de mineral comprometida para un periodo, y por otro lado provoca cambios en la geometría de la mina, generando desorden que puede afectar la operación en periodos posteriores.

En la construcción del plan quinquenal de mediano plazo no se considera la planificación detallada de los trabajos involucrados con la mina subterránea, por lo que el área de geomecánica toma como input el plan productivo quinquenal y planifica las labores a realizar en el año. Debido a esto, en el mes de Enero del presente año se provocaron retrasos debido a que al momento de llevar a cabo las labores se limitaban áreas de extracción, lo que provocó cambios en los planes productivos. Debido a esto, se hace interesante considerar la planificación de los trabajos previo a la construcción del plan productivo quinquenal, logrando de esta manera generar un plan con mayor cumplimiento, y de esta manera evitar retrasos operacionales. Se destaca que en la construcción del plan productivo Budget existe una programación manual de los polígonos de

extracción, por lo que al momento de construir el plan no se genera una secuencia de extracción óptima.

Adicionalmente se cuenta con la herramienta UDESS que entrega un programa óptimo de actividades considerando precedencias operacionales. Dado lo anterior, se pretende incorporar la herramienta UDESS en la construcción de un plan productivo que considere los trabajos a realizar en los polígonos que se encuentran interactuando con la mina subterránea, y además generar una secuencia de extracción óptima.

## **1.1. Objetivos**

### *1.1.1. Objetivo General*

- Construir un plan productivo quinquenal que posea un mejor cumplimiento que el plan Budget 2013 al considerar la interacción de la mina rajo con las labores subterráneas.

### *1.1.2. Objetivos Específicos*

- Incorporar en el plan productivo los trabajos a realizar a las labores subterráneas
- Implementar la herramienta UDESS para el caso estudio, de manera que genere un programa productivo óptimo incorporando la interacción del rajo con la mina subterránea
- Construir un plan de trabajo para reconocimiento y tratamiento de las labores subterráneas que no genere retrasos operacionales

## **1.2. Alcances**

- El trabajo se desarrolla en la mina El Soldado y particularmente en la interacción de las fases 2, 3 y 4 del rajo con la mina subterránea.
- Se considera una planificación de mediano plazo considerando un plan quinquenal.
- El enfoque del trabajo es la obtención de un plan productivo que posea mejor cumplimiento que el construido para el año 2013.
- Para el tratamiento de las labores subterráneas se consideran el procedimiento “Detección y Control de Cavidades” emitido por el área de geomecánica en octubre del 2012.
- Para los planes productivos se considera como input los generados en el plan LOM del año 2012.
- Dentro de las precedencias operacionales solo se consideran los trabajos de auscultamiento, construcción de chimeneas y relleno de cavidades para el tratamiento de las cavidades vacías.
- Se consideran precedencias físicas verticales y horizontales entre bancos.
- Se consideran rendimientos de equipos fijos y sin variación en materiales a mover.
- Como información de entrada se utilizan los datos del plan Budget entregados por el área de planificación actualizada a Mayo del 2013.
- Para la información de las cavidades subterráneas se cuenta con datos del área de geomecánica actualizada a Abril del 2013.
- Solo se toman en consideración los trabajos a realizar en cavidades vacías y no se toma en cuenta la interacción que existe entre el rajo y otras labores subterráneas menores.

### **1.3. Contenidos por Capítulo**

La presentación del trabajo se muestra en 15 capítulos:

- Capítulo 1: Introducción al tema y problemática a tratar. Además se adicionan el objetivo general y los específicos como también los alcances del trabajo.
- Capítulo 2: Metodología del trabajo a realizar.
- Capítulo 3: Información Mina El Soldado con descripción de la faena y planificación actual. Adicionalmente se agrega el procedimiento de reconocimiento y control de cavidades e información de cavidades.
- Capítulo 4: Estudio Bibliográfico acerca de la planificación minera en cielo abierto, procedimientos de planificación de El Soldado y sobre el modelo de optimización de UDESS.
- Capítulo 5: Antecedentes: Se recopila información necesaria para realizar la carga en la herramienta UDESS. Se obtienen datos de los polígonos de extracción y las cavidades a rellenar, las cuales son las actividades a ingresar en la herramienta UDESS. Por otro lado, se cuantifican los tiempos de trabajos a cavidades subterráneas y el plan Budget 2013.
- Capítulo 6: Caso Estudio: Se prepara información para lograr cargarla a la herramienta UDESS. Se detallan las precedencias y restricciones a utilizar en la herramienta.
- Capítulo 7: Carga de información a herramienta UDESS y realización de las primeras corridas.
- Capítulo 8: Obtención de resultados desde UDESS y construcción de plan productivo 2013.
- Capítulo 9: Validación de resultados con respecto a Plan Budget 2013 junto con análisis de sensibilidad.
- Capítulo 10: Construcción de Plan productivo para el año 2014 con herramienta validada.
- Capítulo 11: Análisis de resultados de información obtenida de UDESS, construcción de plan productivo y validación.
- Capítulo 12: Conclusiones de resultados entregados.
- Capítulo 13: Recomendaciones de análisis realizado y trabajos futuros.
- Capítulo 14: Referencias de bibliografía utilizada.
- Capítulo 15: Anexos

## 2. METODOLOGÍA DE TRABAJO

Para la construcción del plan productivo se propone la utilización de un software del Laboratorio de Planificación Minera de la Universidad de Chile (Delphos) que permite programar un conjunto actividades respetando precedencias operacionales y a la vez, generando un mayor retorno económico. El software (UDESS) está diseñado para su uso en minería subterránea por lo que debe ser adaptado para el caso en estudio. Es importante destacar que debido a este cambio a realizar en el software, se generan desviaciones con respecto a un plan obtenido del área de planificación de El Soldado, por lo que debe ser necesaria una calibración del modelo que permite representar lo mejor posible lo ocurrido en la mina a rajo abierto.

Por lo tanto como metodología de trabajo se propone lo siguiente:

- 1- Introducción: Objetivo de la planificación minera y problemática existente en la planificación de El Soldado.
- 2- Revisión Bibliográfica: Se realiza un estudio bibliográfico de la planificación minera en minería a cielo abierto para posteriormente presentar la metodología de trabajo en el área de planificación de El Soldado. Adicionalmente se revisa la información existente de la herramienta UDESS y cómo fue elaborada.
- 3- Levantamiento información: Se recopila información relacionada a la interacción entre cavidades y el rajo además de rendimientos existentes en la construcción de chimeneas de relleno. Adicionalmente se busca información de los polígonos de extracción del plan Budget 2013, que corresponde a la base para comenzar la construcción del plan productivo para el año 2013 mediante la herramienta UDESS.
- 4- Preparación información de entrada a UDESS: Una vez obtenida la información de la mina y la entregada por el área de planificación (plan productivo Budget 2013), se procede a manejar y preparar la información para poder lograr ingresarla a la herramienta. Debido a que el software UDESS en un principio está diseñado para minería subterránea, se debe conocer el lenguaje computacional que maneja y con esto lograr realizar las modificaciones pertinentes para adaptarlo al caso estudio.
- 5- Carga Datos UDESS y resultados de corridas: Se procede a cargar la información recopilada y realizar primeras pruebas para observar si los datos están correctamente ingresados. Se obtienen los primero resultados de UDESS con lo que se procede a construir el plan productivo Budget 2013, además de los manejos de materiales por fase, stock y capacidad planta de la mina El Soldado.
- 6- Validación: Se compara el plan productivo construido mediante UDESS con el plan Budget 2013 construido por el área de planificación de mediano plazo, para así lograr validar la herramienta considerando entre los 2 planes una desviación aceptable, la cual corresponde a un 5% definida en el área de planificación de El Soldado. Adicionalmente se agrega un análisis de sensibilidad de la herramienta UDESS en el caso estudio.

- 7- Plan Productivo 2014: Una vez validado el plan productivo entregado por la herramienta para el año 2013, se procede a construir el plan productivo para el año 2014 que incorpore la interacción del rajo con la mina subterránea y además que incorpore una optimización en la programación de actividades. Además, se adiciona un plan de trabajo a las labores subterráneas entregado por la herramienta.
- 8- Análisis de Resultados: Se busca cuantificar el impacto que genera la utilización de UDESS en la construcción del plan productivo. Además, se analizan las ventajas al considerar la interacción rajo-subterránea con la herramienta. Se analiza la información obtenida desde los resultados de UDESS y construcción del plan productivo para el año 2014. Además se analizan los resultados de la validación realizada a la herramienta, resultados del análisis de sensibilidad y la cuantificación del valor agregado por la herramienta UDESS
- 9- Conclusiones y Recomendaciones: Se concluye sobre el trabajo y se proponen recomendaciones para trabajos futuros con la metodología utilizada. Adicionalmente se agregan recomendaciones para la herramienta UDESS.

### 3. INFORMACIÓN MINA EL SOLDADO

Se muestra información sobre la mina El Soldado y sobre el procedimiento de reconocimiento y control de cavidades subterráneas

#### 3.1. Mina El Soldado

Se da a conocer la ubicación, historia, situación actual y proceso de planificación de la mina El Soldado.

##### 3.1.1. Descripción

#### Ubicación

La operación El Soldado comprende una mina rajo abierto, planta de flotación y planta de lixiviación en donde se producen concentrados y cátodos de cobre. El Soldado se ubica a 600 metros sobre el nivel del mar en la falda occidental de la cordillera de la costa en la localidad de El Melón, comuna de Nogales a 132 Km al noroeste de Santiago.

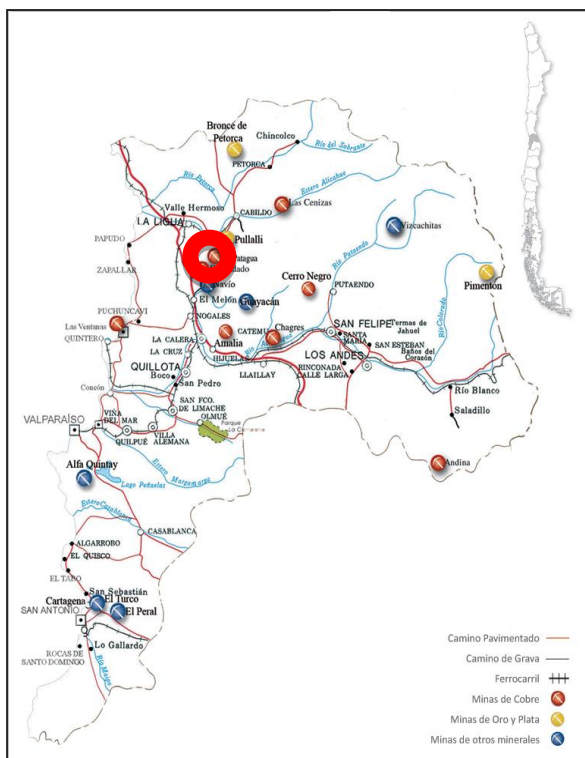


Figura 1: Ubicación Minera El Soldado

#### Historia

La mina El Soldado comenzó su explotación como mina subterránea en el siglo XIX. La primera concesión minera se remonta al año 1842. En el año 1899 la mina fue adquirida por la Sociedad Minas de Catemu y luego fue transferida a la compañía francesa Minera Du M'Zaita que mantuvo su explotación hasta el año 1958 en donde fue adquirida por la compañía Minera Disputada de Las Condes S.A. En 1970 se incorporan nuevas tecnologías para aumentar la producción de minera utilizando equipos de mayor capacidad. En 1987 se realiza una expansión de la mina y en el año 1989 comienza la extracción de mineral mediante minería a cielo abierto.



En el año 1994 comienza el funcionamiento de la planta de electro-obtención (SX-EW) y en 1996 se realiza una nueva expansión para optimizar la planta de cátodos. Finalmente, en el año 2002 la compañía Anglo American adquiere la propiedad de El Soldado la cual proyecta una vida útil de la mina hasta el año 2026. En el año 2010 se cierra la mina subterránea logrando que la producción total de El Soldado sea responsabilidad de la mina a cielo abierto.

### Situación Actual

Actualmente se realiza la explotación mediante minería a cielo abierto en donde, para ciertos sectores, la explotación se sitúa sobre una antigua mina subterránea explotada hasta el año 2010.

En el siguiente cuadro se muestra la producción del El Soldado para el año 2012 y la proyección para los próximos 5 años.

**Tabla 1: Resumen Producción Mina El Soldado y proyectado**

	2012	2013	2014	2015	2016	2017
<b>Movimiento Mina (Mton)</b>	76,83	79,43	77,74	72,18	72,43	70,17
<b>Cobre Fino (Kton)</b>	53,89	58,61	52,23	68,11	67,30	55,25

El Soldado cuenta con una dotación aproximada de 1500 trabajadores entre personal propio y contratista. Dentro de la flota de equipos presentes en la operación se encuentran:

### Carguío y Transporte:

**Tabla 2: Flota Carguío y Transporte**

Marca	Modelo	Cantidad al 2012	Capacidad
Komatsu	PC-5500	4	37 yd3
Komatsu	PC-8000	1	55 yd3
Marathon LT	L-1850	3	31 yd3
Caterpillar	994-D	5	28 yd3
Komatsu	830-E	14	240 t
Komatsu	830-AC	16	240 t
Caterpillar	785-B	6	150 t



**Figura 2: Flota Camión 830-AC con Pala PC-5500 (izquierda) y Camión 830-E con Cargador 994 D (derecha)**



**Figura 3: Marathon LT 1850**

Perforación:

Por otro lado se cuenta con la flota de perforación tanto de producción como de precorte.

**Tabla 3: Flota Perforación**

<b>Marca</b>	<b>Modelo</b>	<b>Cantidad al 2010</b>
Drilltech	D75-02	1
Drilltech	D75-06	1
Ingersoll Rand	PERDMM3-03	1
Ingersoll Rand	PERDMM3-04	1
Atlas Copco	PERPV05	1
Sandvik	PERDI607	1
Sandvik	PERDI608	1
Ingersoll Rand	PERDM10	1



**Figura 4: Perforadora D75 (izquierda) y Perforadora PV-271 (derecha)**

Servicios:

Además se cuenta con la flota de equipos de servicios auxiliares.

**Tabla 4: Equipos de Servicios**

<b>Marca</b>	<b>Modelo</b>	<b>Cantidad al 2010</b>
Komatsu	WA500	3
Caterpillar	950	2
Caterpillar	WHELDOZERS 824	2
CAT y Komatsu	BULLDOZERS	6
Caterpillar	EXCAVADORAS	2
Caterpillar	ALJIBES	2
Caterpillar	RODILLO	1
Caterpillar	MOTONIVELADORA	2

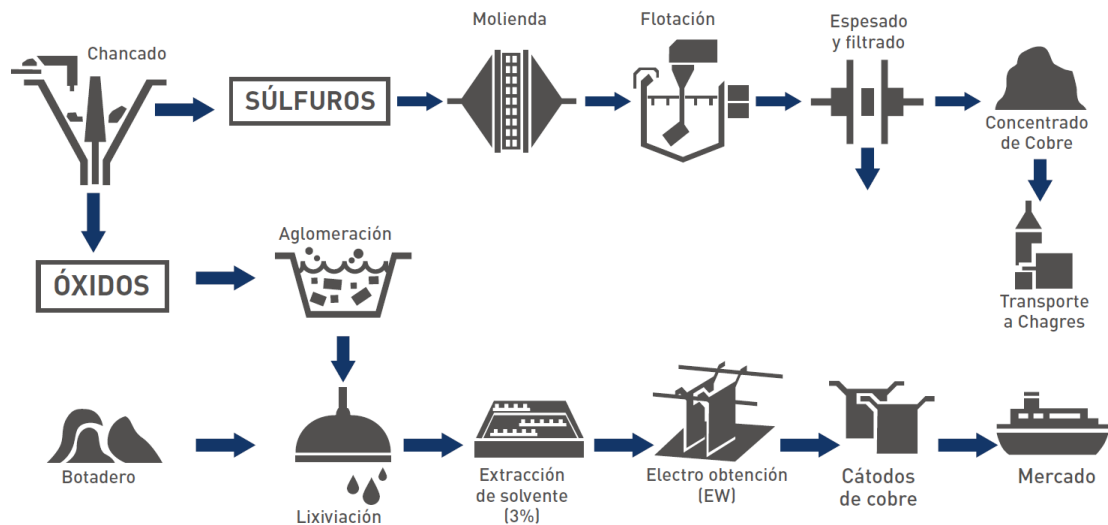


**Figura 5: Wheldozer 824 (izquierda) y Aljibe (derecha)**



**Figura 6: Motoniveladora**

Actualmente existen 2 líneas de procesos del mineral.



**Figura 7: Líneas de Proceso de Minerales de El Soldado**

Se detallan los procesos productivos de la planta:

- Chancado: material es reducido de volumen a 1,5 pulgadas y colocado en pilas.

#### *Línea Sulfuros*

- Molienda: material se reduce mediante molinos hasta conformar una pulpa con partículas de hasta 180 micrones (0,18 mm).
- Flotación: pulpa de la molienda se somete a un proceso en el cual el cobre y otros materiales se concentran en una espuma.
- Espesamiento y filtrado: la espuma generada en la flotación se espesa y se filtra con una prensa logrando obtener un concentrado seco con un 9% de humedad.
- Relaves: desechos del proceso de flotación son acumulados en un tranque.
- Concentrado de cobre: producto obtenido a partir de la flotación con gran contenido de cobre, azufre y hierro.
- Transporte a Chagres: el concentrado de cobre es enviado a la División Chagres donde es almacenado para ser fundido y transformado en ánodos de cobre.

#### *Línea Óxidos*

- Aglomeración: pilas de material son tratadas con una solución de ácido sulfúrico con el objetivo de facilitar la reacción de lixiviación y aglomerar las partículas más finas.
- Lixiviación: las pilas aglomeradas son regadas con una solución de ácido sulfúrico y agua, para producir una solución de sulfato de cobre la que posteriormente es escurrida, purificada y concentrada para la electro-obtención.
- Extracción por solventes (SX): la solución obtenida de la lixiviación es mezclada con solventes que extraen selectivamente el cobre.

- Electro-obtención (EW): mediante electrólisis, se recupera el cobre de la solución anterior formando cátodos de alta pureza (99,99% de Cu).
- Cátodos de cobre: Se obtienen placas de cobre de alta pureza las cuales son agrupadas.
- A mercado: se comercializa el producto (cátodo de Cu) obtenido de los procesos.

Se muestra una vista área donde se pueden identificar las instalaciones y operaciones descritas.



**Figura 8: Vista general de Operación El Soldado**

### 3.1.2. *Proceso de Planificación*

El ciclo de planificación de El Soldado consiste en construcción de un plan productivo de largo plazo (LOM1) a principios de año, un plan productivo de mediano plazo a mediados de año (Budget) y a final de año nuevamente otro plan de largo plazo (LOM2). La planificación de corto plazo se encarga de elaborar el plan mensual, semanal y diario de la mina.

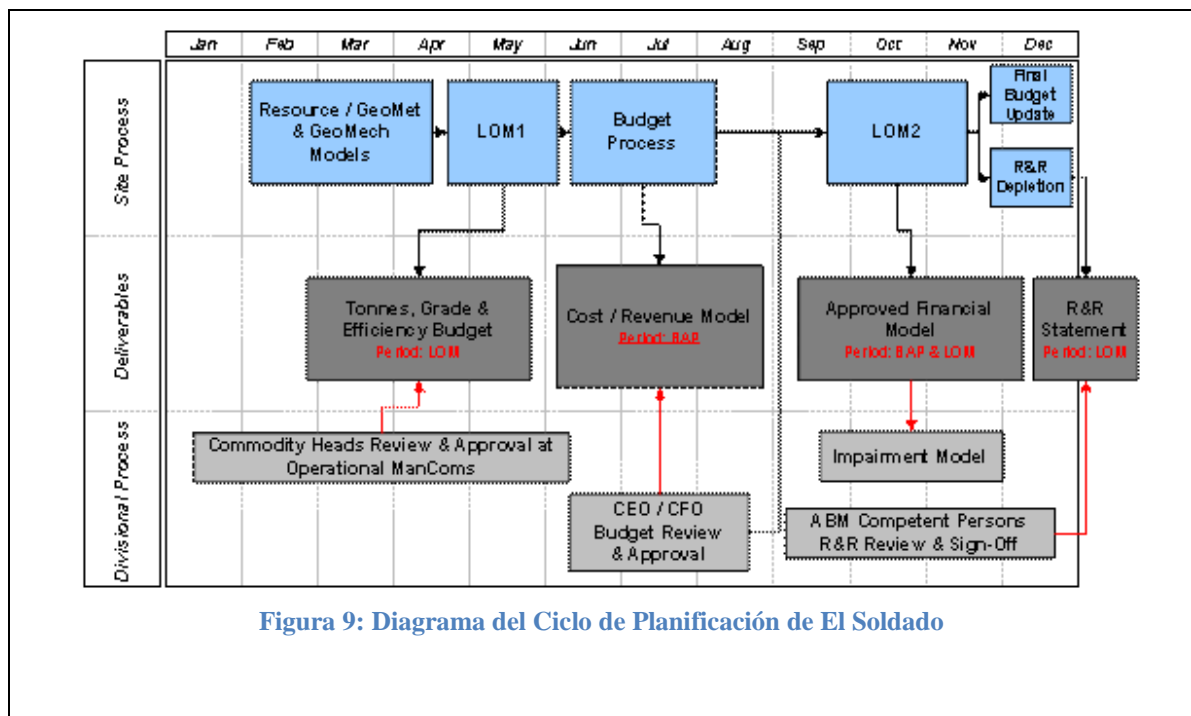


Figura 9: Diagrama del Ciclo de Planificación de El Soldado

### Planificación de Largo Plazo:

Se construye el plan de producción de la mina para la vida útil de la mina o LOM (Life of Mine) en 2 etapas. En el primer semestre del año se define la estrategia preliminar de producción y en donde se realizan revisiones de diseños y planes de producción en distintos escenarios técnico-económicos. Una vez terminado este plan, se tiene una fuerte base teórica para comenzar a realizar el plan de mediano plazo o Budget que detalla el primer quinquenio. Posterior a este último, se realiza un análisis de corto-mediano plazo del plan generado y se adiciona la visión de largo plazo del LOM1 con lo que se construye el plan LOM2. Se destaca que en la planificación de largo plazo incorpora una extracción de la mina a nivel de bancos completos, que corresponde a la unidad de explotación de largo plazo y equivale a una porción o tajada de una fase en operación.

### Planificación de Mediano Plazo:

El plan quinquenal de mediano plazo se construye [2] en base al LOM1 y se construye tomando en cuenta la capacidad de los equipos y los indicadores operacionales obtenidos de periodos previos (KPI's). Además, se tiene como objetivo satisfacer las necesidades de la planta, maximizar la producción dentro de un periodo de 5 años, desarrollar la mina de acuerdo al LOM1, maximizar el uso de los equipos de la mina y analizar distintos escenarios e impactos en el plan. De esta manera se construye una secuencia operativa por banco considerando las dimensiones de los equipos involucrados, información topográfica, geometría de las áreas de mina, capacidad de tratamiento mina, disponibilidad de equipos y estadísticas de clima.

La secuencia mencionada se realiza a mano sin la incorporación de un software que optimice la extracción de los polígonos para cumplir el plan. Dentro de esta secuencia, se incorporan restricciones geomecánicas y geométricas considerando como labores, la extracción de mineral, estéril, creación de rampas, etc. Además se muestra un detalle mensual del plan productivo del primer año a nivel de polígonos de extracción, en donde se utiliza un modelo de bloques

actualizado. El plan de mediano plazo que se construye es el plan Budget, que corresponde a un plan quinquenal construido 1 vez al año entre los meses de Junio y Julio. Debido a desviaciones operacionales se realiza el plan Outlook cada 2 meses, que corresponde a un plan actualizado del Plan Budget y en donde se realizan modificaciones con el objetivo de controlar y corregir desviaciones.

#### Planificación de Corto Plazo:

Una vez construido el plan de mediano plazo, se utiliza la información para generar el plan mensual, semanal y diario de la mina. A fin de cada mes se construye el plan Short Term el cual muestra la explotación de los próximos 30-31 días del mes siguiente. En este horizonte de planificación se considera un detalle a nivel de disparos de bancos los que son explotados diariamente.



Figura 10: Sistema de Planificación El Soldado

### **3.2. Procedimiento reconocimiento y control de cavidades**

En la operación El Soldado se cuenta con el procedimiento de detección y control de cavidades elaborado por el área de geomecánica [3] en noviembre del año 2012. El objetivo de este documento es establecer una metodología para detectar y controlar las cavidades con el objetivo de evitar accidentes tanto a personas como equipos de trabajo y/o generar interrupciones en la operación. Para esto se tiene conocimiento de la información de las cavidades acerca de su ubicación y dimensiones.

El procedimiento utilizado cumple con lo dispuesto en el Decreto Supremo 72 y el Decreto Supremo 132 del Ministerio de Minería. Se aplica el procedimiento a todas las cavidades definidas como geometría de excavación subterránea presente en cualquier condición (vacía, rellena o semi-rellena) y que esté ubicada dentro de los límites de la mina rajo abierto.

Dentro de las cavidades existentes se encuentran: como cavidades mayores los caserones y Ore Pass y como cavidades menores se encuentran las galerías y chimeneas.

Para Caserones se realiza el siguiente procedimiento:

- Se realiza una detección de los caserones cuando exista una losa de roca firme de 100 metros como mínimo de acuerdo a la información existente en el modelo de cavidades. A

partir de esta información y de un análisis de estabilidad geomecánica se define la posición y cota de la segunda auscultación para posteriormente desarrollar la chimenea de relleno.

- Para la construcción de la chimenea de relleno, se debe considerar una cota mínima de 40 metros y debe ser definida de acuerdo a un análisis geomecánico. Como se observa en la figura 11 se realiza el relleno desde la superficie del rajo y utilizando material estéril. Posterior a esto, se revisa si el relleno cumple con las recomendaciones geomecánicas.

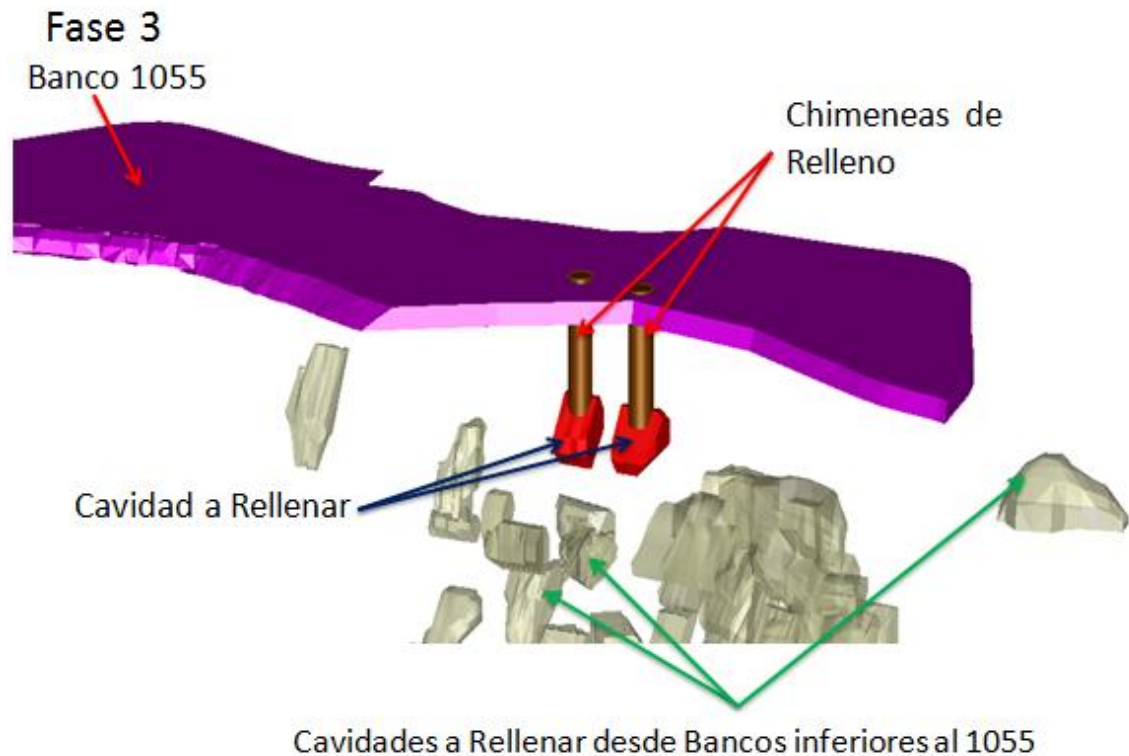


Figura 11: Relleno de cavidades desde banco 1055

- Posterior al relleno, el área de geomecánica y tronadura deben diseñar un plan para las perforaciones con el objetivo de hundir y rellenar los espacios vacíos residuales. En caso de ser necesario, se realizaran pozos para observar el contorno final.

Para los Ore Pass y Tolvas se realiza el siguiente procedimiento:

- Se realiza la primera detección cuando se proyecte una losa de roca firme de 40 metros como mínimo. Según dimensiones, se realiza un análisis de estabilidad geomecánica para definir la posición y cota de la segunda auscultación para posteriormente desarrollar la chimenea de relleno.
- Al igual que para el caso de los caserones, para la construcción de las chimeneas de relleno debe ejecutarse a la cota mínima de 40 metros definida de acuerdo a un análisis geomecánico de los sistemas estructurales.



- Se rellena de acuerdo a recomendaciones geomecánicas y se diseña un plan de perforación para hundir y rellenar los espacios vacíos residuales.

Para las chimeneas se realiza el siguiente procedimiento:

- Para chimeneas, la primera detección debe iniciarse cuando se proyecte una losa de roca firme de 30 metros como mínimo de acuerdo a la información existente en el modelo de cavidades. Según las dimensiones de la chimenea y el análisis de estabilidad geomecánica, se define estrategia de rebaje y hundimiento.
- Se define programación de la perforación y tronadura para romper el puente entre roca y el techo de la chimenea.
- Topografía se encarga de marcar en terreno las zonas de seguridad posterior al disparo realizado. En caso de no lograr la rotura suficiente, se debe marca una zona de seguridad y ajustar una malla de perforación para romper en el siguiente disparo.
- El llenado de la chimenea se realiza con mineral fino de granulometría no mayor al  $\frac{1}{4}$  del diámetro de la chimenea.

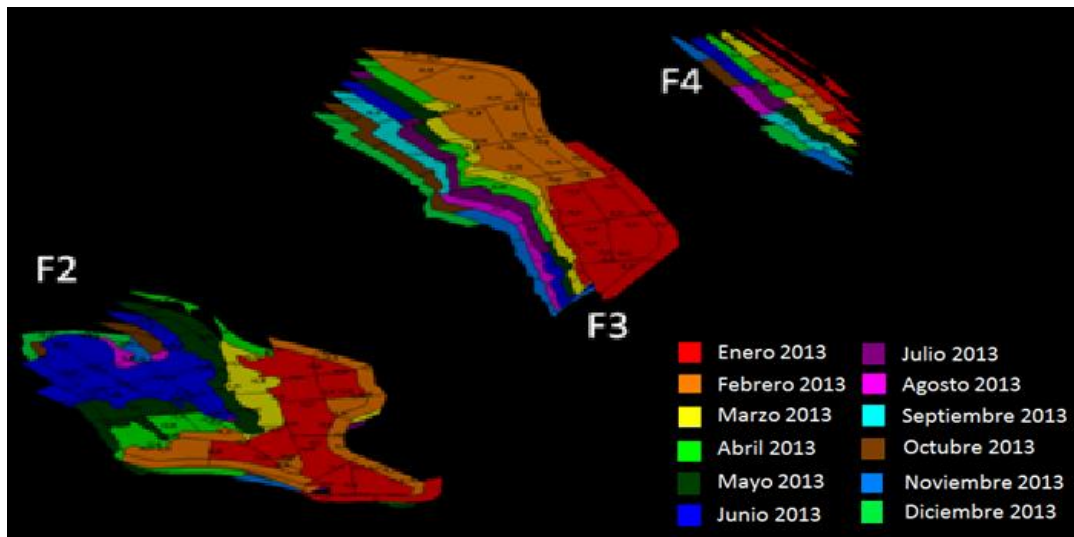
Para las galerías se realiza el siguiente procedimiento:

- Se realiza la detección cuando se proyecte una losa de roca firme de al menos 20 metros como mínimo.
- Se derrumba la galería diseñando tiros en el contorno de las galerías y/o en el techo de las mismas, con el objetivo de asegurar el hundimiento y relleno.

Se evalúan las condiciones post-tronadura del hundimiento y en caso que sea necesario se restringe el tránsito de persona o equipos por sobre el sector tronado.

### **3.3. Información Rajo y Cavidades**

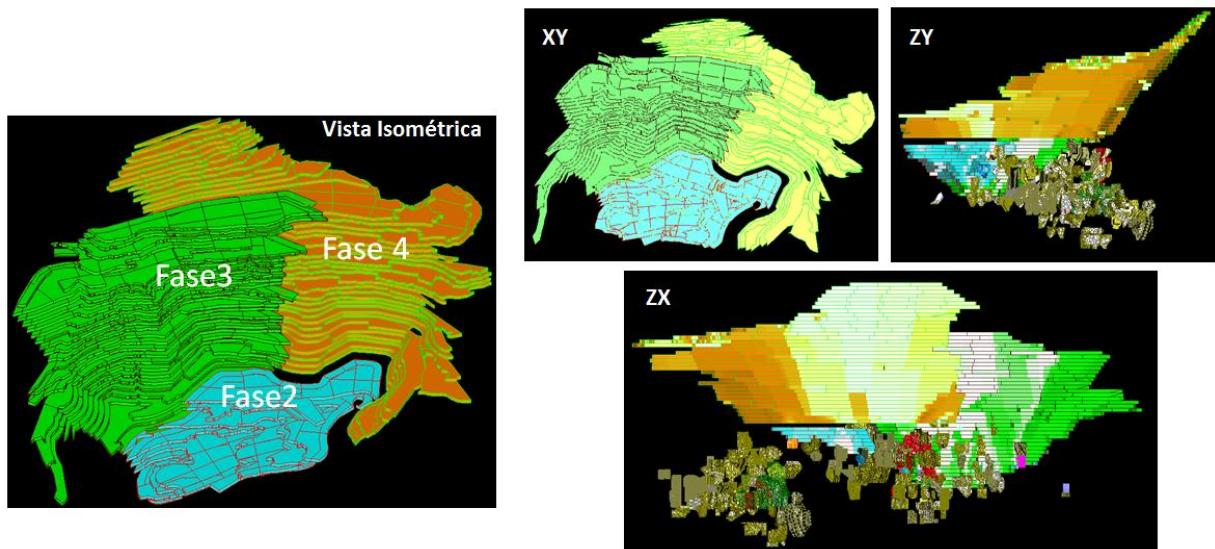
Se hace una recopilación de la información existente sobre la posición de las cavidades de la mina subterránea y de los avances esperados del plan Budget para el año 2013. En la siguiente figura se observan los polígonos a explotar de las fases 2, 3 y 4 entre los meses de marzo a diciembre del año 2013.



**Figura 12: Polígonos a Explotar F2, F3 y F4 para el año 2013**

En la figura 12 se muestran los polígonos a explotar en donde se aprecian con colores los periodos en los cuales se extraen.

Adicionalmente se muestra una vista de las cavidades subterráneas y su interacción con las fases 2, 3 y 4.



**Figura 13: Vista Interacción Fases y Cavidades**

Realizando un análisis banco a banco se obtiene la intercepción de los polígonos con las cavidades en el tiempo, logrando así conocer el momento para el cual se deben realizar las labores de auscultación y trabajos posteriores.

Así, se puede realizar un nuevo programa que incorpore previamente la interacción de las cavidades con los polígonos de extracción del Budget 2013.

En el subcapítulo 15.2 de Anexos se encuentran las cavidades ingresadas a UDESS por fase.

## 4. ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO

### 4.1. Planificación Minera en Cielo Abierto

En una explotación a cielo abierto se encuentran tres tipos de planificación que se diferencian del horizonte de tiempo a considerar [5]. Estos horizontes corresponden a la planificación de largo, mediano y corto plazo. La planificación de largo plazo busca abarcar la vida de la mina o un horizonte mínimo de 15 años para el caso de una mina de mayor tamaño. Para la planificación de mediano plazo, se busca programar un año de operación con un detalle mensual. Y finalmente, para la planificación de corto plazo se tiene un horizonte que va desde el mes, la semana hasta el día de operación.

La planificación busca programar la extracción en función de información entregada por otras áreas de la operación, tales como información geológica del modelo de recursos, flota de equipos, aspectos geomecánicos, limitaciones ambientales, precios de largo plazo de minerales a explotar, parámetros de diseño, entre otros. De esta manera, el área de planificación recibe la información con el objetivo de programar la extracción en función de los recursos disponibles y buscando generar el mayor retorno económico para la operación.



Figura 14: Esquema General de la planificación minera en rajo

En términos generales, el proceso de planificación se puede dividir en diferentes niveles dependiendo de las características de las decisiones [6][7]:

**Estratégico:** Se refiere a las opciones de los métodos de explotación, la capacidad de extracción, la capacidad de procesamiento y las estimaciones de reservas mineras. El objetivo principal de la planificación estratégica consiste en sincronizar el mercado con los recursos disponibles junto con la declaración de la misión de la compañía.

**Táctica:** Corresponde a las especificaciones de los procesos para lograr extender la vida útil de la mina, tales como los programas de producción de largo plazo y por otro lado el uso de equipos y plantas de procesamiento de la mina. La planificación táctica o conceptual determina la forma de lograr el objetivo fijado con anterioridad por la planificación estratégica. El resultado es

el plan minero que defina cómo y cuándo los recursos son extraídos en cada periodo del negocio minero.

Operativo: Se realiza diariamente. Dentro de la planificación operacional, son incluidos ritmos de producción y procesamiento resultantes. En este sentido, toma relevancia la retroalimentación de la planificación conceptual.

La decisión estratégica para determinar el pit final óptimo se busca incorporando el algoritmo de Lerchs-Grossman [4]. Este método se basa en un modelo de bloques que caracteriza a un cuerpo mineralizado, logrando generar una serie de pits anidados que posteriormente darán forma a la construcción de un pit operativo. Por otro lado, el problema de generar un plan productivo puede definirse como la secuencia en que los bloques son extraídos de la mina con el objetivo de maximizar el beneficio total. Además, esta secuencia debe definirse a partir de los objetivos estratégicos de la empresa y respetando restricciones físicas y económicas. Según Rubio [7] este problema puede ser formulado mediante programación lineal entera mixta, sin embargo, y debido a la gran cantidad de variables y números de limitaciones que se debe resolver, la formulación es demasiado extendida con los softwares disponibles en el mercado. En consecuencia, se sugiere primero definir el pit final para luego secuenciar la extracción de los bloques incorporando las restricciones impuestas [7][8].

## 4.2. Procedimiento actual de El Soldado

El plan productivo de mediano plazo corresponde al programa que detalla la producción de los próximos 5 años detallando la extracción mensual del primer año en operación. El procedimiento actual utilizado en la operación El Soldado para construir este plan consta básicamente de 3 pasos:

- Recopilación información de Plan LOM y preparación para plan de mediano plazo
- Secuenciamiento de unidades de explotación
- Construcción plan productivo

### 4.2.1. Recopilación y preparación de información plan LOM

Se toma como input el plan productivo LOM el cual entrega las unidades de explotación de largo plazo (bancos).

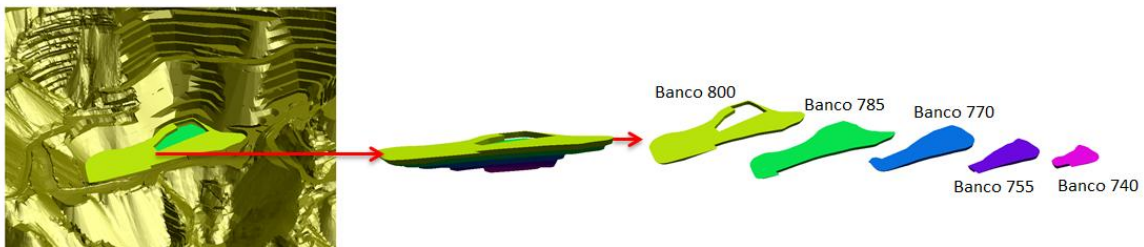


Figura 15: Bancos de una Fase en operación

Estas unidades de explotación son extraídas en horizonte de tiempos superiores al horizonte de tiempo del plan de mediano plazo, por lo que deben ser subdivididas en unidades

más pequeñas. Por lo tanto, se definen las unidades de explotación de mediano plazo las cuales corresponden a los polígonos de extracción (*el detalle de cómo se construyen estos polígonos se explica en el capítulo de antecedentes 5.1*).

Adicionalmente, se incorpora la información relacionada a los rendimientos de equipos involucrados en la extracción del plan LOM, los cuales indican el ritmo de extracción de los bancos a explotar. Del mismo modo, se ajustan estos valores a periodos más pequeños de tiempos (meses), con el objetivo de secuenciar la extracción de polígonos a un horizonte de tiempo menor al anual. El ingeniero de planificación de mediano plazo utiliza el software computacional Minesight el cual permite observar el banco a extraer, los polígonos disponibles y además permite obtener una cubicación de cada polígono (tonelaje, ley de cobre y destino). Esta última información es utilizada en conjunto con los rendimientos de equipos presentes, logrando así secuenciar respetando la capacidad de los equipos existentes.

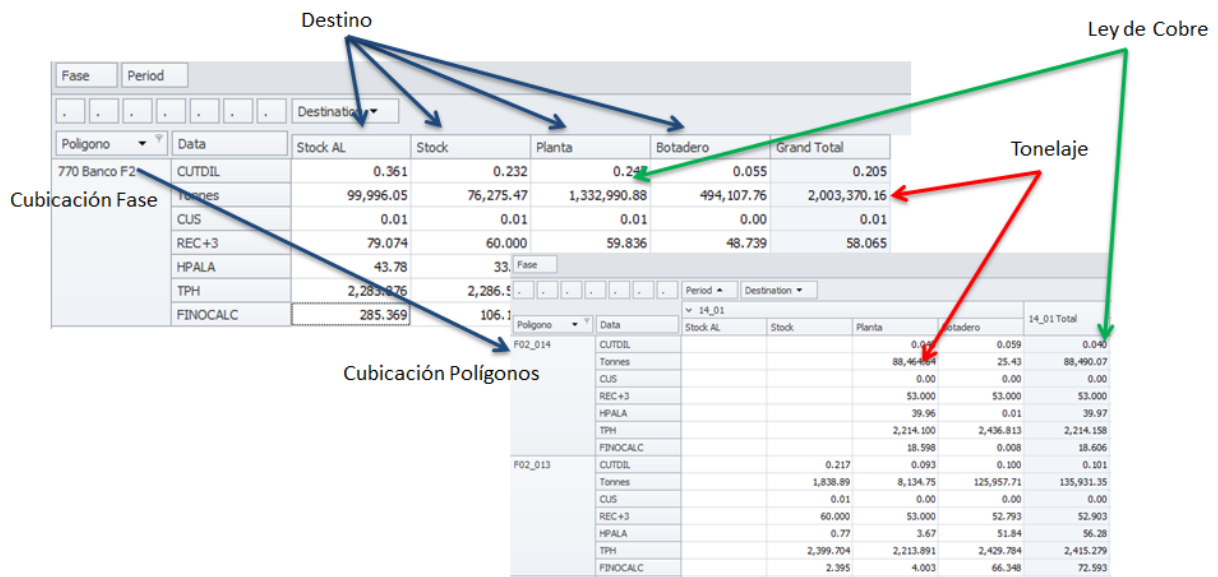


Figura 16: Ejemplo de Cubicación a través de Minesight

#### 4.2.2. Secuenciamiento de unidades de explotación

Para construir el secuenciamiento de los polígonos a extracción, el ingeniero de planificación de mediano plazo agenda respetando las restricciones de equipos y operacionales. Para considerar las restricciones de equipos, se obtiene de las cubicaciones la cantidad de horas de equipos requeridas por cada unidad de explotación, con lo que se adiciona la extracción de polígonos para un periodo y cuando no sobrepase la cantidad de hora máximas de equipos definidas por la flota existente. Por otro lado, el ingeniero incorpora restricciones de operación desde su experiencia, las cuales limitan la extracción de polígonos dentro de un banco, desde bancos distintos y a su vez priorizando la extracción de polígonos que posean una mayor cantidad de mineral. De esta manera, en la extracción realizada por el ingeniero no se considera la existencia de otras interacciones de los polígonos de extracción con labores adicionales a realizar, por lo que todo plan de trabajo adicional se planifica con el plan productivo una vez construido.

#### 4.2.3. Construcción de plan productivo

Con la secuencia de extracción ya definida, el ingeniero de planificación calcula la cantidad de mineral enviado a planta junto con la ley de cobre por periodo. Se reporta por tanto los polígonos a explotar por periodo con detalle mensual en el primer año y anual desde el segundo año. De esta manera, el plan productivo es una consecuencia de la secuencia generada con la incorporación de los rendimientos de equipos y restricciones operacionales entregadas por el mismo ingeniero de planificación.

#### 4.3. UDESS (Underground Development and Extraction Sequencing and Scheduling) [9]

UDESS es una herramienta que utiliza un modelo para programar actividades logrando obtener un plan óptimo considerando precedencias operacionales. En este caso específico, se pretende utilizar la herramienta UDESS al incorporar los trabajos de reconocimiento y relleno de cavidades en la extracción del rajo, logrando así generar un plan con mejor cumplimiento que el plan Budget 2013. Debido a que esta herramienta se usa en planificación subterránea, se debe adaptar el modelo para este caso específico, logrando con esto construir un plan productivo de mediano plazo.

Se muestra a continuación los principales aspectos del modelo del UDESS.

- Tasa máxima de desarrollo: muestra la tasa máxima de avance en metros de una actividad subterránea (sección túnel o unidad de producción). Se considera una tasa máxima de avance para los recursos de construcción y producción.
- Costo o Beneficio: existen valores positivos asociados a las actividades de extracción de mineral y por otro lado existen valores negativos para actividades de desarrollo y/o preparación de mineral.
- Recursos: Indica los materiales, equipos, trabajadores y tiempo necesarios para concretar una actividad. Adicionalmente, existe una disponibilidad de estos recursos que deberán ser repartidas en las actividades que sean necesarias.
- Precedencias operacionales: Esto relaciona las actividades previas a realizar para permitir el arranque de otras actividades. En general estas limitaciones están relacionadas a la mina en particular.
- Restricciones de producción: Se consideran restricciones tanto operacionales como técnicas para llevar a cabo las actividades.

El objetivo de la herramienta es integrar los planes de construcción y los planes de producción de manera coherente en un modelo que incorpore además rendimiento de equipos involucrados en la construcción de un plan productivo. La herramienta separa lo que es construcción de extracción y designa actividades, además asigna atributos que pueden ser costo o beneficio que posteriormente son relacionadas por restricciones de precedencias.

Para utilizar esta herramienta, primero se definen las actividades que pueden ser cualquier tipo construcción minera o extracción. Se adiciona información de cada una tales como  $V_{max}$  y  $V_{min}$  de extracción, ton, valor económico, etc. y se enlazan entre sí en base a una lógica

operacional. Luego se carga la información a UDESS y se realiza el cómputo que entrega un agendamiento eficiente en el tiempo de las actividades respetando las restricciones lógicas y no sobrepasando el uso de los equipos involucrados. El resultado es una carta Gantt con las actividades de preparación y producción de manera coherente y respetando restricciones lógicas.

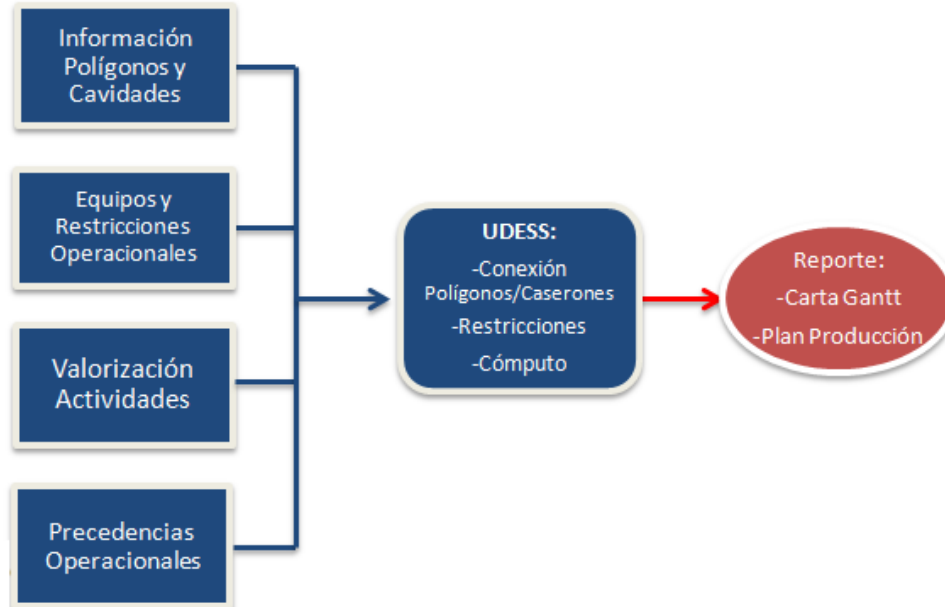


Figura 17: Esquema de uso de UDESS en caso estudio

Por lo tanto, en este caso se implementa la herramienta UDESS para construir un plan productivo que incorpore la interacción entre la mina rajo y la mina subterránea. Para lograr esto, en una primera instancia se definen las actividades que la herramienta debe programar. Debido a que se debe construir un plan productivo de mediano plazo, las actividades a agendar corresponden a la unidad de explotación en ese horizonte de planificación: los polígonos de extracción. Por otro lado, y para considerar la interacción existente entre la mina rajo y la mina subterránea, se deben adicionar como actividades las cavidades a rellenar. La relación existente entre estas cavidades y los polígonos se construye en base a la información obtenida del plan productivo Budget 2013 en el cual ya se conoce el momento que ocurre la intercepción de los polígonos y el relleno de las cavidades. Adicionalmente, cada actividad debe ser cubicada para conocer la cantidad de tonelaje a extraer (para el caso de los polígonos) y de tonelaje a rellenar (para el caso de las cavidades).

Para realizar la extracción de polígonos, se debe consumir una cantidad de horas de equipos (palas), y del mismo modo para el caso de las cavidades a rellenar, se consume una cantidad de horas de equipos (perforadoras). Por tanto, cada actividad consume una cantidad de horas que están limitadas por periodo y definidas por la flota presente en la operación El Soldado. De esta manera, se limita la extracción por los equipos existente.

Por otro lado la herramienta UDESS agenda actividades de manera óptima, por lo que requiere de una variable que pueda optimizar. En este caso, la variable a optimizar corresponde a un VAN a medida que avanza la extracción. Para calcular este VAN se valorizan las actividades

en cuanto a un beneficio o costo para el caso de los polígonos y cavidades. Por tanto, la herramienta agenda la extracción de polígonos y el tratamiento de cavidades maximizando un VAN.

Finalmente se incorporan restricciones operativas de una mina explotada mediante rajo abierto. Por un lado están las restricciones relacionadas a extracción de polígonos de bancos distintos y para los cuales existe un ángulo de talud máximo permitido. Además, existen limitantes operacionales para la extracción de polígonos dentro de un banco. Por otro lado existe una restricción operativa adicional de la operación El Soldado que considera una distancia horizontal entre polígonos de bancos distintos. Además, se incorporan como precedencias los polígonos que deben ser tratados producto de las cavidades a rellenar. Por lo tanto, todas estas restricciones se cargan como precedencias entre los polígonos las cuales son incorporadas dentro de la extracción que realiza UDESS.

Toda esta información se carga a la herramienta en la cual se realizan las conexiones entre las actividades a agendar, rendimientos de equipos a utilizar, valorizaciones de actividades, precedencias utilizadas y restricciones consideradas. Posteriormente, se realiza el cómputo que permite agendar las actividades de manera óptima.

El resultado corresponde a una carta Gantt que incorpora un programa óptimo de las actividades respetando las precedencias operacionales ingresadas y rendimientos de equipos. De esta manera se construye el programa de producción de mediano plazo junto con el programa de trabajos a cavidades subterráneas que no generan retrasos operacionales.



## 5. ANTECEDENTES

Se recopila la información necesaria para lograr modelar la extracción de la Mina El Soldado con la herramienta UDESS. Para esto se definen primero las actividades a considerar en el modelo a optimizar, los cuales corresponden a los polígonos de extracción junto con las cavidades a rellenar. Además, para considerar los tiempos involucrados en los trabajos a las cavidades, se realizan visitas a la mina con el objetivo de cuantificar el impacto que genera el tratamiento a las labores subterráneas. Por otro lado, se debe contar con información necesaria para validar la herramienta y realizar alguna calibración si es necesario.

### 5.1. Polígonos de Extracción

Para los distintos horizontes de planificación existen diferentes unidades de explotación considerados en cada plan a realizar. Para el caso de la planificación de largo plazo se toman en cuenta la extracción de bancos completo. En cambio, para la planificación de mediano plazo se toman en consideración polígonos de extracción para el primer año, y posteriormente porciones de bancos para los años restantes. Finalmente, para la planificación de corto plazo se toman en consideración porciones de los polígonos de extracción hasta llegar incluso a porciones de las dimensiones de cada pala en la operación. De esta manera, en la construcción del plan Budget se definen en primer lugar los polígonos de extracción, para posteriormente realizar una secuencia de explotación que entregue el plan productivo. Se destaca que estos polígonos corresponden a las primeras actividades a ser cargadas en la herramienta UDESS.

Existe una metodología al momento de subdividir cada banco de extracción en polígonos de extracción. Primero se definen los polígonos de extracción situados al borde del banco, que corresponde al sector donde se realiza una perforación y tronadura distinta a la producción, y con esto generar menor daño a la pared del rajo con la tronadura. Por lo tanto, se definen los primeros polígonos (llamados polígonos buffer) en el borde del banco y que están adyacentes a la pared del rajo, generando de esta manera polígonos de 30 metros de ancho desde el borde hacia adentro del banco. Luego se subdivide el resto del banco en polígonos que tomen como ancho dimensiones desde 70 a 100 metros y de largo entre 140 y 200 metros.

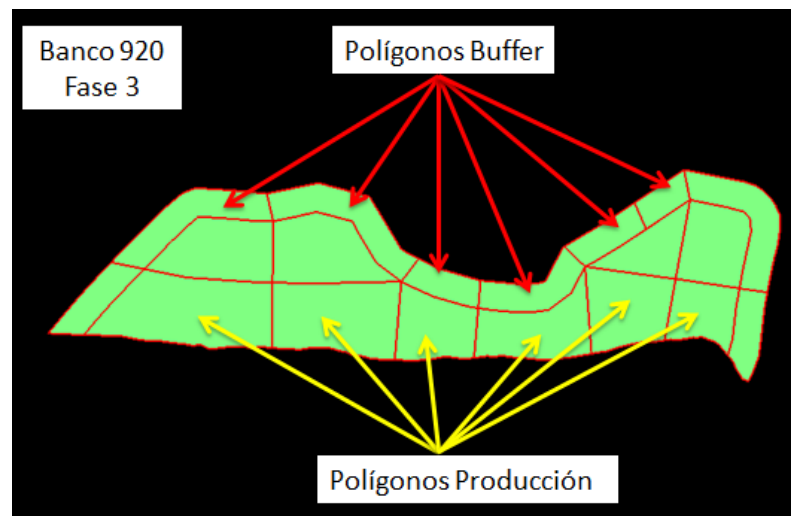
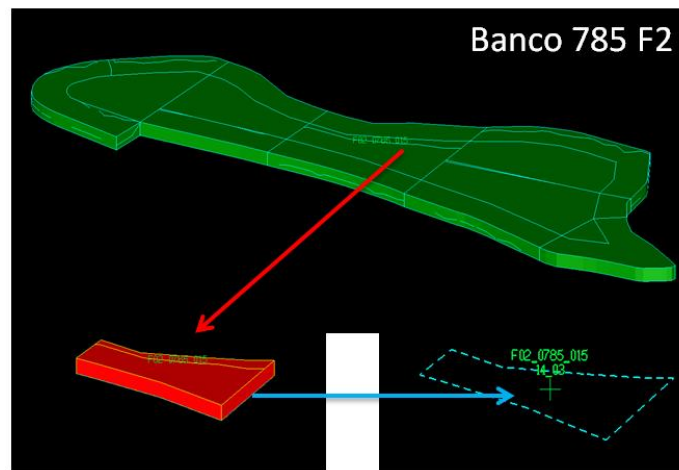


Figura 18: Ejemplo de Polígonos de extracción de Banco 920

De esta manera para cada banco se definen todos los polígonos de extracción a utilizar en la construcción del plan Budget para el año 2013. Es importante notar que también se definen los polígonos a extraer para el año 2014, 2015, 2016 y 2017.

Una vez definidos los polígonos de extracción, se requiere obtener información del tonelaje y la ley de cobre que cada uno posee. Para obtener estos datos, se utiliza el software computacional Minesight que realiza cubicaciones de cada polígono con el modelo de bloques entregando la cantidad de mineral, estéril, material a stock con sus respectivas leyes de cobre. De esta manera, se conoce el tonelaje a mover por polígono y la cantidad de cobre presente, datos que son el input para realizar una valorización de cada polígono y que es información vital en la optimización que se realiza en UDESS. Es importante destacar que a partir de esta simplificación se considera cada polígono como un punto en un espacio tridimensional con un tonelaje definido.

Adicionalmente, se debe conocer la información espacial de cada polígono de extracción, ya que cada ubicación de los polígonos es condicionante de las restricciones operacionales ingresadas a la herramienta UDESS. Por lo tanto, para cada polígono de extracción se realiza una estimación del centro de masa mediante el software Minesight. En la siguiente figura se observa el cálculo del centro de geométrico para un polígono específico del banco 785 de la fase 2.



**Figura 19: Estimación de Centro de Masa de polígono de extracción con Software Minesight**

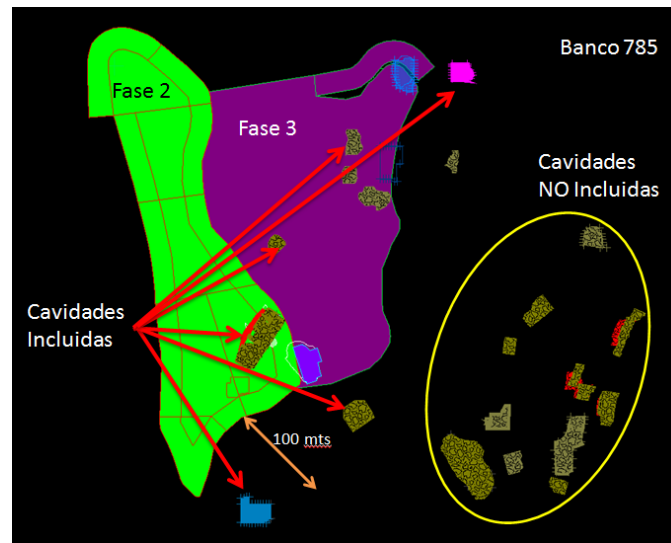
Como se observa, el software Minesight entrega casi de manera automática el centro de masa de un polígono, del cual se obtienen las coordenadas X, Y y Z que son utilizadas en los cálculos posteriores y que muestran una simplificación de la representación de los polígonos.

## 5.2. Cavidades

En la operación El Soldado se cuenta con una mina subterránea cerrada desde el año 2010. La mina en su momento de operación fue operada mediante el método de Sub Level Open Stopping o “Caserones por Subniveles” [10] y que consiste básicamente en la excavación de unidades de explotación llamadas caserones en los sectores donde se encuentra mineral. Estos caserones pueden quedar rellenos producto del hundimiento o vacíos, caso en el cual deben ser rellenos por material estéril para mejorar la estabilidad del rajo que se encuentra sobre la mina subterránea.

Por lo tanto, se obtiene la información de las cavidades que están en directa e indirecta relación con las fases en operación (fases 2, 3 y 4), las cuales junto con los polígonos de extracción conforman todas las actividades a programar con la herramienta UDESS. Como criterio para filtrar dentro de todas las cavidades presentes, se toman en cuenta solo las que son interceptadas directamente por los bancos de las fases en operación, y además se agregan las cavidades que están a una distancia insegura de estabilidad desde la pared del rajo. Debido a esto, en una primera instancia se toman en cuenta todas las cavidades que están incluidas a una distancia inferior a 100 metros desde los bordes de cada banco ya que esta distancia corresponde a la definida por el área de geomecánica para la cual puede existir riesgo de impacto en el rajo.

De esta manera se obtiene el primer filtro de las cavidades que son relacionadas con la interacción del rajo, y que deben posteriormente ser reconocidas y rellenas por la operación mina.



**Figura 20: Selección de Cavidades a considerar en Estudio para Banco 785**

Posterior a la selección de las cavidades, se debe obtener información de la ubicación espacial y las dimensiones de cada una. Por lo tanto, cada cavidad es cubicada con el software Minesight y se calcula el centro de masa correspondiente, logrando así simplificar el uso de las cavidades como un punto con masa, de la misma forma que ocurre con los polígonos de extracción (Figura 21).

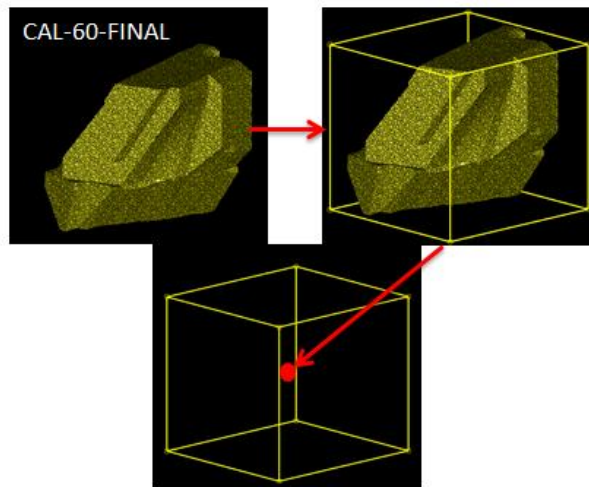


Figura 21: Estimación de Centro de Masa de Cavity con software Minesight.

Debido a que las cavidades solo representan un costo para la operación, estas son valorizadas en base a la perforación necesaria para construir la chimenea de relleno. Además se agrega el costo del carguío y transporte requerido para poder rellenar la chimenea y la cavidad.

### 5.3. Trabajos de Control a Cavidades

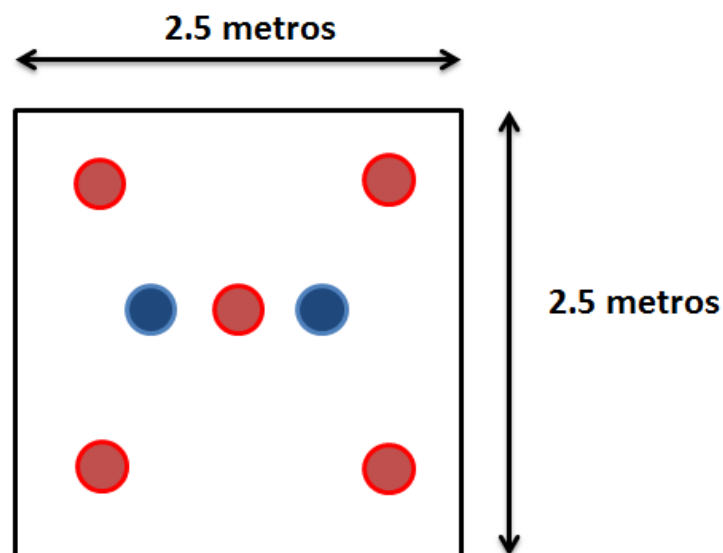
Del procedimiento de reconocimiento y control de cavidades elaborado por el área de geomecánica de la operación El Soldado, se planifican las auscultaciones de reconocimiento y la construcción de la chimenea posterior a la construcción del plan productivo Budget. Esto ocurre debido a que en una primera instancia, se definen los polígonos a extraer por banco y luego se escogen los que tienen una relación directa con las chimeneas de relleno a construir. De esta manera, toda la planificación de los trabajos a las cavidades subterráneas corresponde a una consecuencia del plan Budget. Por lo tanto, se realiza una planificación de las auscultaciones a realizar, las cuales se llevan a cabo en la superficie del rajo a diferentes distancias sobre el techo de las cavidades. Posteriormente, se realiza la construcción de la chimenea de relleno cuando se comprueba que la chimenea está a una distancia apropiada para ser rellenada. Por lo tanto, se realizan visitas a la mina con el objetivo de estimar los tiempos involucrados en cada proceso desde la primera auscultación de reconocimiento hasta lograr obtener una chimenea rellena.

El primer paso corresponde a realizar la primera auscultación, la cual se realiza a 100 metros desde la superficie del rajo hasta el sector donde se encuentra la cavidad. Esta auscultación permite verificar que la información existente de la cavidad está correcta y con esto dar el inicio para la evaluación geomecánica que posteriormente se realiza. Desde la información mina, el tiempo involucrado en realizar esta auscultación corresponde a aproximadamente 1 turno de trabajo, ya que corresponde a una perforación de 100 metros con una perforadora de aire reverso que no es utilizada en la producción, y por ende tiene una disponibilidad mayor. Se destaca que este tipo de perforadora realiza tiros con mayor precisión que las perforadoras de producción, logrando de esta manera disminuir el tiempo adicional que se toma en realizar tiro extras cuando existen desviaciones.

Una vez realizada la auscultación de reconocimiento, se toma la información para definir condiciones de la cavidad, ubicación espacial, comparar los datos obtenidos con los existentes y

con esto posteriormente realizar una evaluación geomecánica. El tiempo transcurrido en realizar estos últimos trabajos bordea los 3 días de trabajo sin afectar la operación de la mina. Por lo tanto, los procesos hasta la evaluación geomecánica no afectan mayormente la producción de la mina y por ende los tiempos involucrados en estos trabajos no son considerados como retrasos operacionales.

Posteriormente, y a una distancia de 40 metros desde el techo de la cavidad hasta la superficie del rajo, se realiza la segunda auscultación de reconocimiento para así verificar la condición de la cavidad, y con esto comenzar la construcción de la chimenea de relleno. El proceso de esta auscultación se realiza en menos de 1 turno debido a la corta distancia que existe entre la superficie del rajo y la cavidad. La chimenea de relleno la construye el área de perforación y tronadura junto con el diseño y definición del área de geomecánica. Esta se realiza con un método de VCR, en el cual se realizan tiros que se rellenan con explosivo en su parte interior y luego son detonados desde el fondo hacia la superficie en múltiples tramos. La chimenea tiene dimensiones de 2,5x2,5 metros y se construye con la perforación de 7 tiros en total (4 tiros en esquinas y 3 centrales) con la configuración de la siguiente figura.



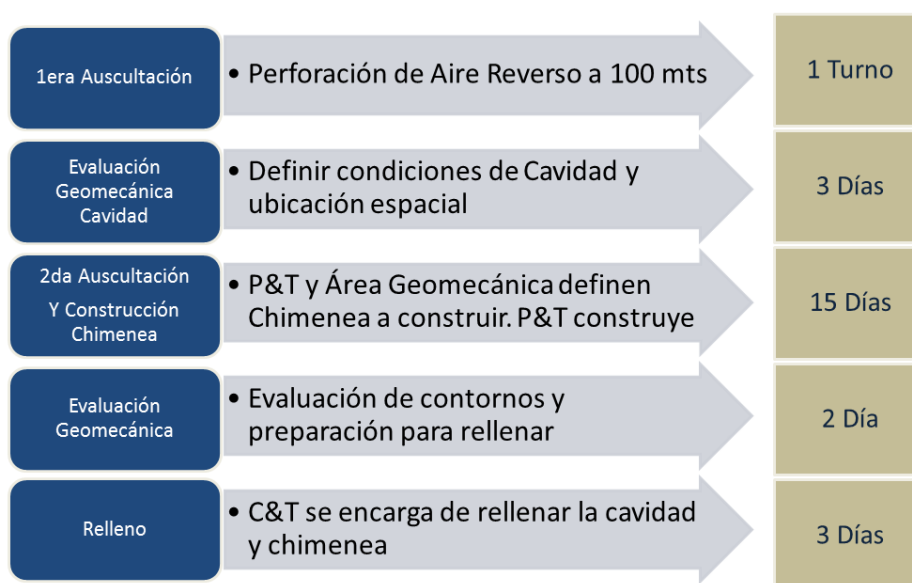
**Figura 22: Dimensión chimenea de relleno y posición de tiros**

De esta manera, y una vez realizados los tiros, se procede al relleno de cada uno con explosivo para lograr un avance de 2 metros por cada tronadura. Adicionalmente, al momento de realizar la tronadura existe un radio de seguridad que alcanza los 50 metros a la redonda de donde se sitúa la cavidad, por tanto no puede existir alguna operación de extracción que se encuentre en el área involucrada. Así, se logra construir la chimenea la cual toma un tiempo promedio de 20 días en construcción, tiempo que varía dependiendo de los rendimientos de las perforadoras y de las eventualidades operaciones existentes.

Luego, se procede a realizar una evaluación geomecánica de la chimenea, en donde se analizan las desviaciones que ocurren en el proceso de perforación y tronadura con respecto al diseño original. En esta labor, se realiza un saneamiento de la chimenea y, en caso de ser necesario, se vuelven a realizar tiros de perforación para hundir sectores que no fueron hundidos por los tiros iniciales. Este proceso tarda alrededor de 2 a 3 días dependiendo si se debe realizar

hundimientos adicionales o no. De esta manera y una vez evaluada la chimenea, el área de geomecánica da la autorización para comenzar el relleno de la cavidad.

Para el relleno de cavidad, el área de carguío y transporte lleva material estéril que es depositado en la chimenea construida. Dependiendo de las dimensiones de cada cavidad, este trabajo puede tardar entre 2 a 3 días. En general, el material ocupado para rellenar tiene una granulometría que no afecta el continuo flujo de material hacia la cavidad, logrando de esta manera rellenar la cavidad de manera rápida. Una vez rellenas la cavidad y la chimenea, el área de geomecánica evalúa la condición de relleno, y en caso que se encuentre dentro de parámetros seguros sin riesgo de colapso, se da la autorización para limpiar y dejar el sector de trabajo disponible para ser ocupado por la operación cuando sea necesario.



**Figura 23: Tiempos involucrados en todo el proceso de construcción de chimenea de relleno**

Finalmente, los tiempos que afectan la operación y limitan la extracción del sector situado alrededor de la chimenea de relleno corresponden a los trabajos de construcción de chimenea, evaluación de contornos y relleno de cavidad. De esta manera, se limita en 20 días el sector situado 50 metros a la redonda desde donde se construye la chimenea de relleno. Este tiempo toma importante relevancia en el momento de incorporar restricciones operacionales a la extracción de los polígonos en UDESS.

#### **5.4. Plan Budget 2013**

El plan Budget se realiza una vez al año y comprende el plan productivo de los cinco próximos años con un detalle a nivel mensual del primer año. De esta manera, se busca generar un plan de mediano plazo que sea tomado por el planificador de corto plazo y realice el plan mensual detallado en semanas. Dentro de la información más relevante que se encuentra en el plan Budget, están los movimientos de material en la mina, cantidad de mineral enviado a planta, ley de mineral, recuperaciones de planta, capacidades plantas, tonelaje en stock y cobre fino producido por periodo. Adicionalmente, se obtiene del plan Budget las distintas fases en operación y también la secuencia de las unidades de extracción o polígonos.

La importancia de obtener esta información radica en que es esencial al momento de validar los resultados obtenidos por la herramienta y, en caso que sea necesario, se realizará una calibración con el objetivo de generar resultados con menor desviación respecto a un plan productivo ya calculado. De esta manera, la mayor parte de la información obtenida del Plan Budget 2013 es utilizada para validar los resultados. Por lo tanto, se muestran los principales resultados del Plan Budget 2013.

Plan Productivo con Ley:

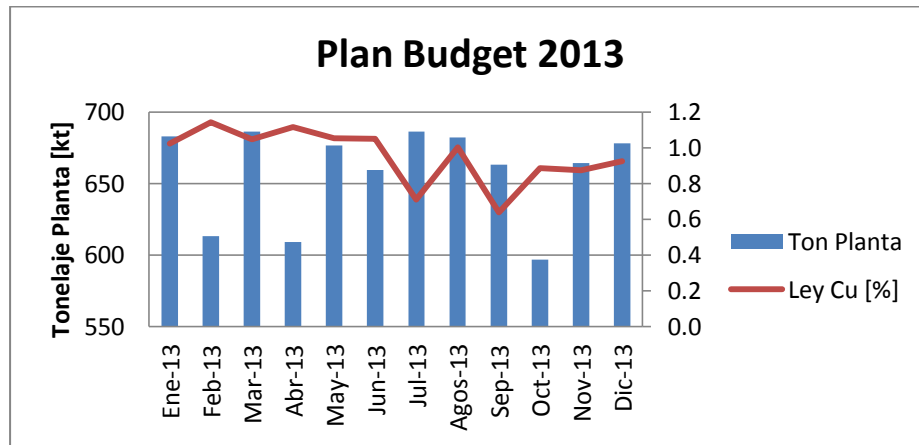


Figura 24: Plan productivo Budget para año 2013

Se destaca que al momento de calcular el plan productivo Budget, existe una limitante del movimiento máximo a tratar por la planta de procesamiento, por lo existe una restricción que debe ser considerada al momento de construir el plan productivo. Se muestra en la tabla 5 la cantidad máxima a tratar por la planta de procesamiento para el año 2013.

Tabla 5: Tonelaje Máximo a tratar en Planta de Procesamiento para el Año 2013

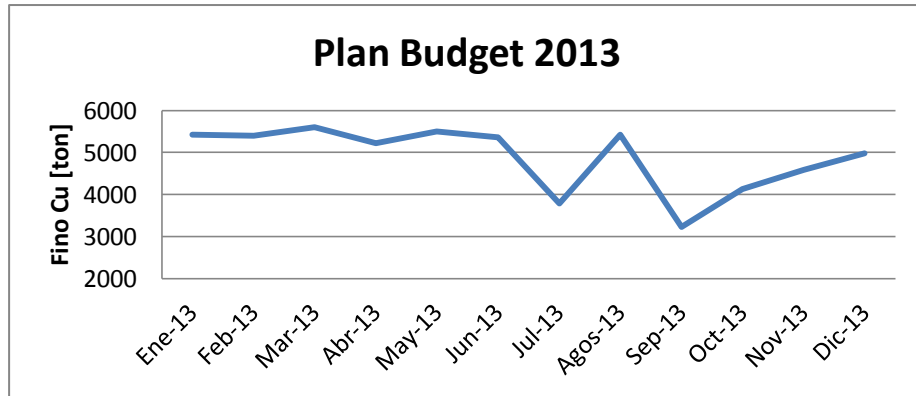
	Ene	Feb	Mar	Abr	Mar	Jun	Jul	Agos	Sep	Oct	Nov	Dic
<b>Ton Planta [kton]</b>	683	613	686	609	677	659	686	682	663	597	664	678

Algo similar ocurre con la recuperación metalúrgica de la planta, que corresponde a otra restricción que afecta la producción de cobre fino mensual. En la tabla 6 se presentan las distintas recuperaciones metalúrgicas que se estiman para el año 2013. Es importante notar que estos valores son calculados en base a predicciones del modelo de bloques y que varían en determinados rangos dependiendo de factores como la ley, dureza, mineralogía, entre otros, y que no es motivo de este estudio.

Tabla 6: Recuperación Metalúrgica Planta para año 2013

	Ene	Feb	Mar	Abr	Mar	Jun	Jul	Agos	Sep	Oct	Nov	Dic
<b>Rec. Planta [%]</b>	77.7	77.0	77.9	76.7	77.1	77.4	77.6	79.3	76.3	78.1	78.9	79.6

Así, con estos datos se tienen las primeras restricciones para construir el plan productivo para el año 2013. Se obtiene además, la producción de cobre fino del Plan Budget para el año 2013.



**Figura 25: Cobre Fino Plan Budget año 2013**

Con este último dato se puede comparar si existe una ganancia o no en la producción de fino para el año 2013, y de esta manera conocer si la metodología empleada ayuda a generar una ganancia para la operación El Soldado. Además, se tiene la información de la producción de cobre fino para el año 2014 con lo que se puede saber si existe una ganancia de cobre fino con el nuevo plan a generar. Cabe adicionar que este plan productivo presentado está en directa relación con la flota de equipos existentes en la mina El Soldado.



## 6. CASO ESTUDIO

Con la información de polígonos de extracción, cavidades, tiempos involucrados en los trabajos en la construcción de chimenea de relleno y el plan Budget 2013, se procede a preparar la información y restricciones necesarias para la herramienta UDESS.

### 6.1. Precedencias Operacionales

Operacionalmente, existen limitantes del proceso de extracción polígono a polígono ya que físicamente se extraen en un orden preestablecido y cuando los equipos involucrados en la extracción puedan llevarlo a cabo. De esta manera, existen restricciones operacionales tanto verticales como horizontales al momento de la extracción, y que toman importante relevancia en el modelo a formularlas con la herramienta UDESS. De esta manera, se detallan las precedencias operacionales tanto verticales como horizontales a cargar en la herramienta de UDESS.

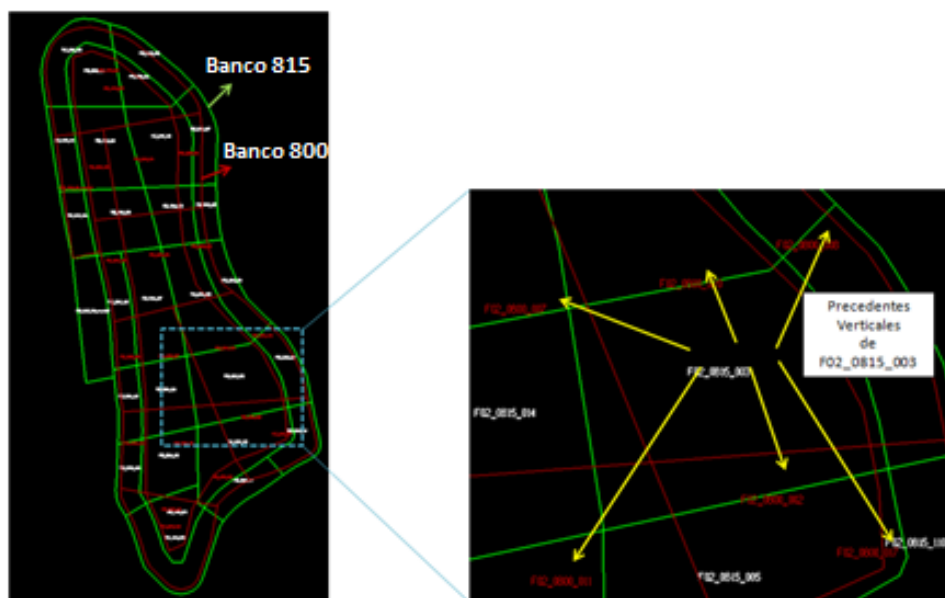
#### 6.1.1. Verticales o Restricciones de Talud

La secuencia lógica de extracción de un rajo corresponde al avance desde los bancos superiores hacia los inferiores. Sin embargo, dentro de cada banco pueden existir sectores aún sin explotar cuando se comienza con la extracción del banco inferior. En este contexto, se pueden definir precedencias verticales entre polígonos de bancos superiores e inferiores, de tal manera que al no extraer la sobrecarga de polígonos de un banco superior se limita la extracción de un banco inferior (ver figura 26)



Figura 26: Precedencia Vertical entre polígonos

Para definir la precedencia vertical, se debe considerar la interacción entre los polígonos de un banco superior y los polígonos de un banco inferior. Para esto, se asume que los polígonos del banco superior proyectan una “sombra” en el banco inferior, área de la cual se incorporan como sucesores todos los polígonos del banco inferior que se encuentren dentro del área del polígono proyectado.



**Figura 27: Precedencias Operacionales Verticales**

Como se observa en la figura 27, se muestran 2 bancos en donde el banco 815 mostrado en verde está sobre el banco 800 ilustrado en rojo. El polígono F02\_0815\_03, que corresponde al banco 815, proyectado por sobre el banco 800 genera una sombra en la cual 6 polígonos del banco 800 están al menos tocando el área proyectada (indicados con una flecha amarilla). De esta manera, estos 6 últimos polígonos del banco 800 corresponden a sucesores del polígono F02\_0815\_03.

### 6.1.2. Horizontales

Dentro de un banco de explotación, se tienen definidos los polígonos de extracción y rampas de accesos. La secuencia lógica de extracción comienza por la llegada de una pala al banco por la rampa (o rampas) de acceso. De esta manera, se debe imponer la extracción de la rampa de acceso en primer lugar para posteriormente realizar un camino con la pala dentro del banco completo. Este camino debe ser guiado o definido con anterioridad logrando de esta manera que la herramienta UDESS, junto con ir avanzando la extracción en un banco, vaya optimizando.

El camino predefinido se realiza en base al criterio operacional de ir extrayendo los polígonos que posean mineral en primer lugar, por lo que se define un recorrido situando la pala inicialmente en la rampa para luego seguir hacia los sectores que posean mayor mineral dentro del banco. Es importante considerar que para la construcción de este camino, se considera un área operacional de la pala de 60 metros de diámetro, por lo que al definir el camino se deben adicionar polígonos laterales si existe uno con menor área al operacional de la pala. Posteriormente, se corrige el camino de manera de seguir una ruta lógica de la pala e ir avanzando en el banco desde un sector a otro, hasta finalmente incorporar todos los polígonos en el recorrido. Esta corrección permite una operación más real de la pala debido a que reduce las distancias entre polígonos seguidos, y genera una explotación del banco que permite liberar mayor cantidad de polígonos del banco inferior.

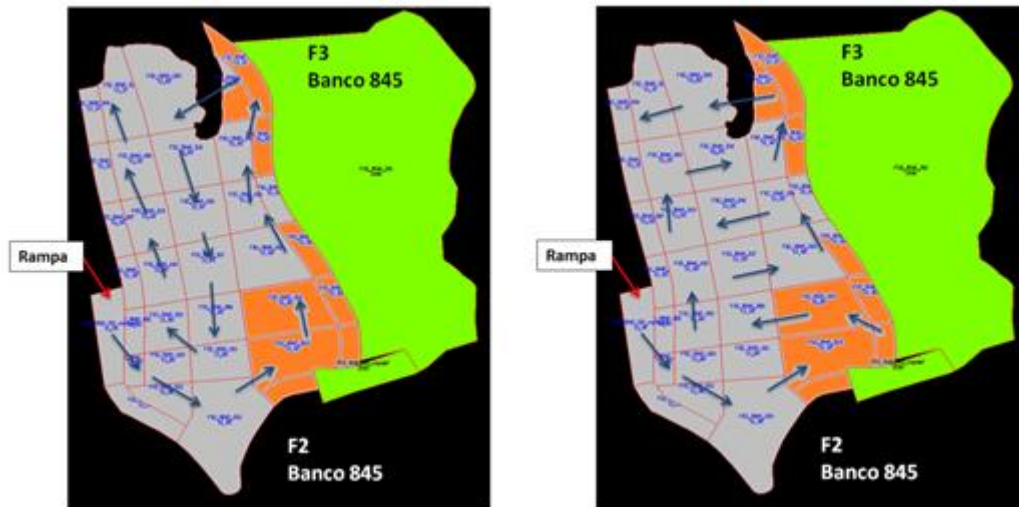


Figura 28: Camino Predefinido de Pala en Banco sin corrección (izquierda) y con corrección (derecha)

Así, se define una secuencia de extracción dentro del banco en donde cada polígono de extracción tiene su polígono sucesor y predecesor (a excepción de la rampa de acceso y el último polígono extraído del banco). Con esta información preparada, se pueden incorporar las precedencias operacionales verticales y horizontales a la herramienta UDESS.

## 6.2. Valorización Polígonos y Tratamiento de Cavidades

### 6.2.1. Polígonos de Extracción

Cada polígono de extracción contiene una cantidad determinada de mineral o estéril, y en algunos casos, un polígono puede contener ambos. Cuando se contiene mineral, el polígono constituye una ganancia de dinero y por otro lado, cuando se contiene solamente material estéril el polígono constituye un costo para la mina. Por tanto, y debido a que para extraer cada polígono se tienen que extraer previamente otros, se realiza una valorización de cada polígono con el objetivo de colocar en la herramienta UDESS un parámetro para poder realizar la optimización. En este caso particular, la herramienta entregará el momento en que se extrae cada polígono de extracción con el objetivo de realizar la extracción y al mismo tiempo de ir optimizando el flujo de dinero en el tiempo, logrando con esto generar un mayor retorno para la operación.

Se realiza la valorización de cada polígono utilizando como información de entrada los datos obtenidos desde la cubicación realizada con el software Minesight. En la cubicación se entrega el tonelaje por polígono separado por destino, en donde se diferencian la cantidad de mineral a planta, estéril a botadero y mineral a stock. Para cada uno, además se cuenta con la ley media de cobre con lo que es posible calcular la cantidad de cobre fino que cada polígono contiene. Se destaca que para este cálculo solo se considera la cantidad de material enviada la planta de procesamiento (comenzando por el chancado primario) y el material enviado a Stock que es enviado posteriormente a la planta cuando se requiera. Este cálculo del cobre fino contenido se utiliza para conocer el ingreso que cada polígono genera. Por otro lado, para obtener la valorización de cada polígono se debe estimar previamente el costo de cada uno, por lo que se calcula el costo mina y el costo planta. Se hace notar que el costo mina es aplicado a todos los

polígonos considerados en este estudio, sin embargo, el costo planta es calculado sólo para los polígonos que son enviado a planta.

Por lo tanto, para realizar la valorización se utiliza la siguiente expresión la cual entrega el beneficio de cada polígono de extracción.

$$\text{Beneficio} = (P_{Cu} - C_{TCRC} - C_{FA} - C_{G\&A}) * L_{Cu} * R_{Cu} * T_{bl} - (C_p + C_m) * T_{bl}$$

En donde:

$P_{Cu}$ : Precio Cobre

$C_{TCRC}$ : Costo Tratamiento Concentrado

$C_{FA}$ : Costo Transporte Concentrado

$C_{G\&A}$ : Costos Generales y de Administración

$L_{Cu}$ : Ley de Cobre

$R_{Cu}$ : Recuperación de Cobre

$T_{bl}$ : Tonelaje de Bloque

$C_p$ : Costo Planta

$C_m$ : Costo Mina

Por lo tanto, se solicitan los valores anteriores en donde el primer término de la derecha corresponde a los ingresos y el segundo a los costos.

El precio de Cu, Recuperación de cobre, Costo de tratamiento y concentrado, Costo de transporte de concentrado, además de los Costos generales y de administración son entregados por el área de planificación los cuales son resumidos en la siguiente tabla.

**Tabla 7: Datos para estimar ingresos por polígono**

$P_{Cu}$ [US\$/lb]	3.25
$C_{TCRC} + C_{FA}$ [US\$/lb]	0.33
$C_{G\&A}$ [US\$/tt]	1.97
$R_{Cu}$ [%]	78

Se hace notar que para cada polígono se considera la multiplicación de  $L_{Cu} * T_{bl}$  como el contenido de cobre presente y que varía de un polígono a otro. Por lo tanto, con estos datos se obtiene el ingreso por polígono de extracción.

Por otro lado, se definen el costo de mina y planta:

El costo mina se desglosa en varios costos que son estimados en el área de planificación de El Soldado. Estos costos corresponden a: Costo Perforación y Tronadura, Costo de Carguío y Transporte, Costo de Servicios Auxiliares, Costos de Administración y Gestión y Gastos propios Mina.

**Tabla 8: Costo Mina Estéril y Mineral desglosado**

	Costos [US\$/ton]	
	Estéril	Mineral
Perforación	0.18	0.18
Tronadura	0.2	0.2
Carguío	0.51	0.51
Transporte	0.76	1.72
Servicios Auxiliares	0.32	0.32
A&G	0.23	0.23
Gastos Propios Mina Rajo	0.08	0.08
<b>Costo Mina Total</b>	<b>2.279</b>	<b>3.238</b>

Se destaca que la mayor diferencia entre los costos mina entre mineral y estéril, es provocada por las mayores distancias que implica la descarga de mineral al chancador primario.

Por otro lado, el costo planta es entregado por el área de finanzas el cual es calculado como 8.33 US\$/ton. Por lo tanto, con estos datos se tiene el costo de extraer polígono completo y, en caso de ser necesario, el costo de procesamiento cuando es mineral.

Con los datos anteriores se obtiene la valorización de cada polígono como *Ingresos – Costos*. Lógicamente para el caso de todos los polígonos que sólo posean material estéril la valorización es negativa. Por otro lado, cuando los polígonos posean mineral con suficiente contenido de cobre que pague sus costos, el beneficio es positivo.

Para ejemplo de la valorización, ir a anexos subcapítulo 15.5

### 6.2.2. Tratamiento a Cavidades Subterráneas

Para considerar las cavidades dentro de la optimización que genera la herramienta UDESS, se debe tomar en cuenta el gasto debido a que la construcción de la chimenea de relleno, además del gasto que implica el posterior relleno de la cavidad con material estéril. Por lo tanto, los trabajos a realizar en las cavidades solo significan un gasto para la operación. Para el gasto de la construcción de la chimenea de relleno se debe considerar la perforación y tronadura que se realiza en el sector, por lo que del mismo cálculo que se toma para el costo mina, se considera el gasto de perforación y tronadura en base a la cantidad de tonelaje que debe ser tronado para formar la chimenea. Para obtener este tonelaje, se utiliza las dimensiones de la chimenea de relleno y se toma en cuenta la densidad de la roca que toma un valor de 2.6 ton/m<sup>3</sup>. Como cada chimenea de relleno tiene una altura promedio de 40 metros y una dimensión de 2.5x2.5 metros de área, la cantidad a tronar por cada chimenea asciende a la cantidad de 650 toneladas.

En cuanto al costo de carguío y transporte, se tiene la información de las dimensiones de cada cavidad con lo cual se conoce a priori el tonelaje necesario para rellenar cada una. De esta manera, y con los costos de carguío y transporte ya definidos previamente en el cálculo del costo mina, se estima el costo de relleno a cada cavidad como la cantidad de tonelaje a rellenar por el costo de carguío y transporte. Es importante notar que el relleno a utilizar corresponde a material

estéril que se encuentra en botaderos cercanos al lugar de donde se encuentran las chimeneas de relleno.

Adicionalmente, se consideran otros gastos tales como los servicios auxiliares, administración y generales, y gastos propios de la mina. Para estos se considera el tonelaje tanto a tronar como a rellenar, los que posteriormente son multiplicados por los gastos ya definidos en el cálculo del costo mina. De esta manera se obtiene el costo final de las cavidades como el costo de perforación y tronadura, el costo de carguío y transporte y los otros costos adicionales mencionados anteriormente, el cual en promedio asciende a 2.95 US\$/m<sup>3</sup> de material de relleno. Así, y con el costo total asociado a la cavidad, se tiene la información necesaria para incorporarla a la herramienta UDESS, la que posteriormente genera la optimización y que indica el momento óptimo para realizar los trabajos.

### 6.3. Restricciones Operacionales Mina El Soldado

Operacionalmente existen otras restricciones al momento de la extracción entre bancos distintos. Particularmente, existe una restricción impuesta en la mina El Soldado que tiene relación con una distancia mínima horizontal de trabajo cuando se cuenta con equipos trabajando en bancos distintos. El motivo de esta restricción es debido a que se pueden provocar accidentes a trabajadores cuando existe manejo de material en dos bancos cercanos, lo que puede generar un movimiento de material hacia un banco inferior. Debido a esto, se considera una distancia mínima horizontal de 150 metros de operación entre bancos distintos (figura 29)

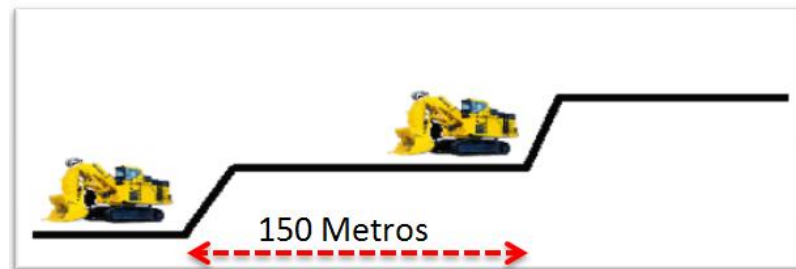
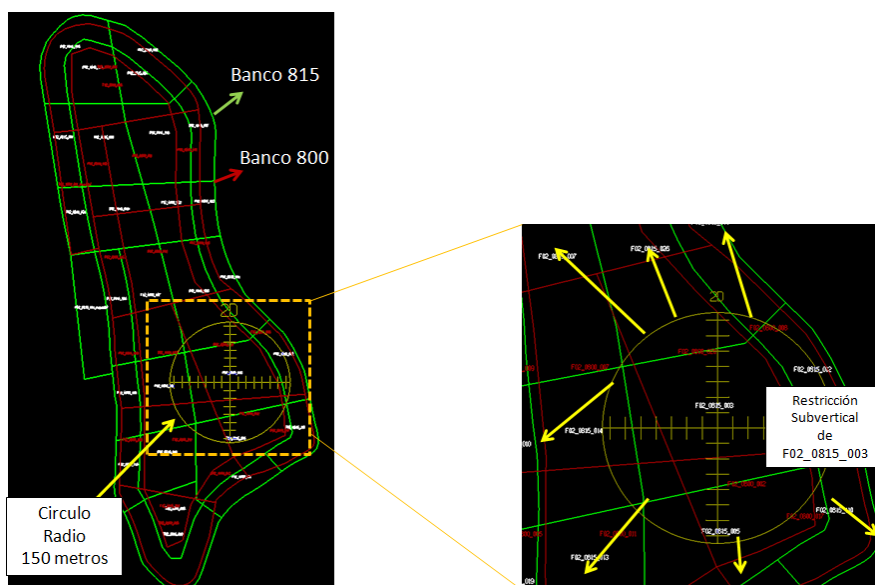


Figura 29: Restricción de operación en al trabajar en bancos distintos

Para considerar esta restricción, se asume que desde el centro de masa de cada polígono de extracción se proyecta una sombra con un radio de 150 metros hacia el banco inferior, área del cual si existe algún centro de masa de los polígonos del banco inferior, se incluyen como sucesores del polígono superior.



**Figura 30: Restricción operacional para trabajos en bancos distintos**

De un modo similar que al considerar la restricción operacional vertical, se tiene que para el polígono F02\_0815\_003 del banco 815 existen 7 polígonos sucesores del banco inferior 800. De esta manera, y comparando esta restricción operacional con la restricción vertical detallada anteriormente, se asume que la restricción operacional de trabajos en bancos distintos es más fuerte que la restricción operacional vertical, debido a que el radio de 150 metros agrega una cantidad mayor de polígonos sucesores a un polígono determinado. Por tanto, esta restricción enmascara la restricción operacional vertical, y por ende, solo es necesario cargar esta restricción en la herramienta UDESS.

Otra restricción operacional corresponde a la limitante de extracción en los polígonos que se encuentren a 50 metros en el momento de la construcción de una chimenea de relleno, por tanto, no se puede realizar extracción hasta que la cavidad esté completamente rellena. Esta restricción es adicionada en la interacción de cada cavidad con el polígono en donde se construye la chimenea, en donde se agregan también los polígonos que se encuentren a 50 metros desde el lugar donde se construye la chimenea de relleno.

#### **6.4. Flota de Equipos y Rendimientos**

Para llevar a cabo la extracción de los polígonos, se debe definir la flota de equipos presente en la mina y con esto incorporarla como restricción dentro de la herramienta UDESS. Esta restricción juega un papel fundamental debido a que es la restricción fuerte que limita los movimientos por periodo. Por lo tanto, se cuenta con la información del área de planificación que mes a mes actualiza la flota de equipos presente junto con sus respectivas disponibilidades y rendimientos operacionales.

Es importante mencionar que dentro de la flota de equipos presente en la mina, en este estudio solo son consideradas las palas para medir la productividad de la mina y las perforadoras para los trabajos de construcción de chimeneas de relleno. Esta simplificación se toma ya que

particularmente en la mina El Soldado, las palas corresponden al cuello de botella existente y por ende son las que limitan la producción de la mina, contrario a lo que ocurre en algunas minas en donde la flota de camiones es el cuello de botella.

Por otro lado, para cuantificar el trabajo de construcción de chimeneas de relleno, se toma el rendimiento de equipos de perforación. Esta simplificación es debido a que la mayor parte del tiempo involucrado en la construcción de las chimeneas corresponde a la perforación, por lo que se asume que la perforadora es la que genera el cuello de botella de esa labor. Por lo tanto, solo se toman en consideración los rendimientos operativos de las palas para la extracción de los polígonos y las perforadoras para los trabajos a las cavidades. En cuanto a la flota, se consideran todas las palas presentes en la mina El Soldado para la extracción y solo 3 perforadoras para la construcción de la chimenea de relleno.

**Tabla 9: Flota y rendimientos de equipos considerados en UDESS.**

	Flota	Rendimientos	
Palas PC5500	6	2200 TPH	
Perforadora DI600	3	18 mts/hora	2381.4 ton/hora

Adicionalmente se incorporan la disponibilidad de la pala PC500 que toma un valor del 78% y una utilización del 81%, datos que también son integrados a la herramienta UDESS. Para el caso de las perforadoras se considera que siempre están disponibles y que presenta una utilización del 90%. Esto debido a que el trabajo que realizan es aislado y en general no presenta interferencias.

### **6.5. Interacción Polígonos y Cavidades**

Para definir la interacción entre polígonos y cavidades, se mide 40 metros desde el techo de todas las cavidades hacia superficie, en donde se intercepta a algún polígono de extracción. En caso de no generarse la interacción, se ajusta al polígono más cercano y que no esté a una distancia menor a 40 metros sobre el techo de la cavidad. De esta manera, se busca por banco los polígonos que son posteriormente relacionados a las cavidades. Para lograr esto, se cargan los datos de cavidades y los polígonos de extracción en el software Minesight, dentro del cual se buscan el techo de todas las cavidades. Desde ahí, se busca 40 metros hacia superficie de manera que se define el polígono en donde es construida la chimenea de relleno. De esta manera, se genera una relación entre el polígono que es intervenido y la cavidad que se rellena.



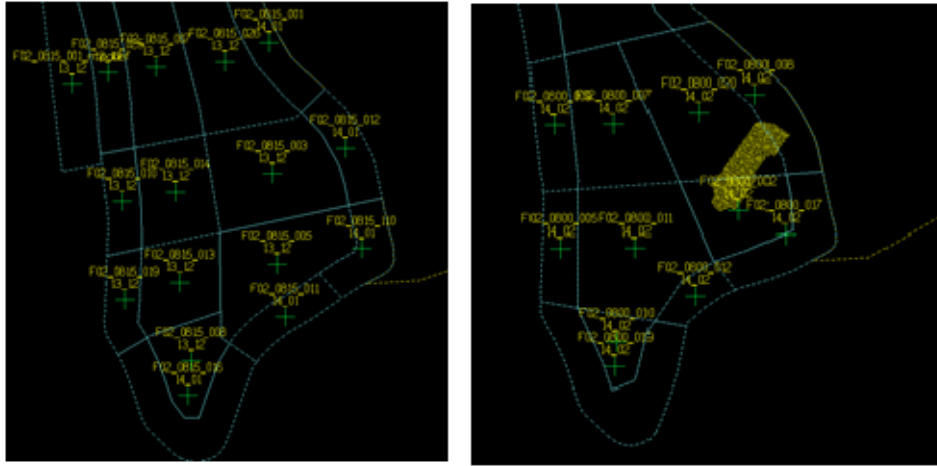


Figura 31: Banco sin interacción con cavidad (izquierda) y banco con interacción con cavidad (derecha)

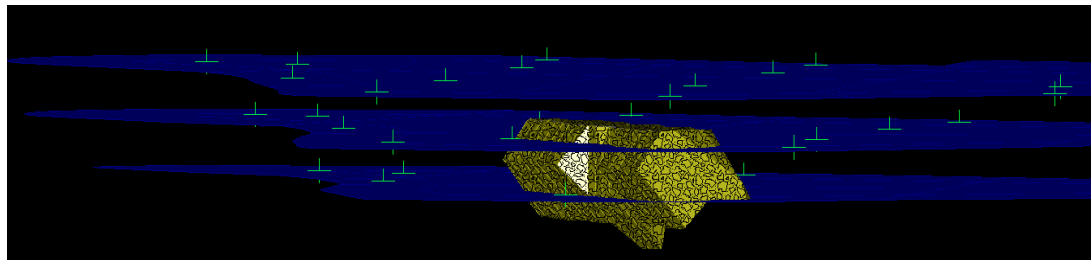


Figura 32: Interacción de cavidad con bancos.

De la primera figura se observa que ocurre intercepción de una cavidad con alrededor de 4 polígonos de extracción en un banco. Sin embargo, se proyecta la cavidad 40 metros sobre este banco y se busca el polígono que coincida mayoritariamente con la proyección, definiéndolo de esta manera como el polígono en donde es construida la chimenea de relleno y el cual tiene como precedencia la cavidad a rellenar. Además, y debido a limitantes operacionales al construir la chimenea, se adiciona la cavidad como precedente a los polígonos situados a una distancia de 50 metros desde el polígono en donde se construye la chimenea de relleno.

## 6.6. Plan Productivo Largo Plazo

Junto con la capacidad de los equipos, existe una limitante del tonelaje máximo a mover por banco que viene predefinida por el plan de largo plazo (LOM). Este tonelaje se incorpora como restricción en la herramienta UDESS y debe ser la limitante a mover por fase y por periodo. Por tanto, se detalla el movimiento por fase del plan LOM 2012.

Tabla 10: Movimientos Plan LOM 2012

Fase	Mov.	13_01	13_02	13_03	13_04	13_05	13_06	13_07	13_08	13_09	13_10	13_11	13_12
F02	Kton	2467	2313	2318	3209	3418	3226	3339	2786	3062	3089	3154	3197
F03	Kton	3937	3913	3927	2654	2833	2446	2712	2305	2399	2573	2551	2747
F04	Kton	206	260	295	280	315	201	232	321	217	131	150	236
		14_01	14_02	14_03	14_04	14_05	14_06	14_07	14_08	14_09	14_10	14_11	14_12
F02	Kton	3482	3207	2196	1368	1399	499	423	453	402	0	0	0
F03	Kton	2572	2413	3650	3477	3606	3733	3735	3894	3603	3699	3948	1650
F04	Kton	455	347	481	1133	1028	1061	1281	1830	1841	835	0	0
		2015	2016	2017									
F02	Kton	0	0	0									
F03	Kton	34732	26566	23891									
F04	Kton	38568	41146	41214									

## 7. CARGA DATOS UDESS Y CORRIDAS

Una vez obtenida la información necesaria para incorporarla a la herramienta UDESS; se prepara un archivo de entrada en donde se deben especificar las actividades que son consideradas junto con algunos parámetros que la herramienta utiliza para programar. En este caso, las actividades corresponden a todos los polígonos de extracción y las cavidades a rellenar, por lo que inicialmente se configura un archivo formato Excel el cual es cargado a la herramienta y posteriormente se genera un código que formula el modelo problema.

El archivo de entrada a la herramienta corresponde a un archivo formato CSV en donde debe especificar en cada columna el nombre de la actividad, una descripción de ellas, las precedencias y sucesores de cada una, la tasa máxima de extracción, el largo de la actividad (que puede ser considerada en toneladas o metros), el valor de cada una y finalmente las coordenadas X, Y y Z. Se detalla a continuación cada uno de los 8 parámetros mencionados:

- **Nombre Actividad:** para el caso de los polígonos de extracción, cada actividad tiene un nombre conformado inicialmente por la fase en operación a la pertenecen, seguido del banco y finalmente un número que sirve para diferenciar a cada polígono dentro de un banco. Por ejemplo, el polígono F02\_0740\_003 corresponde al polígono 3 del banco 740 que pertenece a la fase 2 del rajo. Por otro lado, para el nombre de las cavidades se coloca el que está asignado en la misma mina El Soldado y que tienen relación con el sector al cual pertenecen. Por ejemplo, para las cavidades presentes en la zona llamada California, existen las cavidades con nombre CAL-64, CAL-66, CAL-68, entre otras.
- **Descripción Actividad:** en esta columna se detalla si la actividad corresponde a un polígono de extracción o una cavidad, además de detallar en el caso de los polígonos la fase, el banco y el número al que corresponde. Por ejemplo, para el caso del polígono F02\_0740\_002 la descripción es: Polígono\_Fase\_02\_Cota\_0740\_Número\_003. Para el caso de las cavidades, solo se toma el nombre de Cavidad seguido de su nombre, por ejemplo para la actividad CAL-64 la descripción es Cavidad\_CAL-64. Esta descripción es relevante al momento de incorporar restricciones en el cómputo y cuando es necesario realizar búsquedas dentro de todas las actividades.
- **Predecesores:** Para cada actividad existen otras actividades que le preceden, por lo que en esta columna deberían ir, en teoría, todos los predecesores existentes. Sin embargo, y debido a la complejidad de incorporar todos los predecesores, en esta columna del archivo de entrada solo se incorporan las precedencias horizontales dentro de un banco, ya que las otras precedencias son añadidas en el código que formula el problema en UDESS. Adicionalmente, se agregan también las precedencias entre cavidades y polígonos, los que tienen relación al polígono en donde se construirá la chimenea previo al relleno de la cavidad. De esta manera, en la columna predecesores solo van las precedencias horizontales y las precedencias entre polígonos y cavidades.
- **Sucesores:** En esta columna se agregan todos los sucesores de las actividades presentes. Sin embargo, en este caso particular no se adicionan sucesores ya que solo son tomadas en cuenta las precedencias para cada polígono y por ende indirectamente se consideran los sucesores.

- **Tasa Máxima:** Corresponde a la extracción máxima a realiza por la herramienta UDESS de una determinada actividad por mes. En este caso, los polígonos de extracción no poseen una tasa máxima de extracción, ya que existen otras limitantes que la restringen. Por lo tanto, se asume que la tasa máxima a extraer para cada polígono de extracción es infinita o es 30 veces el largo. Esto es equivalente a decir que la cantidad máxima de polígonos a extraer son 30, lo que corresponde a un valor muy superior a lo que realmente se puede extraer en un mes (alrededor de 20). Por otro lado, para el caso de las cavidades se asume una tasa aún mayor debido a que si existe la necesidad de construir una chimenea de relleno, siempre existe la disponibilidad de equipos. Por lo tanto, se asume una tasa infinita o 100 veces el largo de la actividad de manera que esta no sea la limitante del proceso.
- **Largo Actividad:** En esta columna se agrega la información que es considerada por los equipos disponibles y que es la limitante en base a los rendimientos que cada uno posea. Para el caso de los polígonos de extracción, se consideran el tonelaje a extraer por cada equipo, y para el caso de las cavidades, se asume el tonelaje a perforar.
- **Valor:** Se agrega a cada actividad el costo o beneficio que cada una representa para la operación. De esta manera, la herramienta UDESS puede ir optimizando la extracción de los polígonos en base a un parámetro económico.
- **X, Y y Z:** Desde el software Minesight se extraen las coordenadas del centro de masa de cada polígono de extracción y cavidad, los que son ingresados en las columnas correspondientes.

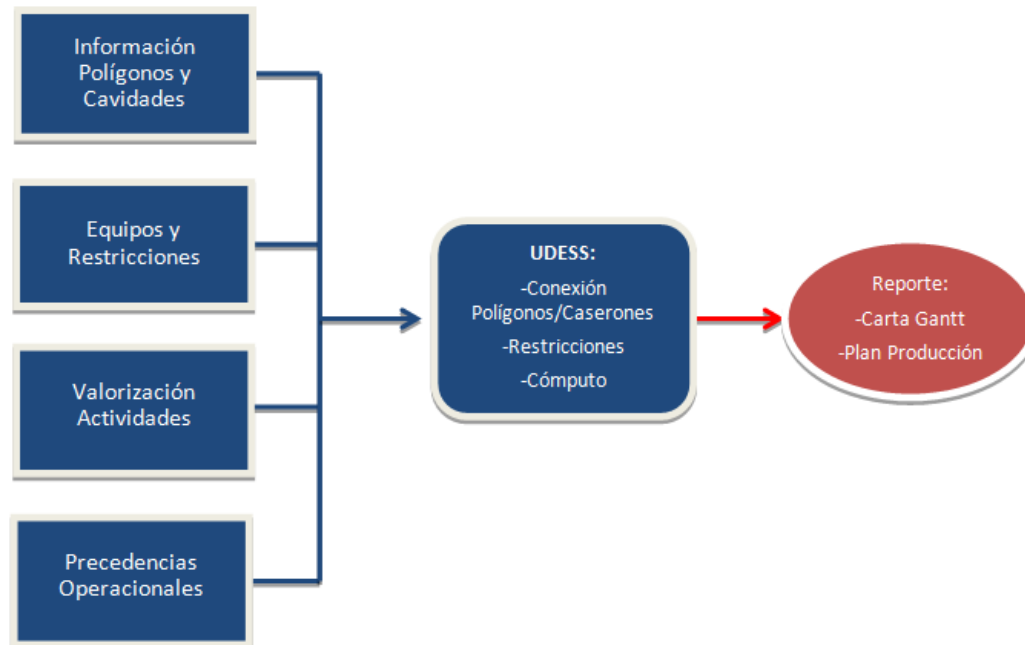


Figura 33: Funcionamiento UDESS

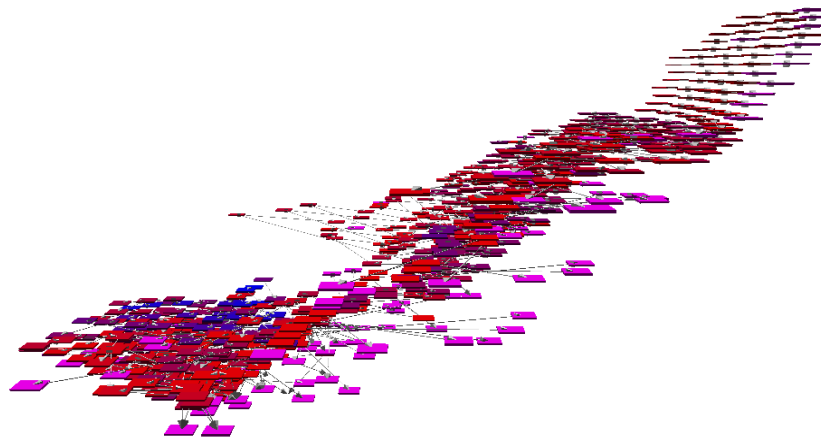
Adicionalmente se genera un código que carga las precedencias no ingresadas en los archivos de entrada, restricciones de equipos y movimiento, logrando modelar el problema a resolver. Posteriormente, se corre el cómputo que agenda las actividades, entregando un reporte el cual es el input para crear el plan productivo final.

Para formular el código, se utiliza el lenguaje de programación Python, que corresponde al utilizado por la herramienta UDESS. Inicialmente, se cuenta con una aplicación de la herramienta UDESS realizada a la mina El Teniente, con lo que se tiene el esqueleto a modificar para formular el caso estudio. El archivo cuenta con un visualizador de las precedencias, el cual sirve para observar y verificar si el software carga correctamente las precedencias ingresadas. Además, el archivo contiene el código necesario para lograr utilizar la herramienta Gurobi, que corresponde al motor optimizador que la herramienta UDESS utiliza, logrando finalmente entregar el reporte necesario para construir el plan productivo.

Por lo tanto, se explican las consideraciones tomadas para formular y cargar el problema a solucionar.

### **7.1. Precedencias Horizontales e Interacción Cavidad-Polígonos**

Como fue mencionado anteriormente, las precedencias horizontales y la interacción entre polígonos y las cavidades son cargadas previamente en el archivo de entrada de la herramienta UDESS. Por lo tanto, no son adicionadas en el código a generar en la plataforma Python. Por ende, y mediante el visualizador de precedencias que contiene UDESS, se muestran las precedencias horizontales y las relaciones entre las cavidades con los polígonos de extracción.



**Figura 34: Precedencias Horizontales e Interacción Cavidad-Polígonos**

Como se observa en la figura, cada cuadro de color rojo y azul representados corresponden a un polígono de extracción. Para el caso de las cavidades, estas son representadas por los cuadros color fucsia, y que son los que tienen como sucesores al polígono en donde es construida la chimenea de relleno además de los polígonos 50 mts alrededor. Se aprecia las precedencias entre polígono de un mismo banco y que no existe relación entre bancos distintos.

### **7.2. Precedencias Verticales**

Par el caso de las precedencias verticales, se genera un código que adiciona a cada polígono de un banco inferior los polígonos precedentes de un banco superior. Para esto, y tomando en cuenta que existen 2 restricciones que relacionan los polígonos de un banco inferior con los de un banco superior, se toma en consideración la restricción más fuerte que corresponde a la restricción operacional de la Mina El Soldado. Esta restricción tiene relación con la distancia mínima horizontal cuando se trabaja en bancos distintos, y que corresponde a una restricción que enmascara a la restricción de precedencia vertical o restricción de talud. Esta distancia mínima corresponde a 150 metros, por lo que para lograr definirla en la herramienta UDESS, se considera un área circular desde cada centro de masa de los polígonos del banco superior proyectando una sombra en el banco inferior.

De esta manera, todos los centros de masa de los polígonos del banco inferior que se encuentren dentro de la sombra proyectada son considerados como sucesores del polígono del banco superior. Para lograr esto, se toman en cuenta las coordenadas X, Y y Z de cada polígono y realizan en los siguientes pasos para encontrar sus sucesores:

- Se hace un filtro dentro de todos los polígonos logrando obtener los pertenecientes a la misma fase del polígono precedente (perteneciente al banco superior).
- Luego, se guardan en 3 variables las coordenadas X, Y y Z correspondientes a cada polígono filtrado.
- Posteriormente, se compara la coordenada Z del polígono precedente con la coordenada Z de todos los otros polígonos perteneciente a la misma fase. Si la diferencia entre las coordenadas de ambos polígonos es 15, entonces se continúa con el siguiente criterio, de lo contrario se descartan los polígonos como sucesores. Este criterio permite reducir el número de polígonos a comparar dejando sólo los pertenecientes al banco inferior del polígono precedente.
- Se comparan posteriormente las coordenadas X e Y de los polígonos filtrados con el polígono precedente, en donde se analiza si ambas coordenadas se encuentra a una distancia menor de 150 metros. Cuando ocurre esto, el polígono comparado corresponde a un sucesor del polígono precedente.
- Se realiza el procedimiento para todos los polígonos de todas las fases presentes.

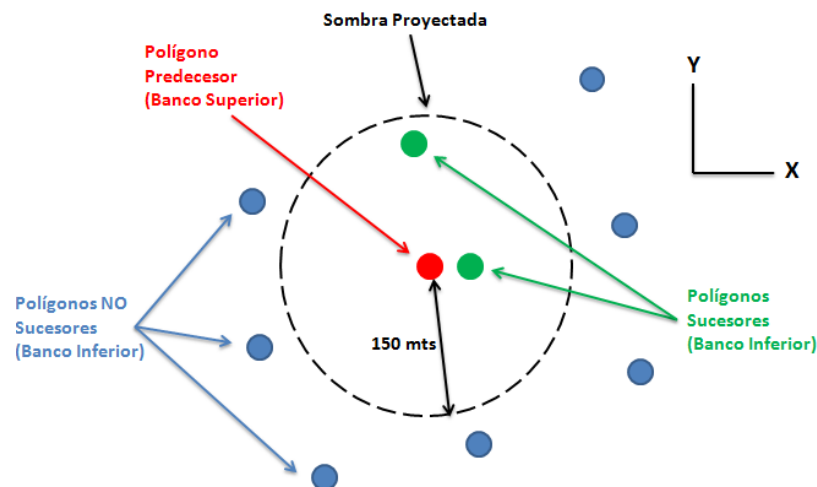
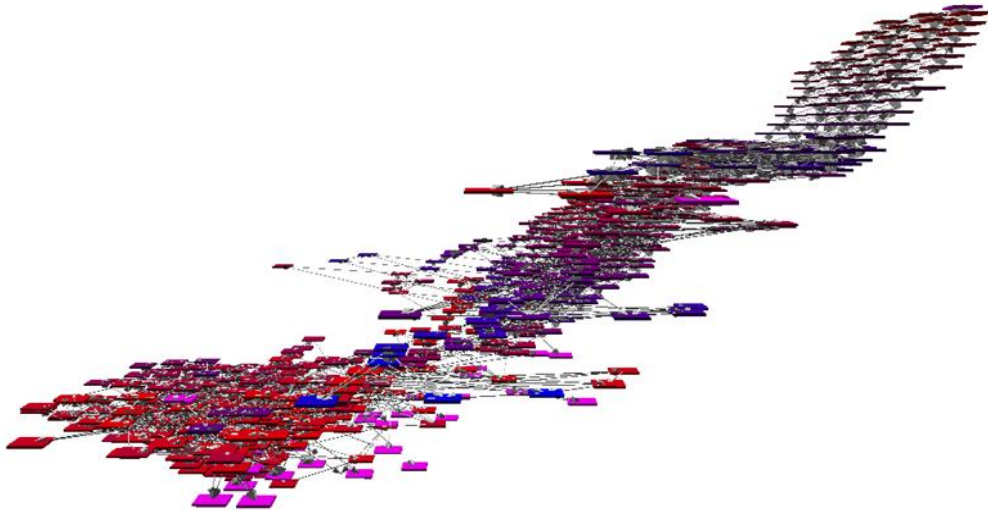


Figura 35: Criterio para considerar restricción operacional El Soldado

De esta manera, se genera el código que permite incorporar las condiciones mencionadas y con esto generar la carga de precedencias necesarias para que la herramienta UDESS pueda incorporarla dentro de la optimización.

Gracias al visualizador incorporado dentro de la herramienta UDESS, se permite observar el resultado de las cargas de todas las precedencias operacionales.



**Figura 36: Carga de todas las precedencias operacionales en UDESS.**

Como se observa en la figura anterior, se adicionan las precedencias verticales descritas, y por tanto, se cuenta con todas las relaciones necesarias entre polígonos y cavidades para generar la optimización de UDESS.

### **7.3. Equipos y Rendimientos**

Adicionalmente, se deben incorporar la flota y rendimientos de equipos ya descritos en los capítulos anteriores. Para esto, se definen los recursos disponibles y posteriormente se vinculan a cada actividad, en donde se relacionan los polígonos de extracción con las palas y las cavidades con las perforadoras. Para simplificar las restricciones de equipos explicadas anteriormente, se toman en cuenta la cantidad de horas productivas de las palas necesarias para extraer un determinado polígono. Del mismo modo, se consideran las horas de las perforadoras para realizar los trabajos en cavidades. Por lo tanto, la herramienta UDESS genera la extracción de los polígonos en un periodo determinado tomando en cuenta las horas palas disponibles en la flota de equipo, las que posteriormente son consumidas a medida que se avanza la extracción.

Por otro lado, se definen contadores de tonelaje para cada actividad, con el objetivo de tener un cálculo de la cantidad de material extraído por periodo y que es considerada para respetar la restricción impuesta por el plan de largo plazo LOM.

## 7.4. Restricciones

Dentro de las restricciones que se adicionan a la herramienta UDESS se encuentran:

- Tonelaje máximo a mover por periodo
  - Movimiento máximo a extraer por pala
  - Cantidad máxima de metros de perforadoras.
- Tonelaje máximo a mover por periodo: Esta restricción viene definida por la cantidad máxima a mover por Fase en un periodo determinado y se obtiene del plan de largo plazo LOM. Existe un contador del tonelaje a mover por periodo que aumenta a medida que se añaden polígonos extraídos. Por lo tanto, este contador no puede superar un cierto tonelaje máximo a mover por periodo que está previamente ingresado y que viene del plan productivo LOM.
- Movimiento máximo a extraer por palas: Se toman en cuenta las horas palas necesarias para extraer un determinado polígono, por lo que existe un contador que va adicionando las horas consumidas a medida que avanza la extracción. Se limita la extracción cuando este contador se iguala a la cantidad de horas palas máxima que puede cumplir la flota de palas de la mina. De esta manera se limita la extracción de polígonos por cada periodo por lo que estas 2 últimas restricciones son las que limitan la producción. Debido a que ambas restricciones están relacionadas, la producción para cada periodo se ve limitada por la restricción más fuerte de estas 2 últimas.
- Cantidad máxima de metros de perforadoras: Similarmente al caso de las palas, existe una cantidad máxima de horas de perforadoras que viene predefinida y que limita la perforación o los trabajos en las cavidades. Sin embargo, y debido a que los trabajos en cavidades tienen prioridad frente a la operación, se considera una cantidad sobreestimada de horas de perforadoras, logrando así que las perforadoras no queden limitadas. Por ende, esta restricción solo toma relevancia cuando existe una cantidad mayor a 3 cavidades a tratar por mes. De esta manera, para cada periodo existe un contador de horas de perforadoras necesarias y por ende, para el caso que la producción se vea con un sobreconsumo de perforadoras, el tratamiento de las cavidades se adelanta para evitar los retrasos operacionales.

Se resume en la siguiente tabla las restricciones mencionadas.

**Tabla 11: Resumen de restricciones a ingresar a UDESS**

<b>Restricción</b>	<b>Descripción</b>	<b>Consideración en UDESS</b>
Tonelaje a mover por periodo	Tonelaje máximo a mover por periodo definido por plan LOM	Contador de tonelaje a medida que aumenta extracción es limitado
Movimiento máximo a mover por palas	Cantidad máxima de Horas de Palas a utilizar por periodo	Contador de horas a palas a medida que aumenta extracción es limitado
Cantidad máxima de perforadoras	Cantidad máxima de Horas de Perforadoras a utilizar por periodo	Contador de horas de perforadoras es limitado a medida que se tratan cavidades

## 7.5. Corrida y Optimización

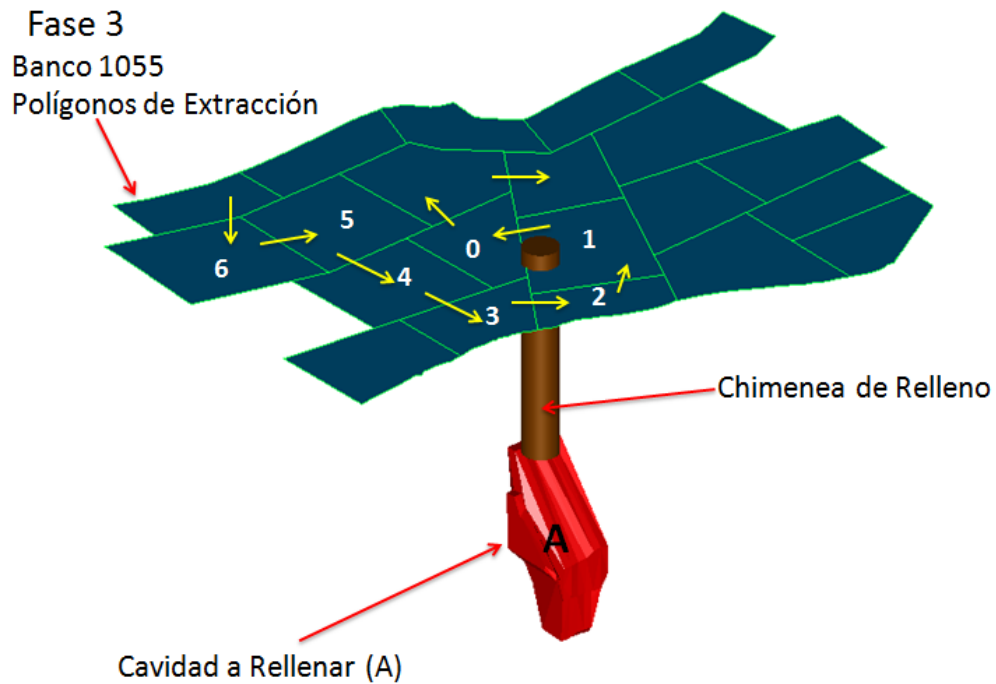
El software UDESS realiza un cálculo incorporando las precedencias operacionales ya ingresadas y optimizando el VAN a medida que avanza la extracción, por lo que se define una tasa de descuento del 10% para actualizar los flujos en el tiempo. La herramienta modela la extracción polígonos a polígonos respetando las restricciones operacionales y analizando si es más rentable extraer uno u otro, de manera de ir optimizando el VAN global. Para realizar las corridas se separa la cantidad de polígonos por fase para así reducir el tiempo de cómputo debido a que al considerar todos los polígonos en una corrida el tiempo de cálculo se incrementa. Producto que las restricciones ingresadas limitan el movimiento de cada fase por periodo, no existe un efecto al movimiento del plan productivo final al realizar las corridas de manera separada. De esta manera, se realiza una corrida por cada fase considerando para cada uno los movimientos por fase del plan LOM.

El tiempo requerido para cada corrida varía en función de la cantidad de polígonos de cada fase. Para el caso de la fase 2 y fase 4 existen alrededor de 200 polígonos y para el caso de fase 3 cerca de 400. De esta manera para el caso de las corridas de las fases 2 y 4 el tiempo transcurrido bordea los 5 min. Para la fase 3, el tiempo aumenta a 10 min producto de la mayor cantidad de polígonos.

Las corridas de la herramienta se realizan en base a 16 periodos, en donde los 12 primeros corresponde a los 12 meses del año 2013 y los 4 posteriores corresponde a los años 2014, 2015, 2016 y 2017. En una primera instancia, se realizan las corridas con estos periodos para posteriormente validar el modelo. Una vez validado el modelo, se realizan las corridas de 16 periodos en donde los 12 primeros corresponden a los 12 meses del año 2014 y los 4 posteriores corresponden a los años 2015, 2016, 2017 y 2018.

Una vez generadas las corridas, se obtiene un programa óptimo de las actividades que ya incorporan las precedencias operacionales. Adicionalmente, el software entrega una carga Gantt de las actividades y por ende, indica el momento óptimo de extracción de los polígonos que incorpore las precedencias operacionales y que maximice el VAN del problema. De esta manera, se tiene el input necesario para construir el plan productivo que incorpore el tratamiento de las cavidades previo a la extracción óptima de los polígonos de extracción.





**Figura 37: Ejemplo de extracción de polígonos previo a tratamiento de cavidad**

Como modo de ejemplo, en la figura 37 se observa que existe una cantidad de polígonos a extraer con una determinada precedencia ya ingresada que corresponde al camino que debe seguir la pala dentro del banco. Sin embargo, para lograr extraer el polígono “1”, se debe realizar previamente un trabajo a la cavidad con la que está conectada (Cavidad A). De esta manera, se espera que la herramienta agende el relleno de la cavidad A previo a la extracción de los polígonos 1, 2, 3, 4 y hasta 5 para evitar que se retrase la operación en el mismo banco.

## 8. RESULTADOS UDESS Y CONSTRUCCIÓN PLAN PRODUCTIVO

### 8.1. Resultados UDESS

La herramienta UDESS entrega como resultado un archivo que indica el momento óptimo de extracción de un polígono. De la misma manera, indica el momento óptimo de realizar el tratamiento de las cavidades previo a la extracción de los polígonos. Por lo tanto, se construye el plan productivo en base al archivo de salida de UDESS, el cual detalla para cada periodo la cantidad de polígonos a extraer y/o cavidades a tratar. El archivo cuenta con 16 filas que indican los periodos considerados en la optimización, y contiene N columnas que corresponden al número total de actividades de cada fase que fue considerada en el cómputo (tabla 12).

Tabla 12: Archivo salida UDESS con periodo de extracción de polígono

Periodo	F02_0860_017	F02_0875_027	F02_0770_001_rmpddef	F02_0875_019	F02_0920_001	...
1	0	0	0	0	0	...
2	0	0	0	0	0	...
3	0	0	0	0	0	...
4	0	0	0	0	1	...
5	0	0	0	0	0	...
6	0	0	0	0	0	...
7	0	0	0	0	0	...
8	0	0	0	0	0	...
9	0	1	0	1	0	...
10	0	0	0	0	0	...
11	1	0	0	0	0	...
12	0	0	0	0	0	...
13	0	0	1	0	0	...
14	0	0	0	0	0	...
15	0	0	0	0	0	...
16	0	0	0	0	0	...

De esta manera, se indica con un valor 1 el periodo en el cual se extrae cada polígono. En algunos casos, existen polígonos que se extraen en 2 periodos, para los cuales UDESS indica la proporción a extraer en cada periodo. Del mismo modo, para las cavidades se indica con un valor 1 el periodo para el cual son tratadas. Como se observa, los 12 primeros periodos corresponden a los 12 meses del año 2013 y los periodos 13, 14, 15 y 16 corresponden a los años 2014, 2015, 2016 y 2017 respectivamente. De esta manera y a modo de ejemplo se observa que el polígono F02\_0860\_017 se extrae en el periodo 11 lo que corresponde al mes de noviembre de 2013.

### 8.2. Programación Cronológica

A partir de la información del archivo de salida, se ordenan los polígonos extraídos para cada periodo con el objetivo de posteriormente calcular la cantidad de movimiento que se obtiene

en cada uno. Para lograr esto, se realiza una transposición de la matriz entregada por UDESS y posteriormente se ordena en base a los 16 periodos mencionados anteriormente (tabla 13).

**Tabla 13: Matriz transpuesta para el cálculo del movimiento por periodo**

Actividad	Periodo			
	1	2	3	...
F02_0920_004	1	0	0	...
F02_0920_005	1	0	0	...
F02_0920_007	1	0	0	...
F02_0920_010	1	0	0	...
F02_0920_018	1	0	0	...
F02_0920_101	1	0	0	...
F02_0920_017	0.4338	0.5662	0	...
F02_0905_101	0	1	0	...
F02_0920_003	0	1	0	...
F02_0920_008	0	1	0	...
F02_0920_009	0	1	0	...
F02_0920_013	0	1	0	...
F02_0920_014	0	1	0	...
F02_0905_010	0	0.769	0.231	...
...	...	...	...	...

De esta manera, los polígonos 004, 005, 007, 010, 018 y 101 del banco 920 de la fase 2 son extraídos en el periodo 1 o enero de 2013. Del mismo modo, el 43% del polígono 017 del mismo banco es extraído en el mismo periodo y el tonelaje restante es extraído en el periodo 2 o febrero de 2013. Por tanto, esta información queda disponible para ser cruzada con la información de los tonelajes y leyes de cada polígono.

### 8.3. Cálculo de Tonelaje y Ley de Cobre

Para cruzar la información, se utiliza el archivo de entrada a la herramienta UDESS el cual ya incorpora el tonelaje a extraer por cada polígono. De esta forma, y considerando la matriz resultante de la corrida optimizante, se realiza una suma producto de los valores para obtener la cantidad de material total a extraer de cada polígono en un periodo determinado. Se designa para cada periodo un color con el objetivo de facilitar el manejo de la información.

**Tabla 14: Cálculo de Tonelaje por Periodo**

Actividad	Periodo				Tonelaje	Periodo			
	1	2	3	...		1	2	3	...
F02_0920_004	1	0	0	...	63100	63100	0	0	...
F02_0920_005	1	0	0	...	279431	279431	0	0	...
F02_0920_007	1	0	0	...	209320	209320	0	0	...
F02_0920_010	1	0	0	...	158848	158848	0	0	...
F02_0920_018	1	0	0	...	243917	243917	0	0	...
F02_0920_101	1	0	0	...	118833	118833	0	0	...
F02_0920_017	0.4338	0.5662	0	...	289053	125391	163662	0	...
F02_0905_101	0	1	0	...	179552	0	179552	0	...
F02_0920_003	0	1	0	...	293619	0	293619	0	...
F02_0920_008	0	1	0	...	150455	0	150455	0	...
F02_0920_009	0	1	0	...	217595	0	217595	0	...
F02_0920_013	0	1	0	...	124679	0	124679	0	...
F02_0920_014	0	1	0	...	190109	0	190109	0	...
F02_0920_010	0	0.769	0.231	...	124679	0	95878	28801	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

La tabla anterior describe la cantidad total de material a mover por periodo, y por ende sirve para corroborar si existe una relación entre el tonelaje movido y el cumplible con los equipos de carguío. Esta comparación corresponde a la primera prueba para conocer si la herramienta UDESS toma en cuenta las restricciones de equipos ingresadas.

Por otro lado, se debe calcular la cantidad de mineral a extraer por periodo además de la ley de cobre correspondiente. Para esto se cruza la información resultante de la corrida con el archivo de las cubicaciones de los polígonos, obteniendo la cantidad de mineral y ley de cobre por polígono junto con el periodo en el cual se extrae. Se destaca que se considera como mineral total la cantidad de material enviado directamente a planta y la cantidad que es enviada a Stock, las cuales están previamente definidas por las cubicaciones de cada polígono. Paralelamente, se obtiene la cantidad de material estéril a extraer por cada polígono de extracción cruzando la información de la corrida con el archivo de las cubicaciones de los polígonos. Con esta información, se ordena la cantidad de material a planta con su ley media, la cantidad a stock con su ley media y la cantidad de estéril por cada periodo considerado.

**Tabla 15: Tonelaje de Mineral, Ley de Mineral y Estéril de resultado de UDESS.**

F2	13_01	13_02	13_03	13_04	13_05	...
<b>Ton a Planta [kton]</b>	978	659	426	436	338	...
<b>Ley a Planta [%]</b>	1.06	1.21	1.03	1.23	1.07	...
<b>Ton a Stock [Kton]</b>	142	167	200	216	105	...
<b>Ley Stock [%]</b>	0.62	0.51	0.69	0.57	0.49	...
<b>Ton Estéril [Kton]</b>	1,791	2,030	2,166	2,215	2,243	...

Es importante notar que debido a que se realizan 3 corridas optimizantes (1 para cada fase), se realiza el mismo procedimiento descrito 3 veces. De esta manera se obtiene para cada fase la cantidad de mineral, ley de cobre y estéril que se genera con la herramienta UDESS

#### 8.4. Manejo de Stock

Además de definir una cantidad de movimiento por periodo, se debe calcular la cantidad de mineral que la planta de procesamiento puede tratar. Para esto, se cuenta con la información entregada por el área de planta de la cantidad a procesar para los distintos periodos. Con esta información se calcula el mineral restante que la planta no puede procesar y por ende el que es enviado a los stocks.

Periodo a periodo se va adicionando material al stock por lo que se considera un criterio de mezcla al enviar minerales cada periodo con distinta ley media de cobre. Para estimar la ley media, se simplifica utilizando una suma producto de los tonelaje por su ley media de manera que sean consideradas todas las cantidades de mineral enviada en los periodos previos. En caso de ser necesario, y cuando la producción de mineral desde la mina sea menor a la capacidad de planta, se extrae mineral desde los stock para ser enviado a la planta con el objetivo de saturarla. Cuando se realiza esto, se considera la ley a planta como la suma producto de la ley de mina y la ley de stock calculada en base al material remanente de los periodos previos. Por consideraciones operacionales, se considera una dilución del mineral en un 5%, por lo que se agrega un 5% de tonelaje adicional y por ende se castiga la ley de mineral en un 2%, que corresponde a un valor utilizado por el área de planificación.

**Tabla 16: Manejo de Stock con cantidad y ley media**

	13_01	13_02	13_03	...
Ton a Planta Diluido [kton]	1027	709	447	...
Ley a Planta Diluida [%]	1.04	1.18	0.88	...
<b>Cap. Planta [kton]</b>	<b>683</b>	<b>613</b>	<b>686</b>	...
Diferencia a Stock [kton]	344	96	-239	...
Material a Stock desde mina [kton]	149	175	210	...
Stock Acumulado [kton]	493	764	735	...
Ley Stock	0.61	0.65	0.64	...

#### 8.5. Construcción Plan Productivo 2013

Finalmente, y con la información por periodos ya presentada, se procede a calcular el plan productivo para el año 2013 el cual es necesario para validar la herramienta UDESS. Por tanto, para la construcción del plan productivo, se contabilizan los movimientos por fase entregados por la herramienta UDESS. Adicionalmente, y como método de comparación, se realiza un cálculo de la cantidad de fino total producido durante el año 2013, permitiendo comparar los resultados con el plan Budget 2013.

Por tanto, se genera el resultado de movimientos totales por fase para el año 2013.

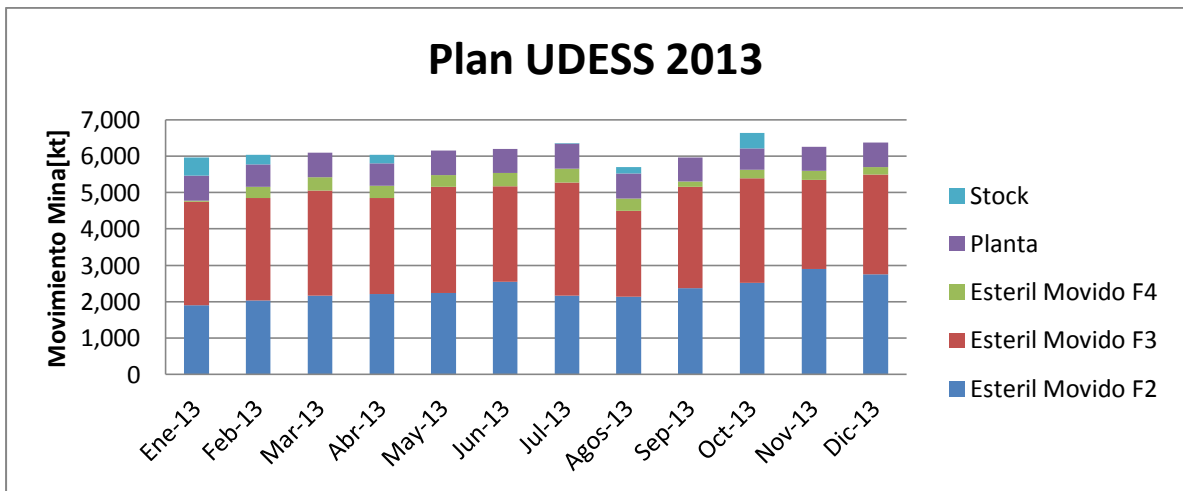


Figura 38: Movimientos entregados por UDESS para el año 2013

Por otro lado, se calcula la cantidad de mineral enviado a planta con su respectiva ley de cobre, logrando así obtener el cobre fino por periodo considerando las limitaciones a planta y el remanejo de stock cuando es necesario.

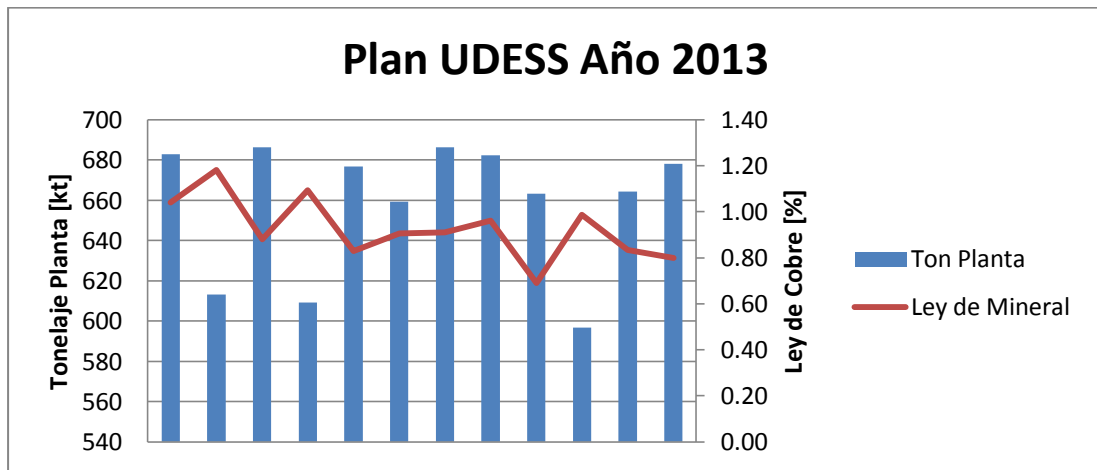
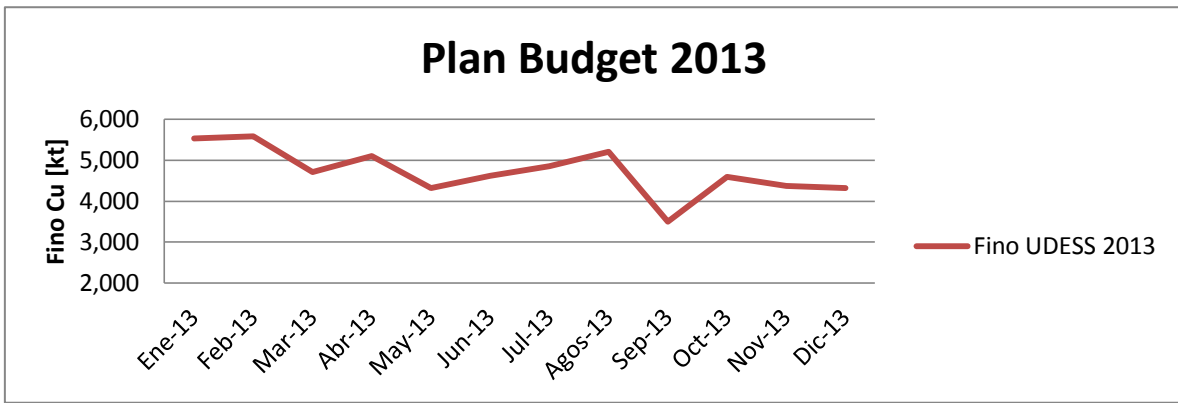


Figura 39: Plan productivo de alimentación a planta entregada por UDESS para el año 2013

Del cálculo, se obtiene una producción de fino para el año 2013 de 56.711 Kton de cobre.



**Figura 40: Producción de cobre fino por mes para el año 2013 desde UDESS**

## 9. VALIDACIÓN

Para lograr construir el plan productivo para el año 2014, se valida el resultado del plan entregado para el 2013 comparándolo con el plan Budget 2013. Para esto, se toma en cuenta las diferencias existentes entre los movimientos de las fases para el año 2013, la cantidad de fino producida en el año y además realizar una coincidencia de las áreas extraídas por ambos planes. Así, y si la validación permite concluir que el error producido por el modelo es menor a un cierto porcentaje aceptable, se puede construir el plan productivo del año 2014 con la herramienta UDESS. Por otro lado, se realiza un análisis de sensibilidad relajando restricciones impuestas en la herramienta UDESS. En este caso, se eliminan las precedencias horizontales y además se varía la distancia mínima de seguridad cuando se trabaja en bancos distintos, las cuales corresponden a las 2 restricciones que permiten modelar la extracción en un rajo abierto.

### 9.1. Comparación Plan Productivo UDESS vs Budget 2013

Se comparan en una primera instancia los movimientos totales por fases para luego realizar una comparación de la cantidad de cobre fino producida para el año 2013. Posteriormente, se realiza la comparación en base a concordancia de áreas entre los 2 planes.

#### 9.1.1. Cantidad de Tonelaje por Fase

Desde plan Budget 2013, se cuenta con el movimiento por fase planificado para el año junto con la cantidad de movimiento a planta y stock. Desde estos valores, se realiza una comparación con respecto al plan generado por UDESS.

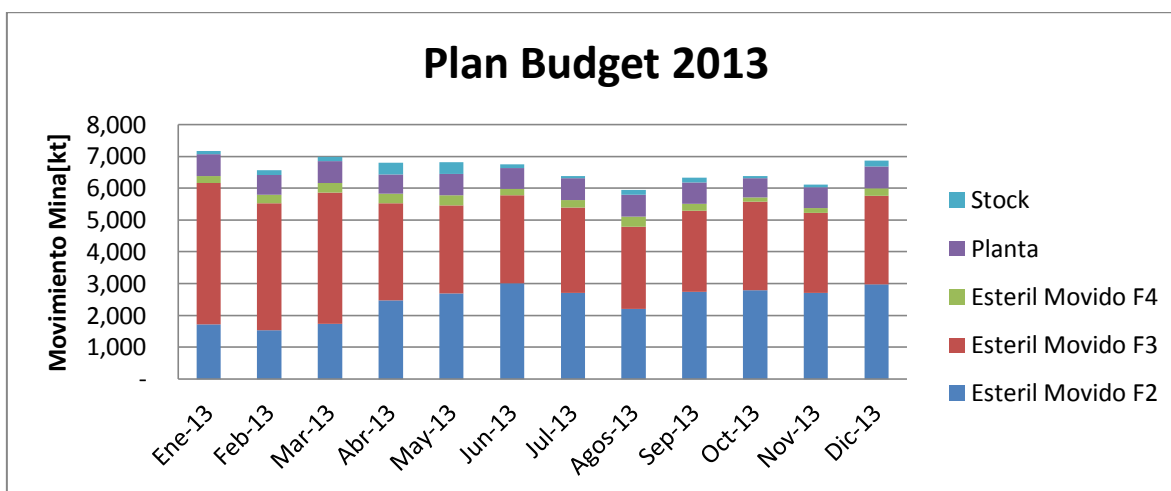


Figura 41: Movimientos por fase para plan Budget 2013

Con el plan generado en el capítulo anterior, se realiza la comparación por mes de tonelaje movido en conjunto por las 3 fases en operación.



**Tabla 17: Comparación en movimiento por fase entre plan Budget y UDESS.**

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	2013
<b>Mov. Budget [kton]</b>	7161	6569	6977	6807	6820	6752	6376	5943	6337	6378	6115	6866	79101
<b>Mov. UDESS [kton]</b>	5959	6044	6101	6044	6154	6201	6367	5702	5966	6646	6258	6379	73820
<b>Diferencia [%]</b>	-16.8%	-8.0%	-12.6%	-11.2%	-9.8%	-8.2%	-0.2%	-4.1%	-5.9%	4.2%	2.3%	-7.1%	-6.4%

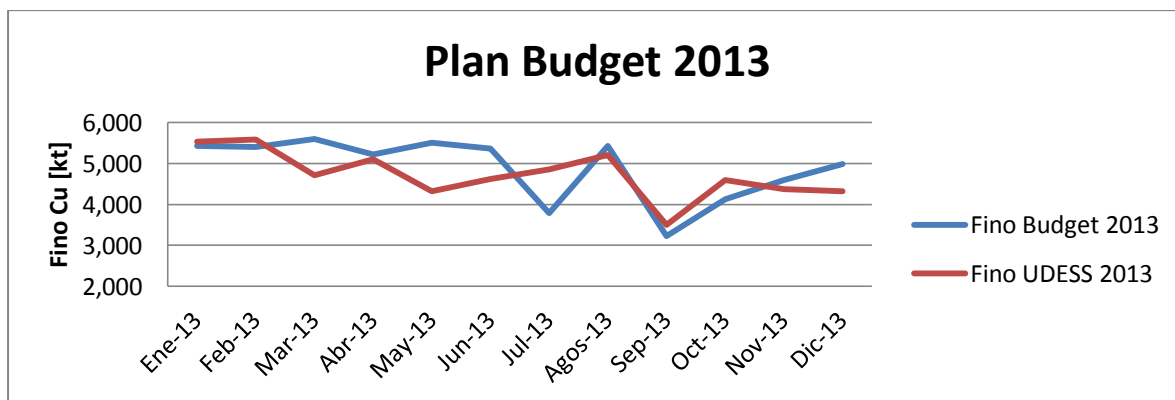
De esta manera, existe una diferencia del 6,4% entre el plan generado por la herramienta UDESS y el plan Budget 2013. Para el área de planificación de El Soldado, este valor está dentro del error aceptable por lo que el plan generado por la herramienta entrega un movimiento cumplible.

### 9.1.2. Cantidad de Fino Anual

Por otro lado, se compara la producción de cobre fino por mes para el año 2013 con el objetivo de conocer la desviación con respecto al plan Budget 2013.

**Tabla 18: Comparación cobre fino para año 2013 entre plan Budget y UDESS**

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	2013
<b>Fino Budget [ton]</b>	5421	5396	5597	5215	5501	5355	3785	5422	3229	4127	4587	4983	<b>58617</b>
<b>Fino UDESS [ton]</b>	5526	5586	4709	5104	4321	4622	4854	5208	3495	4596	4374	4316	<b>56711</b>
<b>Diferencia [%]</b>	1.9%	3.5%	-15.9%	-2.1%	-21.4%	-13.7%	28.2%	-3.9%	8.2%	11.4%	-4.6%	-13.4%	-3.3%



**Figura 42: Comparación de Cobre fino para el año 2013.**

De esta comparación, para el caso del cobre fino producido para el año 2013 por la herramienta UDESS versus el plan Budget 2013, existe una diferencia del 3,3% el cual corresponde a un error dentro del nivel de holgura aceptable que presentan los planes productivos de la mina El Soldado.

Por ende, y comparando en una primera instancia el movimiento total por fase y la cantidad de cobre fino para el año 2013, se puede afirmar que la herramienta UDESS genera un

plan productivo que se encuentra dentro del margen aceptable de error que es asumido en la mina El Soldado.

### 9.1.3. Cantidad de Área Planificada

Para lograr la operación de la extracción de los polígonos, se incorporan precedencias que condicionan la extracción entre polígonos y además integran condiciones existentes en la mina. Por lo tanto, dentro de los resultados entregados por la herramienta UDESS se espera que exista una extracción de polígonos lógica y operativa. Para verificar esto, se compara el área extraída por cada periodo con el área planificada del plan Budget 2013, logrando de esta manera validar la extracción obtenida por UDESS. Se compara para los 4 trimestres del año 2013 para las 3 fases en operación.

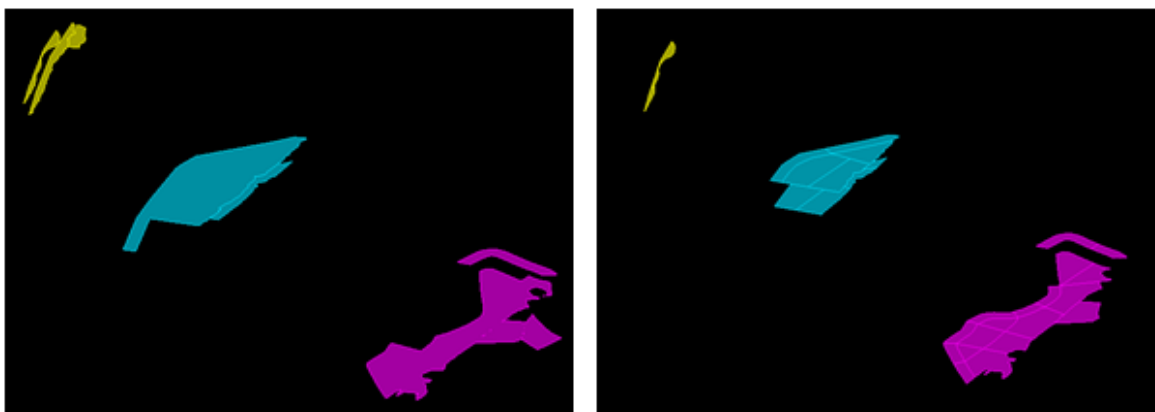


Figura 43: Área planificada Budget Enero 2013 (izquierda) y Área planificada UDESS Enero 2013 (derecha)



Figura 44: Área planificada Budget Abril 2013 (izquierda) y Área planificada UDESS Abril 2013 (derecha)

Para observar los otros 2 trimestres ver capítulo anexos subcapítulo 15.8

Para los 2 primeros trimestres, existe una similitud en base a las áreas a extraer para los 2 periodos. En el área de planificación se verifica la secuencia en base a criterios operacionales en donde el planificador de mediano plazo aprueba los resultados entregados por la herramienta UDESS. Además, se considera la diferencia dentro de un rango aceptable para un ejercicio de planificación minera.

Al comparar el área extraída por periodo, se observa que la diferencia para el año 2013 corresponde al -3.9%, valor también aceptable para el área de planificación de El Soldado.

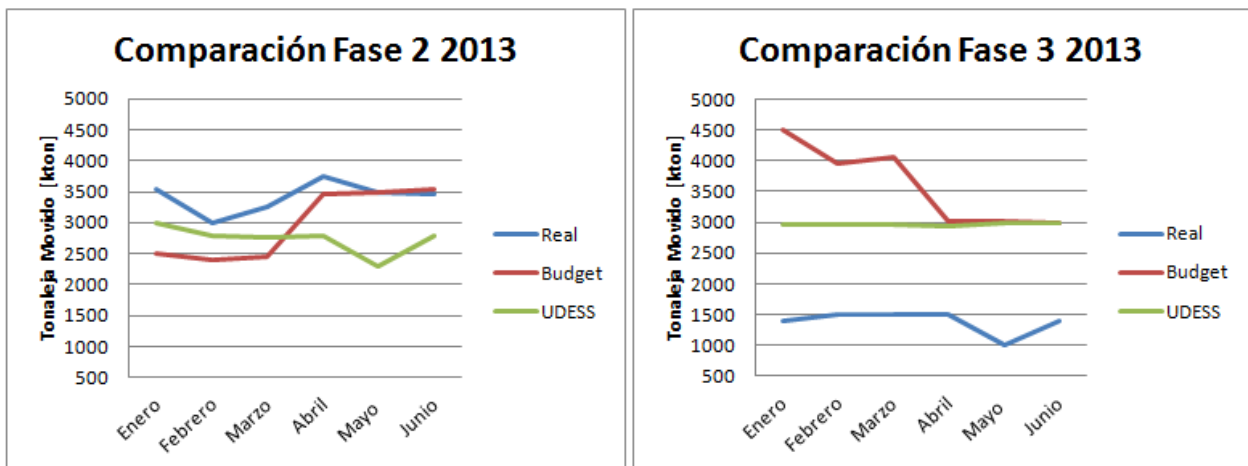
**Tabla 19: Diferencia de Área entre Plan UDESS y Budget para año 2013**

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	2013
Área Budget [m2]	232090	193900	214864	224489	224007	187115	207031	168838	172667	175991	167119	186468	2354579
Área UDESS [m2]	199519	201424	201278	205987	180646	210597	208779	161083	166608	181567	178870	165330	2261688
Diferencia [%]	-14.0%	3.9%	-6.3%	-8.2%	-19.4%	12.5%	0.8%	-4.6%	-3.5%	3.2%	7.0%	-11.3%	-3.9%

Por ende, la herramienta entrega áreas operativamente explotables e incluso con menor complejidad que el plan Budget 2013 para algunos periodos.

#### 9.1.4. Comparación con Movimiento Real

Adicionalmente, se compara los movimientos del plan Budget y UDESS con el movimiento real de la mina El Soldado entre los meses de enero y junio del año 2013. Con esta comparación se deduce la confiabilidad del plan UDESS versus el plan Budget.



**Figura 45: Comparación Plan Budget, UDESS y movimiento Real para Fase 2 (izquierda) y Fase 3 (derecha)**

De esta comparación, se observa que para ambas fases existe una aproximación más cercana al movimiento real del plan UDESS versus el plan Budget y en donde para ambos planes los problemas operacionales son los que explican la diferencia existente. Sin embargo, se destaca que la mayor diferencia en los tonelajes entre el plan Budget y el movimiento real corresponde a un problema geomecánico existente en la fase 3 (riesgo de colapso por falla), que ha provocado gran parte de los retrasos en la fase y por ende un aumento de movimiento en la fase 2 (producto del movimiento de equipos hacia otra fase para compensar diferencia). Sin embargo, de estas gráficas se aprecia que la correspondiente a la del plan UDESS se encuentra entre la gráfica del plan Budget y el movimiento Real para ambas fases, por lo tanto se puede concluir que la herramienta UDESS entrega un plan con movimientos aceptables y cercanos a los estimados por el plan Budget y los reales.

## 9.2. Análisis Sensibilidad

Para observar algún impacto económico que pueda provocar el cambio de algunas de las condiciones iniciales de cálculo, se realiza un análisis de sensibilidad con el objetivo de observar cómo se comporta la herramienta UDESS. Se realiza una corrida sin la incorporación de las precedencias horizontales y luego se hacen variaciones en las distancias que utiliza la restricción de operación de la mina El Soldado.

### 9.2.1. Sin Precedencias Horizontales

El objetivo de este análisis es observar cómo la herramienta UDESS agenda la extracción al no considerar la restricción de explotación dentro de un banco. Al no considerar la extracción de precedencias horizontales, la herramienta UDESS tiene la libertad de extraer polígonos dentro de un banco que solo posean mineral, sin considerar la extracción de polígonos que posean material estéril. Sin embargo, al ir avanzando en la extracción, la herramienta tiene que extraer de igual manera los polígonos con estéril debido a las restricciones verticales o de talud, pero en periodos en donde no se castigue el VAN del problema. Por lo tanto, se realiza una corrida adicional considerando solamente un par de banco de una fase en operación, ya que al no considerar la precedencia horizontal, la herramienta tiene mayor libertad para optimizar y por ende el tiempo de cómputo es mayor.

Se realiza posteriormente una comparación entre una corrida de UDESS considerando las precedencias horizontales y otra sin su consideración. Se obtiene la diferencia tomando como parámetro de comparación la valorización en un periodo, logrando observar cómo afecta el beneficio al no considerar la precedencia horizontal. Por lo tanto, se obtiene el archivo de salida de UDESS el cual es ordenado para un año y se compara la valorización por periodo.

**Tabla 20: Comparación de corridas con y sin consideración de precedencias horizontales para 1 periodo**

Sin Precedencias Horizontales		Con Precedencias Horizontales	
Polígono	Valorización [KUS\$]	Polígono	Valorización [KUS\$]
F02_0845_012	2078	F02_0845_001_rmpddef	-182
F02_0845_023	5514	F02_0860_001_rmpddef	-160
F02_0860_001	1680	F02_0860_009	-430
F02_0860_005	1761	F02_0860_011	-273
F02_0860_013	7178	F02_0860_012	-219
F02_0860_014	-541	F02_0860_021	-285
F02_0860_019	2470	F02_0860_022	4554
F02_0860_023	748	F02_0860_029	-358
F02_0860_024	1076	F02_0860_030	-53
F02_0860_025	579	F02_0860_034	-743
F02_0860_026	2663	F02_0860_035	-124
F02_0860_027	6433		
F02_0860_030	-53		
<b>Total Periodo [KUS\$]</b>	<b>31587</b>	<b>Total Periodo [KUS\$]</b>	<b>1727</b>

Para la extracción sin considerar la restricción, se observa que se extrae mayoritariamente los polígonos del banco 860 que poseen mineral, y por ende los que generan un beneficio. Además, cabe destacar que como no existe la limitante operacional horizontal, para el periodo considerado no toma en cuenta la extracción de la rampa de acceso (con nombre rmpddfef), la cual está definida como el primer polígono en extraer dentro de un banco. Por ende, la herramienta optimiza el valor del VAN extrayendo los polígonos que posean mineral, y en caso de ser necesario, se realiza la extracción de polígonos con costos solo cuando es necesario despejar algún polígono con mineral del banco inferior (caso del polígono F02\_0860\_014 y F02\_0860\_030 para liberar los polígonos F02\_0845\_012 y F02\_0845\_023).

Posteriormente, se realiza la comparación de 1 año de extracción, ya que producto de la restricción vertical que se encuentra ingresada, se extraen de igual manera los polígonos con material estéril para lograr liberar los polígonos inferiores que posean mineral. De esta manera, se realiza la comparación del beneficio en extraer en 1 año sin tomar en cuenta las precedencias horizontales.

**Tabla 21: Beneficio al extraer sin precedencias horizontales para 1 año de Fase 2**

	<b>Beneficio [MUS\$]</b>
<b>Sin Precedencias Horizontales</b>	157
<b>Con Precedencias Horizontales</b>	129
<b>Diferencia</b>	27.9

Por lo tanto, se genera un aumento de 27.9 MUS\$ para 1 año en operación sin considerar las precedencias horizontales. Sin embargo, al no considerarlas, se hace imposible la extracción de un banco debido a la incapacidad de extraer solo polígonos con mejor beneficio. Por ende, este ejercicio muestra solo una respuesta de UDESS al relajar una restricción, y de esta manera observar si modela de manera correcta la extracción en un rajo abierto.

### 9.2.2. *Relajando Restricciones Operacionales*

Se utiliza la restricción operativa de la mina El Soldado de considerar una distancia mínima de 150 metros de operación cuando se trabaja en 2 bancos distintos. Esta provoca una limitante importante al momento de realizar la extracción, debido a que obliga a realizar la extracción de una gran cantidad de polígonos es un banco superior para liberar uno de un banco inferior. De esta manera, cuando un polígono en un banco inferior posea mineral, deben ser extraídos todos del banco superior que se encuentren dentro de un radio proyectado de 150 metros. Por tanto, se genera un aumento y disminución de este radio para conocer cómo la herramienta UDESS realiza la extracción y cómo impacta en el valor del VAN del problema.

Al ir aumentando el radio de interacción, se provoca un aumento de los polígonos necesarios para liberar uno del banco inferior. Esto debido a que al aumentar el radio de interacción, se generan mayores precedencias para un polígono ubicado en un banco inferior. Del mismo modo, se reduce cada vez más la cantidad de polígonos de bancos distintos a extraer en un mismo periodo, provocando prácticamente la extracción de un banco completo para luego comenzar con el banco inferior en el próximo periodo.

Por otro lado, al reducir el radio de interacción, se provoca el efecto contrario ya que se reducen las precedencias operacionales para los polígonos de bancos inferiores, logrando así provocar la extracción de polígonos de una mayor cantidad de bancos en un mismo periodo. Se destaca que existe un límite de bancos operativos en un mismo periodo por lo que se toma como límite 50 metros de radio de interacción mínimo.

Para lograr comparar el efecto del cambio del radio de interacción, se estima el beneficio obtenido al considerar la extracción de polígonos de la fase 2 en 1 año de operación.

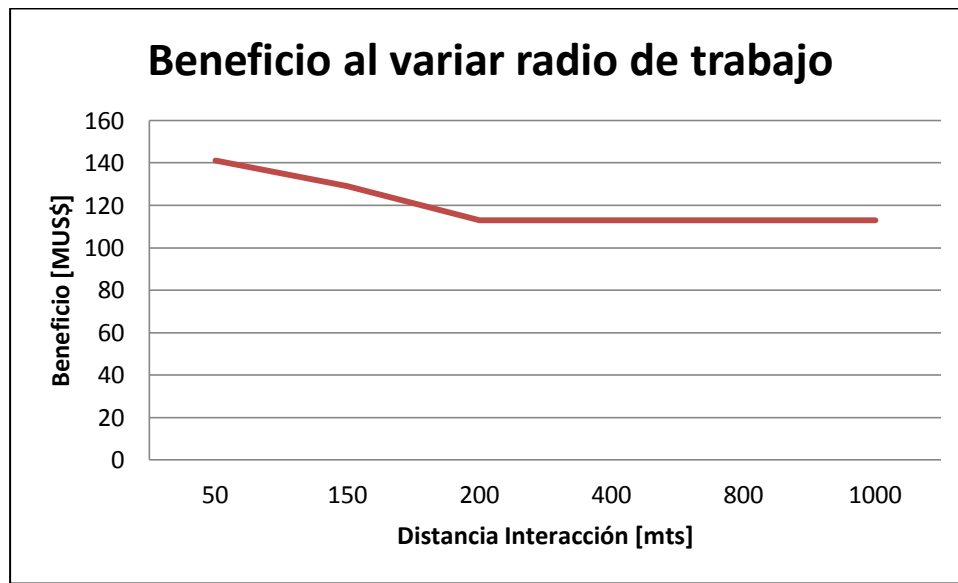


Figura 46: Comparación de beneficio al variar radio de trabajos en 2 bancos distintos

El mayor beneficio ocurre con un radio de 50 metros interacción al obtener una menor cantidad de precedencias, logrando la posibilidad de extraer polígonos con mejor beneficio en los primeros periodos. Con 50 metros como radio de interacción, se puede lograr la extracción de polígonos de bancos más profundos y que posean un mejor beneficio.

Por otro lado, al aumentar la distancia de interacción, se genera una disminución del beneficio producto del aumento de precedencias operacionales y por ende la mayor cantidad de gasto que implica liberar un polígono con mineral. Además, cabe destacar que a medida que aumenta la distancia por sobre los 200 metros, solo se genera una disminución de la cantidad de polígonos de distintos bancos explotados en un mismo periodo, lo que provoca una extracción cada vez más parecida a un banco por periodo. De esta manera, y como no se profundiza hacia polígonos de bancos inferiores, el valor del beneficio no cambia por sobre los 200 metros de distancia.

## 10. PLAN PRODUCTIVO 2014

Con el plan UDESS confirmado, se procede a realizar el cálculo del plan productivo 2014 de la misma manera que fue construido el plan productivo para el año 2013. Para eso, se cuenta inicialmente con los resultados de una nueva corrida de la herramienta UDESS en donde no se contabilizan los polígonos extraídos en el año 2013, generando un plan desde el año 2014 en adelante.

### 10.1. Plan Productivo 2014

Se contabilizan los movimientos por fase de cada periodo calculando el plan productivo para todos los meses del año 2014. La metodología empleada corresponde a la misma utilizada para construir el plan productivo del año 2013.

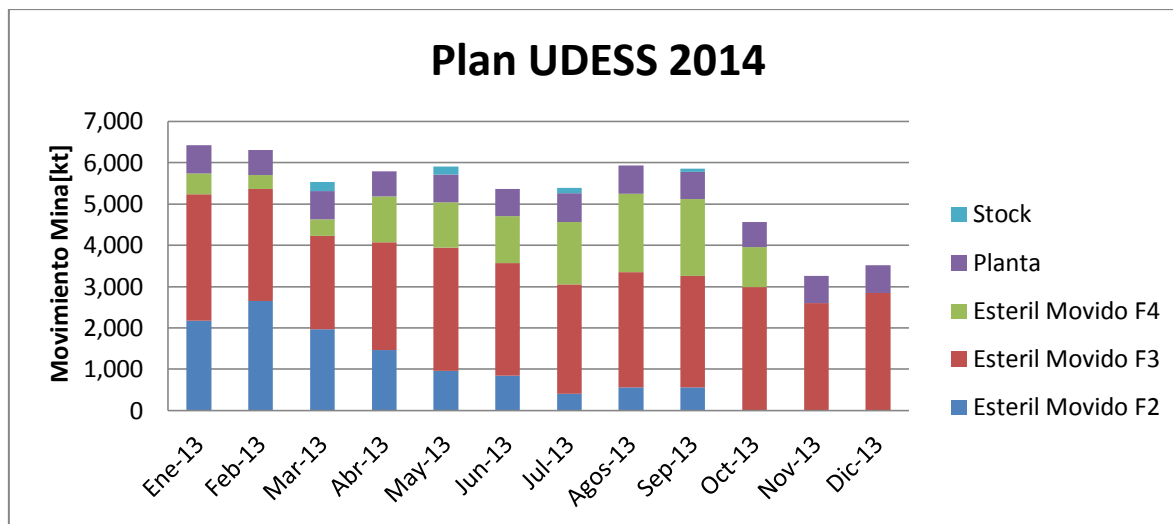


Figura 47: Plan Productivo de UDESS para año 2014

De la misma manera, se calcula la cantidad de cobre fino resultante para el año 2014 considerando las limitaciones de la planta de procesamiento. Debido a que no se cuenta con la información de las productividades de la planta para el año 2014, se utiliza la información del año 2013 para estimar la producción de cobre fino. Por lo tanto, se calcula el plan de alimentación a planta con la respectiva ley de cobre por mes, con lo que posteriormente se calcula la cantidad de cobre fino producido para el año 2014.

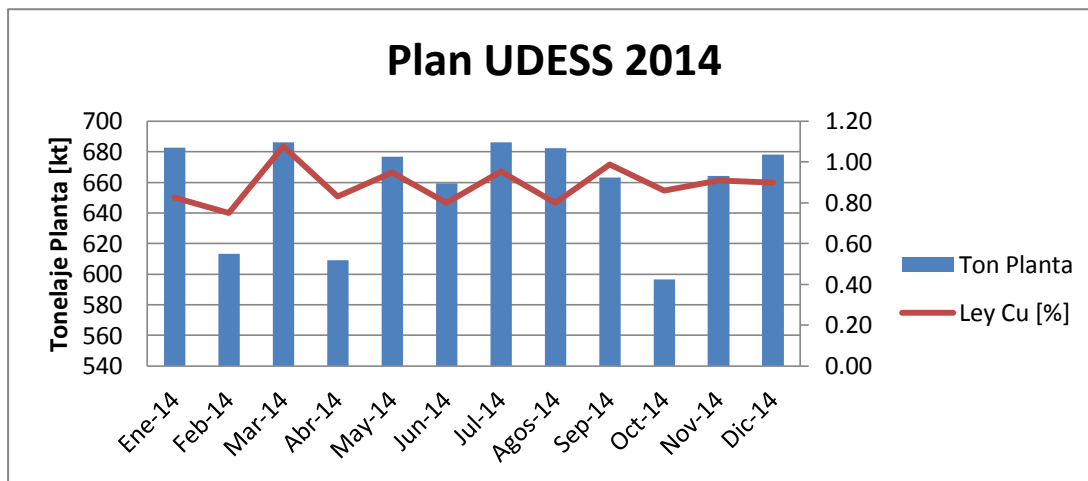


Figura 48: Plan productivo de alimentación a planta para año 2014 estimado con la herramienta estimado con la herramienta UDESS

Del cálculo, se obtiene una producción de fino para el año 2014 de 54.641 Kton de cobre. (Para mayor detalle ver gráfica de plan de fino para el año 2014 en el capítulo de anexos subcapítulo 15.10)

### 10.2. Plan de Trabajo a Cavidades 2014

Adicionalmente, la herramienta no solo entrega el programa óptimo de la extracción de los polígonos, sino que también entrega el momento óptimo para realizar el trabajo de relleno de las cavidades. Por lo tanto, se genera un plan de tratamiento de las cavidades por fase y que no genera retrasos operacionales.

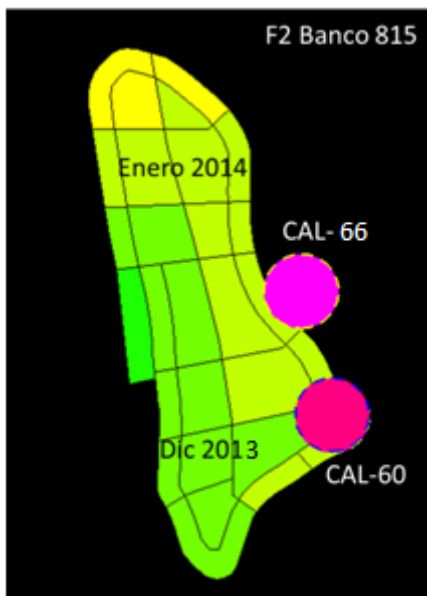


Figura 49: Extracción de polígonos 2014 junto con trabajos a cavidades



De un corte del banco 815, se aprecian los trabajos a realizar para el mes de Enero del 2014 y que están previamente agendados por UDESS.

<b>Fase</b>	<b>Cavidad</b>	<b>Fecha Trabajo</b>
F2	FI_16_FINAL	Enero 2013
	Fi3-5_final	Enero 2013
	SC-27-FINAL	Abril 2013
	01-ca-95	Junio 2013
	CAL-61-CP	Octubre 2013
	Cal-60-Final	Enero 2014
	CAL-66_V7	Enero 2014
F3	01_ar-28	Diciembre 2014
	Ar-17-18	Enero 2015
	Ar-23	2015
	Asw	2015
	CAT-19	2016
	cat-14-v2	2017
	CAT-13	2017
	Cat-37	2017
	CAT-30	2017
	Cat-31	2017
	CAL-60	2017
	CAL-93	2017
	cav-CAT-11	2017
	AR-EXS	2015

**Figura 50: Plan de trabajo de relleno a cavidades**

Del plan de tratamiento a las cavidades resultante, se obtiene que para el año 2014 existe el tratamiento de 3 cavidades en los meses de enero (cavidades CAL-66\_V7 y Cal-60-Final de Fase 2) y diciembre (cavidad 01\_ar-28 de Fase 3).

### **10.3. Plan Quinquenio 2014-2018**

Adicionalmente, se obtiene la cantidad de movimiento total por periodo para los años 2015, 2016, 2017 y 2018. De esta manera se construye el plan para el quinquenio generado por UDESS.

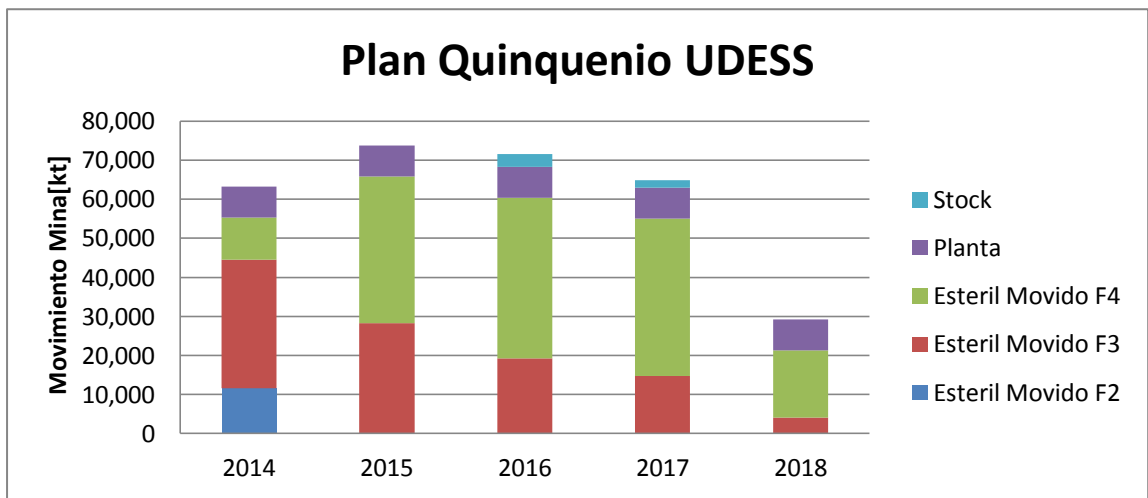


Figura 51: Plan Quinquenio entregado por UDESS para mina El Soldado

Además se obtiene la cantidad de cobre fino producido por año.

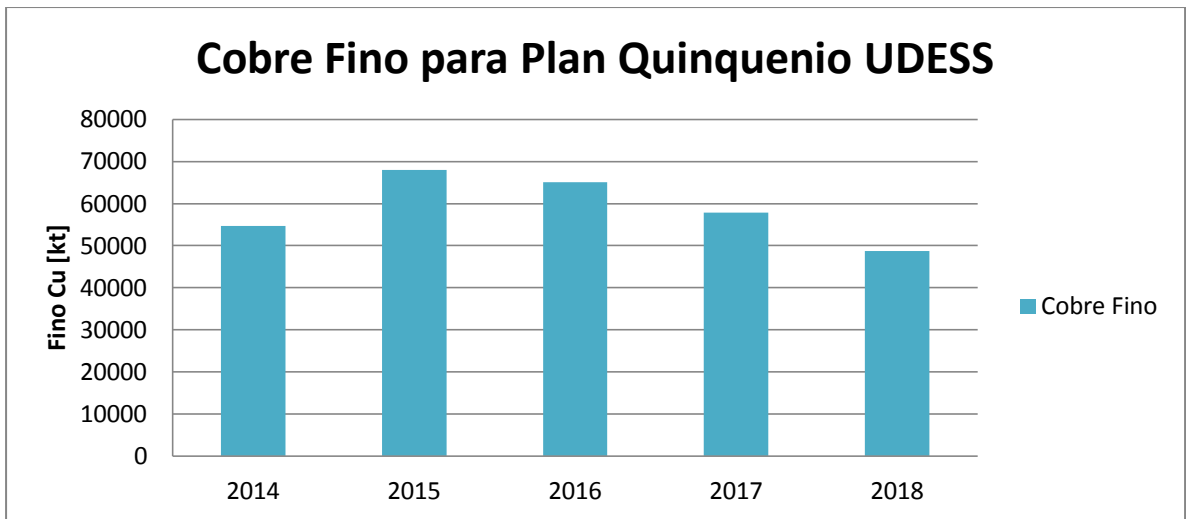


Figura 52: Cobre Fino de Quinquenio entregado por UDESS

## **11. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

### **11.1. Resultados UDESS y Construcción Plan Productivo**

La herramienta UDESS permite entregar un programa óptimo de actividades incorporando previamente las restricciones de precedencias ingresadas. Además, incorpora rendimientos de equipos junto con sus respectivas disponibilidades y usos obtenidos de la mina El Soldado. De los resultados entregados por la herramienta UDESS, se obtienen movimientos por periodo que tienen directa relación con la cantidad de equipos en cada fase, junto con la incorporación de sus respectivas utilidades y disponibilidades operacionales. Si se toma en cuenta la flota de equipos sin considerar estos 2 últimos valores, se obtendría un movimiento sobre los 80 Mton por año que sobrepasa ampliamente la cantidad movida por los años analizados.

Además, se observa una concordancia entre los movimientos de los años y una leve variación en la ley de cobre. Por otro lado, para la construcción del plan de alimentación a planta, se utiliza un manejo de stock que incorpora una mezcla de ley de cobre la cual puede ser sobreestimada por el criterio de mezcla asumido. Adicionalmente, cabe destacar que dentro del tonelaje de cobre fino producido en cada año, existen otras variables que pueden incidir en el cobre total recuperado y que se escapan de lo que puede analizar la herramienta UDESS. Dentro de estas variables se pueden encontrar algunas como la confiabilidad del modelo de recursos utilizado para realizar la cubicación de polígonos, las eventualidades operacionales que generan retrasos o disminución en los rendimientos de equipos.

### **11.2. Validación**

Las comparaciones que se realiza entre el plan entregado por UDESS y el plan Budget, permiten conocer si efectivamente se incorporan precedencias operacionales junto con el rendimiento de equipos en la extracción de la mina. Además, se busca conocer la desviación existente entre los planes, y de esta manera saber si el plan entregado por UDESS está dentro de la diferencia considerada como aceptable por el área de planificación de El Soldado.

De la comparación se obtiene que ambos planes mencionados se encuentran alineados ya que presentan diferencias pequeñas tanto en movimiento total como en cantidad de fino para el año 2013. Para el movimiento, el 6,4% corresponde a un valor que se encuentra dentro del cumplible para la mina El Soldado, y que puede ser provocado por la disminución de rendimientos en los equipos de carguío, en donde se define un ritmo constante para todos las palas y periodos. En la realidad, existen variaciones de los equipos de carguío dependiendo del material que están extrayendo la cual no está considerada en este cálculo y se escapa de los alcances del estudio.

Por otro lado, para la diferencia de cobre fino de -3.3% existen 2 explicaciones que justifican esta pérdida para el año 2013. Por un lado, se considera una ley de corte constante para todo el año 2013 mientras que para el plan Budget la ley de corte es variable. Las pequeñas variaciones de ley de corte en determinados periodos permiten enviar una mejor calidad de mineral, y por ende obtener una cantidad de cobre fino de mayor. Para el plan Budget 2013 se genera esta variación, y por ende existe una ganancia de cobre fino de alrededor de las 2000 toneladas. Adicionalmente, existe una pérdida de fino en el plan de UDESS asociada a la mezcla

generada en el manejo de stock, en donde al mezclar el mineral se produce una disminución de la ley media enviada a planta cuando se requiera. Debido a que solo se considera un Stock en donde se mezcla todo el mineral, no existe un verdadero control de la ley y por ende se aproxima al promedio enviado por los periodos previos a su uso en la planta. Sin embargo, esta simplificación de mezcla genera un movimiento del cobre fino en los periodos posteriores, debido a que solo ocurre mezcla de las leyes y no pérdida de cobre fino. Se destaca que en el plan de UDESS existe una menor variación de la ley media de cobre en los meses del año 2013, lo que puede significar una mejor recuperación de la planta de procesamiento, logrando de esta manera generar un aumento del cobre fino para este año. Sin embargo, no se considera este aumento de cobre fino asociado debido a que se escapa de los alcances del caso estudio analizado.

En la comparación de área planificada, ambos planes presentan una gran similitud debido a que en ambos casos se presenta extracción de polígonos de los bancos superiores. Por otro lado, se observa que existen áreas extraídas similares que difieren en un 3.9%, lo cual corresponde a un nivel de similitud aceptable para el área de planificación de El Soldado. Por lo tanto, geoméricamente la herramienta realiza una extracción similar a la generada manualmente por lo que respeta las precedencias operacionales ingresadas.

Al comparar los movimientos del plan Budget con el plan de UDESS y el movimiento real, se observa que el plan UDESS entrega un tonelaje movido más cercano al real para las 2 fases en operación. Sin embargo, se destaca que la mayor parte del atraso provocado en el tonelaje a mover de la fase 3 corresponde a problemas geomecánicos que se escapan de los alcances del plan generado por UDESS e incluso del plan Budget. Por este motivo, se provoca un real retraso en la fase 3 generando consigo un adelanto de tonelaje en la fase 2. De todas formas, en ambos caso se observa que el plan de UDESS genera un tonelaje movido por fase que se encuentra entre el real y el generado por el plan Budget, por lo que se adiciona un criterio de aceptabilidad a los resultados de la herramienta UDESS.

De esta manera, y con la validación tanto en movimiento, cobre fino, área y movimientos por fases, se aprecia que la herramienta UDESS genera un plan dentro de los parámetros aceptables para la mina El Soldado y que su recodificación desde minería subterránea a minería a cielo abierto funciona.

Al realizar un análisis de sensibilidad sin considerar las restricciones de precedencias horizontales, se obtiene que existe una respuesta lógica de la herramienta UDESS al extraer dentro de un banco prioritariamente los polígonos con mejor beneficio. De esta manera, se genera un aumento notorio del VAN del problema al relajar una restricción que constituye una limitante operacional relevante en un rajo abierto.

Además, al considerar la variación del radio de interacción en trabajo de bancos distintos, se genera un aumento de beneficio al reducir la longitud y una pérdida al aumentarlo. Esto ocurre debido a que al disminuir el radio de interacción, se define una menor cantidad de precedencias logrando liberar antes los polígonos que posean mineral o que tengan un mejor beneficio económico. Por otro lado, al aumentar el radio de interacción, se aumenta la cantidad de precedencias para los polígonos con mejor beneficio y por ende se aumenta el gasto para lograr liberarlos y dejarlos disponibles para su extracción.

Por otro lado, se considera que no existen actividades precedentes para la construcción de la chimenea de relleno a las cavidades. Sin embargo, y debido a que cada una de estas actividades está valorizada como un gasto operacional, la herramienta UDESS intenta programarla lo más tarde posible y cuando no genere un retraso en la extracción del polígono que afecta. Adicionalmente, las restricciones de precedencias horizontales y verticales permiten la construcción de la chimenea de relleno, ya que liberan los polígonos necesarios para poder acceder al polígono que debe ser intervenido. Por lo tanto, la construcción de la chimenea de relleno se realiza en un momento que no genere un retraso para la extracción, reduciendo el impacto negativo al VAN del problema y en un momento que sea operativamente posible.

### 11.3. Plan Productivo 2014

Con la herramienta UDESS validada por el área de planificación de El Soldado, se procede a construir un plan productivo para el año 2014. De las nuevas corridas se aprecia que la herramienta entrega un plan con movimientos un poco inferiores para el año 2014 en comparación al año 2013 aunque existe una mayor presencia de cobre fino. La disminución del movimiento para el año 2014 se debe a una limitante del plan productivo LOM, junto con el término de la fase 2 en operación. Por otro lado, existe una disminución de tonelaje en el año 2018 debido al no considerar todos los polígonos de extracción para este año. Esta información no fue tomada en cuenta ya que no estaba disponible al momento de realizar la carga de datos. Para esta, se utilizaron polígonos del plan Budget 2013 que solo cuentan con la producción de los años 2013, 2014, 2015, 2016 y 2017. Por tanto, para el año 2018 solo se consideran los polígonos extras que están adicionados en el plan Budget 2013 y los que no fueron extraídos en los periodos previos.

Para la producción de cobre fino, el plan de UDESS genera un aumento de alrededor de 2.403 toneladas que puede ser explicada por un lado, por la reducción de fino presente en el año 2013 producto de la mezcla de mineral asumida en el Stock, y por otro lado, producto del adelanto de cobre fino de los periodos posteriores al 2014.

### 11.4. Valor agregado con UDESS

La herramienta UDESS agenda realizando una optimización del VAN de un problema. En este caso, UDESS incorpora la valorización de todos los polígonos y cavidades, logrando programar y obtener un mayor valor económico. Adicionalmente, se relacionan todas las actividades en base a precedencias operacionales de manera de ir optimizando y generando una secuencia que sea operativamente posible. De esta manera, la herramienta UDESS agrega valor al incorporar una secuencia óptima versus una extracción realizada manualmente. Por este motivo, se cuantifica la diferencia de cobre fino para 2 periodos y así realizar un análisis en base a la utilización de UDESS en el caso estudio.

**Tabla 22: Diferencia de Cobre Fino para los años 2013 y 2014 para el plan Budget y UDESS.**

Plan	Producción [kt]	
	2013	2014
<b>Budget 2013</b>	58.617	52.238

<b>UDESS</b>	56.711	54.641
<b>Diferencia [ton]</b>	-1.907	2.403
<b>Diferencia [%]</b>	-3.25%	4.40%

Se observa de la tabla que existe una diferencia negativa para el periodo del 2013 el cual puede generar una pérdida de beneficio para este año. Sin embargo, dentro de este valor existe una razón para justificar esta pérdida de contenido de cobre. Para la construcción del plan Budget 2013 se utiliza una ley de corte variable, lo que logra generar una mayor cantidad de cobre fino en periodos en los cuales se cuente con mineral en exceso. Esto ocurre debido a que al subir la ley de corte, se procesa el mineral con mejor ley, aumentando en un año la cantidad de cobre fino en alrededor de 2000 toneladas. Debido a que la ley de corte utilizada en el cálculo con UDESS es fija, la pérdida que se genera es producto mayoritariamente por no considerar una ley de corte variable. Por otro lado, el criterio de mezcla asumido en el Stock puede reducir la cantidad de fino extraída, ya que se diluye la ley de mineral y por ende se reduce la cantidad de fino producida, no obstante, el cobre fino es tratado de igual manera para los periodos posteriores.

Por otro lado, para cuantificar el valor de extraer una diferencia de cobre fino, se calcula el VAN de los ingresos, logrando así comparar la pérdida de cobre fino del año 2013 con la ganancia del año 2014. Utilizando una tasa de descuento del 10%, se obtiene una actualización de los flujos para los 2 años analizados.

**Tabla 23: Comparación de VAN entre Budget y UDESS para años 2013 y 2014**

	<b>MUS\$</b>
<b>VAN Budget 2013</b>	637.9
<b>VAN UDESS</b>	637.6
<b>Ganancia</b>	<b>1,67</b>

De esta manera, se obtiene que para el periodo analizado se genera una ganancia de 1.67 MUS\$ producto de la utilización de la herramienta UDESS, la cual entrega un aumento de 2000 toneladas de cobre fino para el año 2014. Este aumento de fino se explica por la optimización generada con la herramienta UDESS logrando generar un mayor retorno para la compañía. Como en este caso particular la herramienta optimiza el VAN, agenda los polígonos que generaran un mayor retorno en los primeros periodos. Por ende, es esperable que la extracción se enfoque en programar los polígonos con mineral y con mejor ley de cobre lo antes posible, logrando generar con esto un aumento de cobre fino en los primeros periodos. A medida que se avanza en la extracción, la herramienta evalúa si conviene seguir la extracción en un banco determinado o comenzar la extracción en un banco inferior, logrando de esta manera adelantar la extracción de polígonos con mineral al liberar los polígonos precedentes a este.

Por otro lado, de la construcción del plan productivo incorporando interacción entre el rajo y la mina subterránea, se aprecia que existe una valorización de los trabajos en las cavidades que está considerada dentro de la herramienta UDESS. Por lo tanto, además de lograr una extracción con un mejor VAN, UDESS incorpora las cavidades como un costo para la mina y las evalúa

periodo a periodo con el objetivo de que no impacten mayormente en el VAN del problema. Por otro lado, al considerar las precedencias con los polígonos, se programan los trabajos con el objetivo que su labor no genere un retraso operacional. De esta manera, la herramienta UDESS incorpora de manera óptima la interacción del rajo con la mina subterránea además de ir optimizando el valor para El Soldado.

## 12. CONCLUSIONES

Con la metodología de este estudio se permite incorporar la interacción rajo-subterránea al definir precedencias operacionales entre los polígonos de extracción y las cavidades a rellenar. Se genera por lo tanto un plan productivo con mejor cumplimiento debido a la interacción definida previa al cómputo de la herramienta.

En el cómputo realizado por la herramienta UDESS se incorporan la valorización de cada polígono de extracción junto con el costo involucrado en los trabajos de relleno de cavidades. Por este motivo, el plan generado no solo es el que presenta menor retrasos operacionales, sino que además es el más óptimo ya que contiene una optimización que maximiza el valor de los flujos a medida que se avanza en la extracción.

Al incorporar precedencias operaciones y restricciones de El Soldado, se logra adaptar la herramienta UDESS a un problema de minería a cielo abierto cuando inicialmente fue diseñado para resolver problemas de minería subterránea. Además, se comparan los resultados obtenidos con el plan Budget 2013 obteniendo una diferencia considerada como aceptable para el área de planificación de El Soldado.

Se construye un plan de reconocimiento y control de labores subterráneas que está secuenciado de manera óptima y que no genera retrasos operacionales en la mina El Soldado. La metodología utilizada permite programar la extracción considerando con anterioridad los trabajos a las cavidades, logrando con esto generar un plan minero más cercano a la realidad.

Las actividades definidas como trabajos a las cavidades no consideran precedencias operacionales, y por ende podrían ser programadas en los primeros periodos. Sin embargo, al considerar una valorización en estas, y que en este caso se consideran siempre como un costo, la herramienta UDESS busca postergar lo mayor posible los trabajos de las cavidades hasta el momento en el cual no genere un retraso al polígono que preceden. Además, al considerar el rendimiento de la perforadora a cargo de la labor, se incluyen los tiempos de los trabajos involucrados en la auscultación, construcción de chimenea y relleno de la cavidad.

La comparación realizada con el plan Budget 2013 permite verificar que las precedencias operacionales son respetadas y además se incorporan el rendimiento de equipos presentes en el cómputo de UDESS. Por otro lado, el análisis del cobre fino por periodo y la comparación del VAN de los ingresos, permite validar la optimización que la herramienta genera considerando la valorización de polígonos y el costo de los trabajos a las cavidades subterráneas.

Al incorporar la flota y rendimiento de equipos presentes en la mina, se generan restricciones fuertes para el movimiento de material en las distintas fases en operaciones. Adicionalmente, al incorporar restricciones operacionales se limita la libertad que puede tomar la herramienta en la secuencia de extracción de los polígonos.

Con la incorporación de la flota y rendimientos de equipos se obtiene un plan de movimiento que no sea aleja mayormente (6,4% de diferencia) del plan productivo Budget para el año 2013, logrando con esto validar la herramienta UDESS en su utilización en minería a cielo abierto. Por otro lado, se realiza una comparación en base a la cantidad de cobre fino extraído



para el año 2013 el cual presenta una diferencia de tan solo el 3,4% logrando concluir la buena precisión que entrega la herramienta UDESS.

La consideración de una ley de corte fija para la carga de UDESS limita la optimización, ya que en determinados periodos, y cuando existe una mayor cantidad de mineral a planta de lo que esta puede procesar, se privilegia el envío al chancado del mineral con mejor ley logrando así obtener una mayor cantidad de cobre fino.

Dentro de las limitaciones operacionales de la planta de procesamiento, se encuentra la recuperación metalúrgica que varía en función de diversos parámetros entre los cuales se encuentra la ley de mineral. Al generar un plan productivo con una menor variación de ley, es esperable que exista una recuperación más constante y que no se generen disminuciones en algunos meses del año. De esta manera, se puede generar una mayor cantidad de cobre fino producto de un mejor tratamiento en la planta al considerar una menor variación de la ley de cobre.

El VAN generado a partir de la producción de fino para los años 2013 y 2014 muestra que la secuencia generada permite adelantar una cantidad de fino en el año 2014, provocando un aumento de los flujos para ese año. Por lo tanto, se genera un mayor retorno para la operación El Soldado aún cuando la producción de fino en los años posteriores al 2014 se vea afectada al adelantar cobre fino.

La restricción operacional que afecta mayormente el cómputo de UDESS corresponde a la precedencia operacional de la mina El Soldado, ya que es la que genera una mayor cantidad de precedencias operacionales a cada polígono. Al definir una distancia de 150 metros mínima de operación entre polígonos de bancos distintos, se incorpora la restricción vertical de talud y logra modelar de manera más cercana la extracción ocurrida en un rajo abierto. Es importante destacar que cuando ocurre un aumento de esta distancia, se genera un mayor número de precedencias entre polígonos de bancos distintos logrando incluso provocar una extracción parecida a la de un banco por periodo, lo cual deja poca libertad a la herramienta UDESS para optimizar en los distintos periodos. Por otro lado, no se puede reducir demasiado la distancia de interacción ya que existe un límite operativo que permite la correcta extracción en polígonos de bancos distintos. Adicionalmente, la precedencia horizontal ayuda a incorporar la extracción operativa de polígonos dentro de un banco, por lo que son necesarias ambas restricciones para modelar de mejor forma la extracción en un rajo abierto.

La combinación de las precedencias horizontales y verticales permiten programar de manera operativa las actividades relacionadas con la construcción de la chimenea de relleno. Esto ocurre debido a que las precedencias mencionadas liberan los polígonos cercanos al que es intervenido, y por ende permiten la construcción de la chimenea de relleno cuando sea necesario. Las actividades asociadas a las cavidades no poseen precedencias, por lo que solo son postergadas en su realización producto del costo que involucran, sin embargo deben ser realizadas en un momento que no genere un retraso operacional.

Es de vital importancia incorporar las restricciones operativas verticales, horizontales y la de trabajos en bancos distintos para lograr obtener una extracción operativa y óptima. Además, en el caso particular de El Soldado, se deben incorporar la interacción del rajo abierto con la mina subterránea mediante las precedencias operaciones entre polígonos y cavidades.

### **13.RECOMENDACIONES**

Dentro de las recomendaciones se encuentran:

De los resultados del plan de trabajo de cavidades, se recomienda realizar la construcción del plan productivo de mediano plazo para el año 2017 con la metodología empleada debido al gran número de cavidades a tratar en ese año. Además, y debido al poco detalle del año 2017 generado en este plan, se hace interesante obtener una planificación mensual para cuantificar el impacto que pueda generar la interacción del rajo con un mayor número de cavidades subterráneas. De esta manera, se pueden tomar decisiones en caso de que el impacto sea mayor que el estimado en este estudio para el año 2014.

En caso de presentar una mayor interacción entre la mina rajo y subterránea, se recomienda implementar la metodología de trabajo a la planificación de largo plazo para así agregar mayor representatividad y operatividad al momento de planificar. De esta manera, se toman decisiones al momento de realizar los planes productivos cuando el impacto de la mina subterránea es significativo.

Adicionalmente, se recomienda el uso de la metodología del trabajo en minas que presenten transición desde subterránea a rajo, y en donde sea necesario el relleno de labores subterráneas para evitar inestabilidades que se puedan generar riegos para el personal de la mina.

Además, la metodología permite incorporar otro tipo de trabajos cuando se realiza una explotación en rajo abierto y cuando se deben realizar trabajos extras producto de la interacción con otra mina, estructura geológica u otro problema que pueda generar retrasos operacionales. Por ende, se pueden incorporar otras labores subterráneas que no fueron consideradas dentro de los alcances de este trabajo.

Por otro lado, se sugieren mejoras en la herramienta UDESS en la construcción de un plan productivo:

Se hace interesante la utilización de la herramienta UDESS al incorporar restricciones operacionales y una valorización de las actividades a realizar. Sin embargo, no existe un formato definido para lograr realizar la carga de datos rápidamente, ya que se deben importar datos de diversos softwares para posteriormente construir un archivo formato .CSV que pueda ser leído por UDESS. Particularmente en este caso, la carga de datos de las precedencias horizontales debe hacerse por banco y por polígono, incurriendo en un tiempo valioso al momento de construir un plan. Además, al agregar la interacción entre polígonos y cavidades se debe revisar por banco si existe interacción y luego buscar el polígono que debe ser intervenido para construir la chimenea de relleno. Por lo tanto, se recomienda incorporar el uso de archivos de diversos formatos provenientes de los softwares mayormente utilizados en el mercado, con el objetivo de facilitar la carga de datos debido a la gran cantidad de tiempo invertida en formular el archivo de entrada. Además, debido a que constantemente en las operaciones existen cambios en el modelo de recursos y/o en parámetros de diseño, se hace aún más necesario el uso de formatos variados para lograr una rápida carga de datos.

Se hace interesante además, incorporar un archivo de entrada en donde la herramienta pueda obtener los rendimientos de equipos por periodo, logrando así reducir la intervención al cómputo y facilitando la importación de los datos. Además, se hace interesante definir variables que permitan trabajar junto con el modelo de recursos y obtener un rendimiento variable de equipo en base a los criterios definidos sobre las variables. Por otro lado, está la mejora que se puede realizar a la interface de la herramienta debido a que se complica el uso de código para un usuario que pretende realizar un plan productivo en el menor tiempo posible.

Por otro lado, se hace interesante incluir variaciones de leyes de corte para distintos periodos con el objetivo de ir generando una mayor cantidad de cobre fino cuando sea posible. Adicionalmente, se recomienda incorporar otras relaciones entre los equipos existentes en la mina como pueden ser equipos auxiliares y/o eventualidades operativas como reparación de carpetas de rodados, limpieza de plataforma, saneamiento, etc.

Otra recomendación en la herramienta UDESS, es la posibilidad de generar un plan productivo en donde se incorporen la perforación de los polígonos previo a su extracción, logrando así obtener de la herramienta la flota de equipos que genera cuellos de botella del sistema minero.

Otra recomendación a la herramienta corresponde al momento de generar las restricciones horizontales, en donde se puede generar una mayor cantidad de caminos por cada pala presente en un banco. De esta manera, se puede obtener una extracción más real al considerar diversos caminos que sigue cada pala.

Además, se recomienda el uso de una capacidad planta con el objetivo de limitar la extracción de mineral en el rajo y reduciendo la cantidad de material a stock para un periodo. Con esto, se privilegia la extracción de estéril para liberar polígonos que presenten mejor ley de cobre, los cuales son enviados a planta en los periodos posteriores, logrando generar una mayor cantidad de cobre fino para los primeros periodos.

## 14.BIBLIOGRAFÍA

- [1] Rocher, Winston (2012), Secuenciamiento Óptimo para Preparación Minera Subterránea
- [2] Badilla, Cristian (2012), Planificación MP El Soldado con módulos MineSight
- [3] Ibacache, Nicolas et al. (2012), Procedimiento Detección y Control de Cavidades El Soldado
- [4] Lerchs H, Grossmann I. F. (1965), Optimun Design of Open Pit Mines
- [5] Vázquez, Alejandro et al. (2010), Diseño y Operaciones a Cielo Abierto.
- [6] Alexandra M. Newman et al. (2007), A Review of Operations Research in Mine Planning, Workshop on Operations Research in Mining. 1-13.
- [7] Marcelo Vargas et al. (2009), Optimal Open-Pit Short-Term Planning Under Uncertainty and Blending Constraints
- [8] Gaupp, M., (2008), Methods for improving the tractability of the block sequencing problem for an open pit mine. P. 15-22.
- [9] Morales, Nelson et al. (2012), Integrating constructability of a project into the optimization of production planning and scheduling.
- [10] Camus & Guzmán Consultores Ltda. (2007), Declaración de Impacto Ambiental Proyecto Continuación Norte Rajo Abierto El Soldado

## 15.ANEXOS

### 15.1. Vistas Mina El Soldado con interacción rajo y cavidades subterráneas

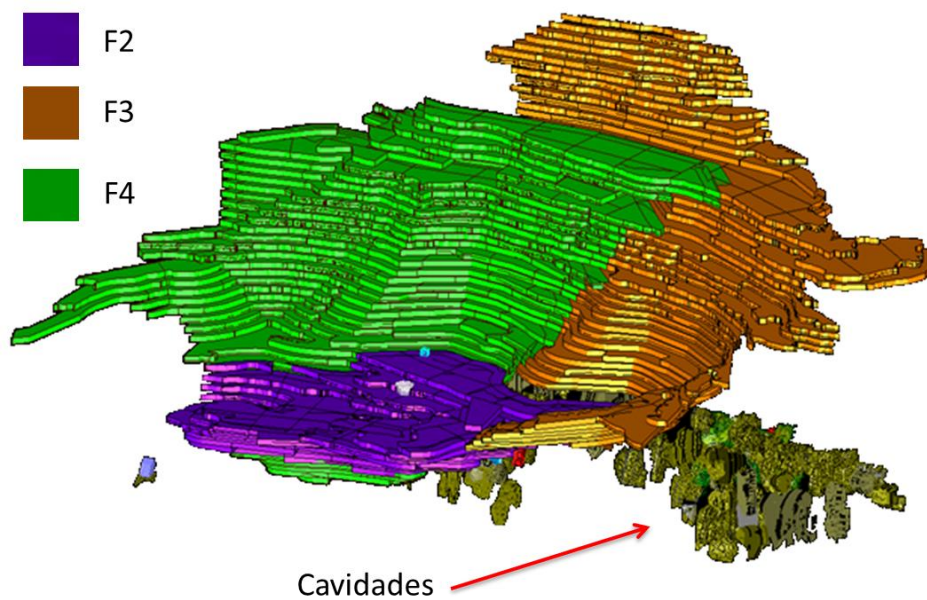


Figura 53: ANEXO 15.1: Vista isométrica Mina El Soldado con interacción rajo-subterránea

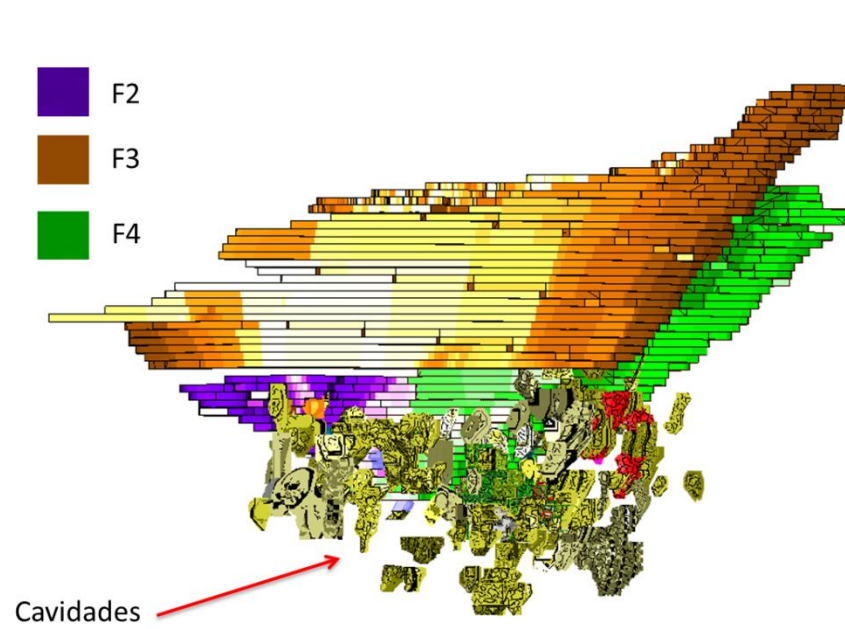


Figura 54: ANEXO 15.1: Vista en Corte Mina El Soldado con interacción rajo-subterránea

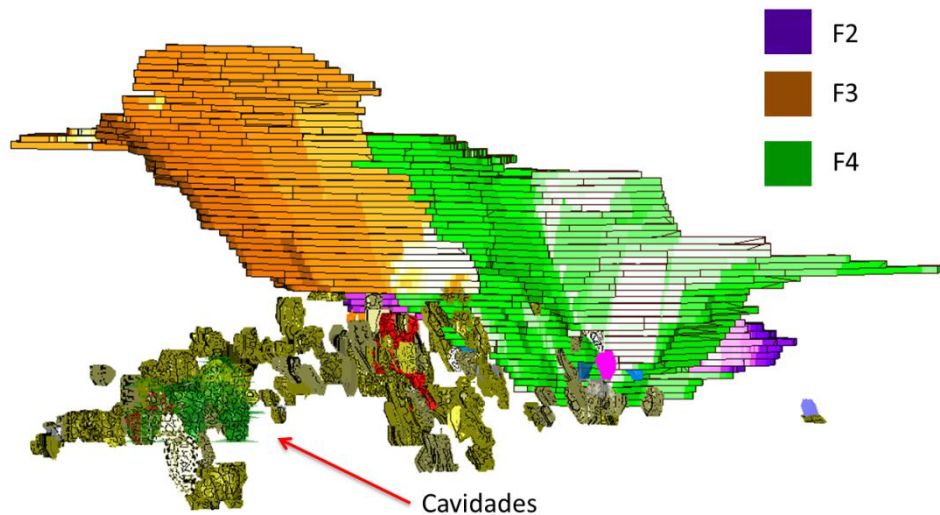


Figura 55: ANEXO 15.1: Vista en Corte Mina El Soldado con interacción rajo-subterránea

## 15.2. Cavidades por Fase necesarias para formar archivo de entrada de UDESS

Tabla 24: ANEXO 15.2: Interacción Polígonos con Cavidades Fase 2

Fase 2				
Cota	Mes_Año Interacción.	Mes_Año Auscultación.	Polígono	Cavidades Vacías
920	13_01	12_10	F02_0905_009	FILO, FI-SC-N_FINAL
875	13_05	13_02	F02_0875_013	CASERONES FALTA POR QUEMAR, FI-16-FINAL
875	13_05	13_02	F02_0875_013	CASERONES FALTA POR QUEMAR, Fi3-5_final
830	13_11	13_08	F02_0830_015	CALIFORNIA, 01-cal-95
830	13_10	13_07	F02_0830_028	CALIFORNIA, 01-cal-95
815	13_12	13_09	F02_0815_005	CALIFORNIA, 01-cal-95
815	13_12	13_09	F02_0815_003	CALIFORNIA, CAL-61-CP
800	14_02	13_11	F02_0800_017	CALIFORNIA, CAL-60-FINAL
785	14_06	14_03	F02_0770_004	CAL-66-V7
800	2016	13_09	F02_0845_019	CALIFORNIA, CAL-93-TOTAL
845	2015	13_03	F02_0890_005	STA CLARA, SC-27-FINAL
800	14_02	13_11	F02_0800_002	CALIFORNIA, CAL-61-v5

Tabla 25: ANEXO 15.2: Interacción Polígonos con Cavidades Fase 3

Fase 3				
Cota	Mes_Año Interacción	Mes_Año Auscultación	Polígono	Cavidades Vacías
980	2015	14_10	F03_1025_006	ARAUCO, 01-ar-28
980	2015	14_11	F03_1010_006	ARAUCO, AR-17-18
965	2015	14_12	F03_1010_003	ARAUCO, AR-17-18
965	2015		F04_0950_001	ARAUCO, CAVING AR-EXS
860	2016		F03_0860_001	STA CLARA, SC-27-FINAL

### 15.3. UDESS (Underground Development and Extraction Sequencing and Scheduling)

Se muestra el modelo de optimización de la herramienta UDESS.

#### 15.3.1. Modelo de Programación Matemática

Se considera una discretización de tiempo en periodos  $t=1, 2, \dots, T$  donde  $T$  corresponde al horizonte de tiempo o números de periodos de programación. Sin pérdida de generalidad, se supone que cada periodo de tiempo dura 1 unidad de tiempo.

##### 15.3.1.1. Actividades y parámetros económicos

Se considera un set de actividades  $A$  previas a la extracción de mineral. Entonces, para cada actividad  $i \in A$  se denota  $v_i^+$  como el costo de iniciar una actividad,  $v_i^-$  como el costo de finalizar una actividad y  $v_i$  es el costo neto de desarrollo. Además se considera  $v_{\max i}$  como la tasa máxima de progreso de la actividad  $i$ . Por lo tanto, el largo de la actividad sería  $l_i = \frac{1}{v_{\max i}}$  (considerando que cada periodo tiene una duración de 1 unidad de tiempo definida  $t$ ).

##### 15.3.1.2. Variables de Decisión

Las variables corresponden a:

$$p_{it} = \text{porcentaje de actividad } i \text{ desarrollada en periodo } t$$

Y las siguientes variables que están asociadas con el comienzo y el fin de una actividad:

$$s_{it} = \begin{cases} 1 & \text{actividad } i \text{ ha comenzado en el periodo } t \\ 0 & \text{si no} \end{cases}$$

$$e_{it} = \begin{cases} 1 & \text{actividad } i \text{ ha terminado en el periodo } t \\ 0 & \text{si no} \end{cases}$$

##### 15.3.1.3. Función Objetivo

Se define la función objetivo, la cual corresponde a maximizar el valor total descontando un factor  $\alpha < 1$ , que muestra el efecto del tiempo en función de los riesgos asumidos:

$$V = \sum_{t=1}^T \alpha^t \sum_{i \in A} (v_i p_{it} - v_i^+ \Delta s_{it} - v_i^- \Delta e_{it})$$

Donde  $\Delta s_{it} = s_{it} - s_{it-1}$ ,  $\Delta e_{it} = e_{it} - e_{it-1}$  y en donde  $s_{i0} = e_{i0} = 0$

#### 15.3.1.4. Restricciones

##### 15.3.1.4.1. Variables Estructurales

Se agregan las siguientes definiciones para lograr representar correctamente las variables involucradas en el modelo.

$$\Delta s_{it} \geq 0, \Delta e_{it} \leq 0 \quad (\forall i \in A)(\forall t = 1, 2, \dots, T) \quad (2)$$

$$p_{it} \leq s_{it} \quad (\forall i \in A)(\forall t = 1, 2, \dots, T) \quad (3)$$

$$p_{it} \leq e_{it} \quad (\forall i \in A)(\forall t = 1, 2, \dots, T) \quad (4)$$

$$1 - e_{it} \leq \sum_{s \leq t} p_{is} \quad (\forall i \in A)(\forall t = 1, 2, \dots, T) \quad (5)$$

$$p_{it} \leq v_{max\ i} \quad (\forall i \in A)(\forall t = 1, 2, \dots, T) \quad (6)$$

En la ecuación (2) se muestra que solo hay una hora de inicio y una hora de finalización de actividades. En la ecuación (3) y (4) se muestran que para desarrollar una proporción de actividad, esta debe haber empezado y no haber terminado. Al mismo tiempo, el progreso en cualquier periodo no puede ser mayor del 100% del total del progreso. Adicionalmente, la ecuación (5) muestra que al finalizar una actividad, es necesario realizar el 100% de la actividad y la ecuación (6) muestra la velocidad máxima de desarrollo para todos que no puede excederse.

##### 15.3.1.4.2. Recursos

Se toma un conjunto de  $R$  recursos disponibles y un requerimiento de  $c_r^i$  de recursos para completar la actividad con  $r \in R$ . La disponibilidad total de un recurso  $r$  en un periodo de tiempo  $t$  es denotado como  $R_t^r$ . Las limitaciones establecen que el uso de los recursos no puede exceder la disponibilidad total del recurso en un periodo dado.

$$\sum_{i \in A} c_r^i p_{it} \leq R_t^r \quad (\forall i \in A)(\forall r \in R)(\forall t = 1, 2, \dots, T)$$



### 15.3.1.4.3. Representación de Precedentes

Para cada actividad  $i$  se considera un conjunto  $P(i)$  de predecesores, es decir  $j \in P(i)$  significa que la actividad  $j$  debe terminar antes (o en el mismo periodo) que la actividad  $i$ . Cabe destacar que esta relación induce a un grafo dirigido  $G = (A, X)$  donde  $(i, j) \in X \leftrightarrow j \in P(i)$ , por lo tanto se puede hablar de *nodos raíz* si  $P(i) = \emptyset$  ( $i$  no tiene predecesores). Además, se puede llamar a  $A$  al conjunto de raíces.

Por otro lado, se puede definir los *nodos hoja*:  $i \in P(i)$  es hoja si  $i$  no pertenece a  $P(j)$  para ningún  $j \in A$  ( $i$  no es un predecesor). Se denota  $\Gamma$  al conjunto de todas las hojas.

Se impone la relación de precedencia utilizando los 2 conjuntos de restricciones. La primera restricción establece que para partir una cierta actividad, todos sus predecesores deben haber terminado.

$$s_{it} \leq 1 - e_{it} \quad (\forall (i, j) \in X) \quad (\forall t = 1, 2, \dots, T)$$

Este conjunto de restricciones no es suficiente para capturar la precedencia, ya que solo es considerado el tiempo requerido por los predecesores directos de una actividad. Con el fin de resolver este problema, se calcula para cada hoja  $i \in \Gamma$  el conjunto de todos los caminos  $\varphi(i)$  en  $G$  que comienzan en  $i$  y terminan en algún  $j \in A$ . Entonces, se impone la restricción:

$$\sum_{j \in Q} l_j p_{it} \leq 1 \quad (\forall i \in \Gamma) (\forall Q \in \varphi(i)) (\forall t = 1, 2, \dots, T)$$

## 15.4. Archivo de Entrada a UDESS

Tabla 26: ANEXO 15.4: Archivo de Entrada UDESS

Polígono	Descripción	Precedencia Horizontal+Cavidades	Sucesor	Tasa Max (inf)	Largo Actividad (Ton)	Valor [US\$]	X	Y	Z
01-ar-28	Cavidad_01-ar-28			2867123	675	156199	998	-41	932
01-cal-95	Cavidad_01-cal-95			2430000	675	132489	563	-392	802
F02_0740_001	Polígono_Fase_02_Cota_0740_Número_001	F02_0740_002:		4954919	165163.9577	-2005342	582	-344	748
F02_0785_003	Polígono_Fase_02_Cota_0785_Número_003	F02_0785_004:		9964584	332152.7911	-7475881	565	-318	793
F02_0800_007	Polígono_Fase_02_Cota_0800_Número_007	F02_0800_020:		9257278	308575.9383	619389	488	-283	808
F02_0800_012	Polígono_Fase_02_Cota_0800_Número_012	F02_0800_017::CAL-66-V7_FINAL:		1908146	63604.86892	-2664278	554	-433	808
F02_0800_017	Polígono_Fase_02_Cota_0800_Número_017	F02_0800_005::CAL-66-V7_FINAL:		5074482	169149.4111	-6356223	628	-380	808
F02_0815_001	Polígono_Fase_02_Cota_0815_Número_001	F02_0815_026::CAL-93-TOTAL:		3946297	131543.2353	-1560813	566	-189	823
F02_0815_005	Polígono_Fase_02_Cota_0815_Número_005	F02_0815_016::Cal-60-FINAL:		9270910	309030.3319	-6639102	573	-389	823
F03_0965_002	Polígono_Fase_03_Cota_0965_Número_002	F03_0965_016:		11470696	382356.5617	-4554899	939	-101	973
F03_0980_005	Polígono_Fase_03_Cota_0980_Número_005	F03_0980_010:		8122217	270740.5598	-347560	836	-505	988
F03_0980_007	Polígono_Fase_03_Cota_0980_Número_007	F03_0980_008:		7643635	254787.8356	-1402759	1048	48	988
F03_0995_007	Polígono_Fase_03_Cota_0995_Número_007	F03_0995_008:		6071879	202395.9673	395644	904	249	1003
F03_1010_004	Polígono_Fase_03_Cota_1010_Número_004	F03_1010_003:		9397126	313237.5274	628746	1043	-382	1018
F03_1025_004	Polígono_Fase_03_Cota_1025_Número_004	F03_1025_005:		11275747	375858.2658	-180025	1005	-131	1033
F04_1265_002	Polígono_Fase_04_Cota_1265_Número_002	F04_1265_006:		9733038	324434.5895	651221	1148	-1008	1273
F04_1280_007	Polígono_Fase_04_Cota_1280_Número_007			12181442	406048.0761	815040	1033	-1204	1288
F04_1295_014	Polígono_Fase_04_Cota_1295_Número_014			4674589	155819.643	312769	1177	-864	1303
F04_1340_002	Polígono_Fase_04_Cota_1340_Número_002	F04_1340_001:		7506761	250225.3726	502265	1418	-436	1348
F04_1385_002	Polígono_Fase_04_Cota_1385_Número_002	F04_1385_003:		4602512	153417.0622	307946	1451	-427	1393
F04_1385_003	Polígono_Fase_04_Cota_1385_Número_003	F04_1385_001:		5398394	179946.4839	361197	1452	-557	1393
F04_1400_001	Polígono_Fase_04_Cota_1400_Número_001	F04_1400_002:		6256541	208551.3523	418615	1468	-324	1408
FI-SC-N_FINAL	Cavidad_FI-SC-N_FINAL			4672961	675	254150	622	-745	874
SC-27-FINAL	Cavidad_SC-27-FINAL			5197040	675	282577	783	-480	828
SC-45-V5	Cavidad_SC-45-V5			4877810	675	265262	580	-561	794

## 15.5. Valorización Polígonos y Cavidades

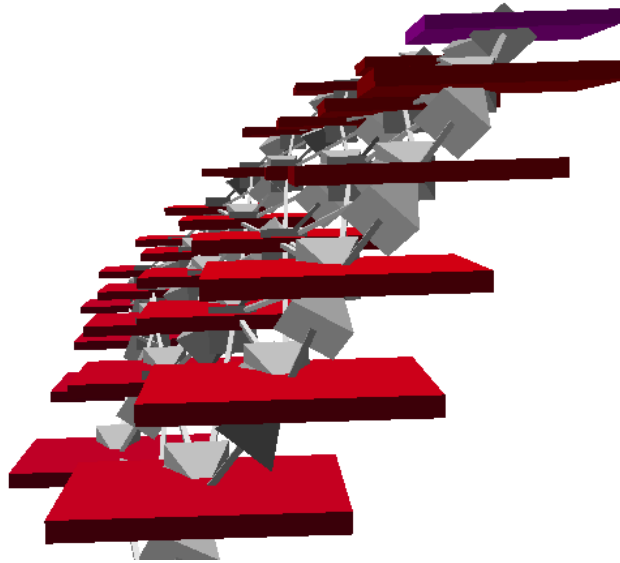
Tabla 27: ANEXO 15.5: Valorización de Polígonos de Extracción

Polígono	Costo Mina [US\$]	Costo Planta [US\$]	Ingreso [US\$]	Valor [US\$]
F02_0740_001	452273	609302	3066917	2005342
F02_0740_001_rmpddef	218219	9819	26034	-202003
F02_0740_002	408375	587226	2136992	1141391
F02_0740_003	249780	257500	735206	227926
F02_0740_004	420951	731919	3836101	2683232
F02_0755_001	646708	1273347	7812066	5892011
F02_0755_001_rmpddef	212073	0	0	-212073
F02_0755_002	452460	268092	900878	180326
F02_0755_003	398596	71683	199126	-271152
F02_0755_004	424421	96334	253648	-267107
F02_0755_005	751303	1544838	8796166	6500025
F02_0770_001	1360255	2661850	13057939	9035834
F02_0770_001_rmpddef	196819	0	0	-196819
F02_0770_002	817466	34141	102130	-749477

**Tabla 28: ANEXO 15.5: Valorización Cavidades a Rellenar**

<b>Cavidad</b>	<b>Costo P&amp;T [US\$]</b>	<b>Costo C&amp;T [US\$]</b>	<b>Otros Costos [US\$]</b>	<b>Total</b>
01-cal-95	257	80819	51413	132489
CAL-61-CP	257	181219	114755	296231
Cal-60-FINAL	257	207515	131345	339117
CAL-66-V7_FINAL	257	80404	51151	131812
SC-45-V5	257	162230	102775	265262
CAL-93-TOTAL	257	169258	107209	276723
Cal-64	257	133080	84384	217720
01-ar-28	257	95357	60585	156199
CAT-19completo	257	212514	134499	347269
CAT-19-SE	257	82415	52420	135092

**15.6. Carga de Datos UDESS**



**Figura 56: ANEXO 15.6: Detalle de Carga UDESS con Precedencias para 6 Bancos**

## 15.7. Resultados Herramienta UDESS

Tabla 29: ANEXO 15.7: Resultados UDESS para Quinquenio

F2	13_01	13_02	13_03	13_04	13_05	13_06	13_07	13_08	13_09	13_10	13_11	13_12	14_01	14_02	14_03	14_04	14_05	14_06	14_07	14_08	14_09	14_10	14_11	14_12	2015	2016	2017	2018
Ley a Planta [%]	1.06	1.21	1.03	1.23	1.07	1.20	1.02	1.05	0.82	1.00	0.53	1.34	1.05	0.68	1.16	0.69	0.99	0.67	0.99	1.06	0.79							
Kton Planta	978	659	426	436	338	280	505	553	216	748	7	203	380	124	450	86	461	5	497	295	244							
Ley a Stock [%]	0.62	0.51	0.69	0.57	0.49	0.40	0.43	0.43	0.39	0.42	0.40	0.44	0.42	0.39	0.43	0.43	0.39	0.38	0.39	0.41	0.40							
Kton Stock	142	167	200	216	105	43	84	79	139	108	22	42	121	77	32	74	66	2	92	63	52							
Kton Estéril	1791	2030	2166	2215	2243	2548	2166	2131	2374	2513	2901	3129	2494	2654	1966	1470	955	849	406	564	559							

F3	13_01	13_02	13_03	13_04	13_05	13_06	13_07	13_08	13_09	13_10	13_11	13_12	14_01	14_02	14_03	14_04	14_05	14_06	14_07	14_08	14_09	14_10	14_11	14_12	2015	2016	2017	2018
Ley a Planta [%]	0.00	0.98	0.00	0.86	0.00	0.91	0.79	0.74	0.86	1.07	1.15	0.71	0.00	0.00	1.02	0.99	0.93	0.87	0.92	0.91	1.15	0.91	0.78	1.15	1.10	1.05	0.94	0.87
Kton Planta	0	17	0	77	0	129	56	153	149	113	293	2	0	0	339	228	273	173	174	42	384	24	113	226	4909	9382	7264	726
Ley a Stock [%]	0.00	0.43	0.00	0.45	0.62	0.49	0.68	0.40	0.40	0.42	0.48	0.00	0.00	0.00	0.41	0.39	0.39	0.41	0.45	0.37	0.41	0.45	0.39	0.40	0.50	0.48	0.49	0.41
Kton Stock	0	6	0	87	6	152	28	35	60	6	45	0	0	0	34	30	24	22	14	6	29	2	6	12	1113	1342	1261	269
Kton Estéril	2858	2814	2889	2630	2920	2619	3115	2362	2779	2874	2446	2744	3057	2717	2259	2607	2994	2714	2647	2791	2698	2995	2601	2841	28287	19231	14732	4062

F4	13_01	13_02	13_03	13_04	13_05	13_06	13_07	13_08	13_09	13_10	13_11	13_12	14_01	14_02	14_03	14_04	14_05	14_06	14_07	14_08	14_09	14_10	14_11	14_12	2015	2016	2017	2018	
Ley a Planta [%]	0	0	0	0	0	0	0	0	0													0			0	0	0.72	0.47	
Kton Planta	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	698	75
Ley a Stock [%]																												0.42	0.82
Kton Stock	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	105	4784	
Kton Estéril	29	309	359	343	315	375	378	348	150	236	246	209	501	328	406	1101	1089	1142	1517	1898	1856	967	0	0	37602	41126	40333	17236	

Tabla 30: ANEXO 15.7: Producción de Cobre Fino Quinquenio 2013-2017 con ganancia de VAN según UDESS

	2013	2014	2015	2016	2017	Total Quinquenio
Cu Fino UDESS [ton]	56711	54641	67955	65129	57904	302340
Cu Fino Budget [ton]	58617	52238	68113	67302	55257	301528

						VAN
MUS\$ UDESS	\$375	\$361	\$449	\$431	\$383	\$1,509
MUS\$ Budget	\$388	\$345	\$450	\$445	\$365	\$1,507

Diferencia [MUS\$]	\$1.94
--------------------	--------

## 15.8. Validación UDESS

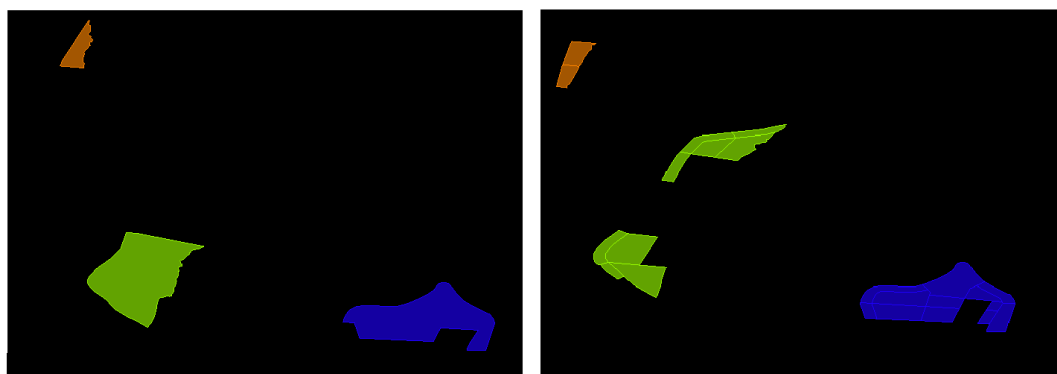


Figura 57: ANEXO 15.8: Área planificada Budget Agosto 2013 (izquierda) y Área planificada UDESS Agosto 2013 (derecha)

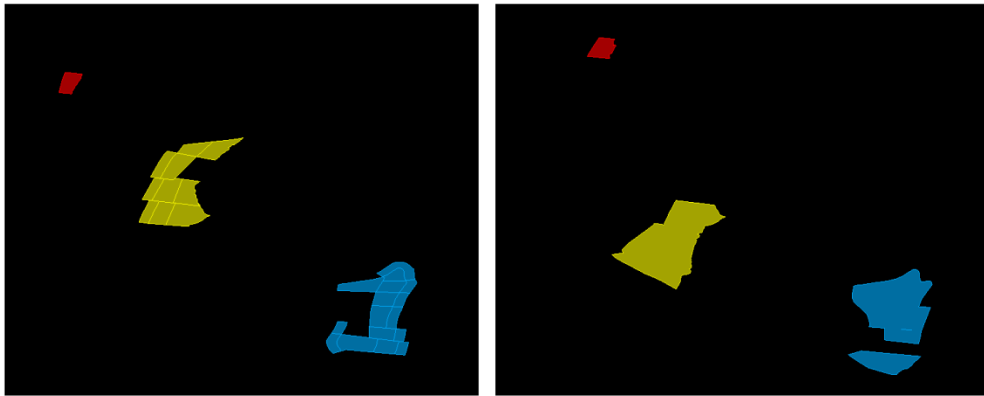


Figura 58: ANEXO 15.8: Área planificada Budget Diciembre 2013 (izquierda) y Área planificada UDESS Diciembre 2013 (derecha)

### 15.9. Resultados Interacción Rajo-Subterránea 2013

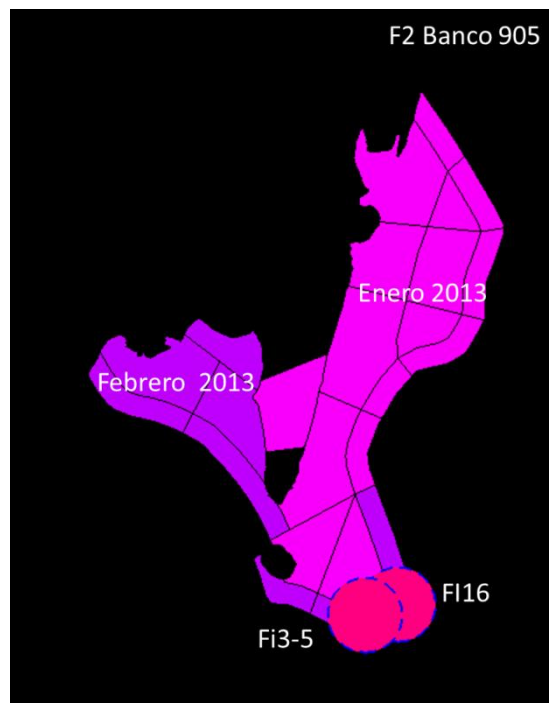


Figura 59: ANEXO 15.9: Trabajos de cavidades para banco 905

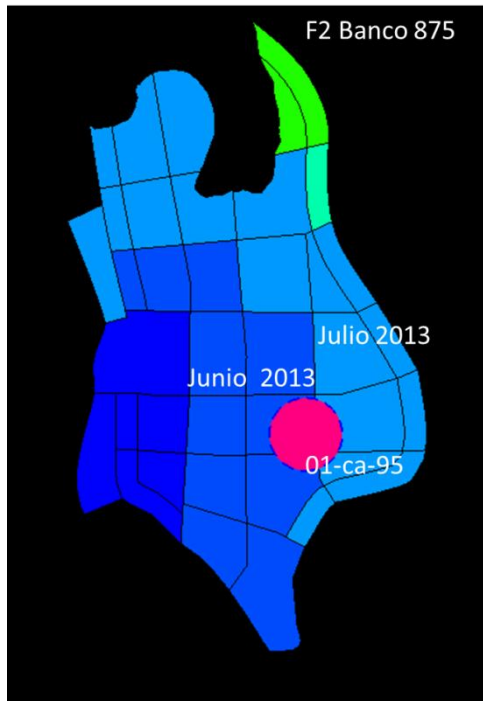


Figura 60: ANEXO 15.9: Trabajos de cavidades para banco 875

### 15.10. Resultado para año 2014

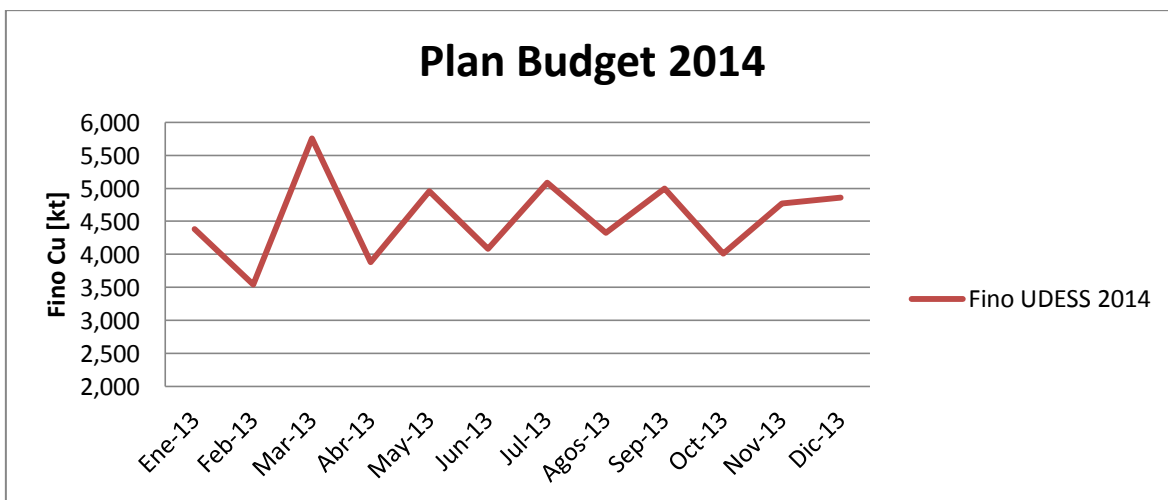


Figura 61: ANEXO 15.10: Producción de Fino de Plan UDESS para el año 2014