



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

**COMPARACIÓN ENTRE METODOLOGÍAS PARA LA ELABORACIÓN DE PLANES  
MINEROS ESTRATÉGICOS EN MINERÍA A CIELO ABIERTO**

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

**DIEGO IGNACIO BARRERA BARROS**

PROFESOR GUÍA:  
MANUEL REYES JARA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
MANUEL MANSILLA ORELLANA  
AGUSTÍN PANES AGUILA

SANTIAGO DE CHILE  
2016

## RESUMEN

La planificación minera estratégica de largo plazo tiene como objetivo sincronizar el mercado con los recursos disponibles y la misión de la compañía. La relevancia de esta etapa radica en que las decisiones aquí tomadas determinarán en gran parte el valor del proyecto minero.

Actualmente la forma convencional de resolver el problema de planificación minera estratégica de largo plazo es dividirlo en problemas más simples y manejables, para obtener así soluciones por separado. Esta metodología posee diversas falencias; por ejemplo, fraccionar el problema implica alejarse del óptimo global, asimismo *Lerchs-Grossmann* es un algoritmo estático que no considera capacidades, costos de oportunidad ni valor del dinero en el tiempo. Se suma a lo anterior que el posterior diseño de fases es un proceso manual poco guiado y que depende en gran medida de la experiencia del planificador.

El objetivo de este trabajo es realizar una comparación entre dos metodologías para la elaboración de planes mineros estratégicos a largo plazo en minería a cielo abierto. Estas corresponden a una metodología tradicional (a través de *Whittle*) y una integral (a través de *DeepMine*). Todo con motivo de encontrar herramientas de planificación que propicien la elaboración de planes mineros estratégicos con mayor captura de valor.

En primera instancia se exhibe un caso de estudio donde se comparan cualitativa y cuantitativamente los resultados de los planes mineros estratégicos obtenidos por ambas metodologías. En segunda instancia se presenta un caso aplicado, donde se realiza un plan estratégico con *DeepMine* para un yacimiento en operación y se compara con los resultados de los planes de Codelco (principalmente secuencia). Finalmente se realizan pruebas de funcionamiento y se concluye con una evaluación crítica del software en estudio.

Como resultado, *DeepMine* logra un 27% más de VAN en el caso de estudio comparado directamente con *Whittle* y un 11% más confrontado a las ingenierías de Codelco en el caso aplicado. En ambos casos se alcanza un mayor fino actualizado, con menos mineral extraído y en menos años. Asimismo, se obtienen fases o pseudofases que definen secuencias de extracción factibles que pueden ser usadas como guías en etapas posteriores de diseño. La comparación de las secuencias para el caso aplicado otorga diferencias sustanciales en los primeros 10 años del plan, lo que brinda una mayor captura de valor. A partir de las pruebas de funcionamiento se constata que *DeepMine* es capaz de tomar decisiones en función de escenarios económicos futuros incorporando el concepto de costo de oportunidad y de ser sensible a cambios en la vida de la mina.

Finalmente, se concluye que la metodología evaluada va en la dirección correcta, es decir, es coherente a lo que la industria requiere: apoyar la captura del máximo valor del depósito, alcanzable en la teoría solo con enfoques globales de optimización. Por lo tanto, y a partir de los resultados de este trabajo, se concluye que *DeepMine* puede contribuir favorablemente en el proceso de planificación estratégica, facilitando procesos de toma de decisiones, proporcionando secuencias de extracción de fases robustas para posteriores etapas de diseño y entregando soluciones más completas en base a enfoques globales de optimización, todo esto en comparación con herramientas que se basen en la metodología tradicional. Cabe destacar que su uso es propicio siempre que se use criteriosa y rigurosamente, entendiendo los alcances y limitaciones de este.

## ABSTRACT

Long-term strategic mine planning has as its aim to synchronize market with available resources and the company's mission. The relevance of this stage lies in the fact that decisions made here will determine to a great extent the value of the mining project.

Nowadays, the conventional way to solve the problem of long-term strategic mine planning is to separate it into simpler and easy-to-manage problems to, thus, have separate solutions. However, this methodology has various deficiencies; for example, dividing the problem entails moving away from the global optimum, besides Lerchs-Grossmann is a static algorithm that does not consider capabilities, opportunity costs, nor value of money over time. Furthermore, the subsequent phase design is a manual process that needs more guidance and that depends at a great scale on the experience of the planner.

The aim of this research is to compare two methodologies for the elaboration of long-term strategic mine plans in open pit mines. These are a traditional methodology (by using Whittle) and a comprehensive one (by using DeepMine). The objective is to find planning tools that favor the elaboration of strategic mine plans with greater value capture.

First of all, it is exhibited a case study where the results of strategic mine plans from both methodologies are qualitatively and quantitatively compared. Secondly, it is presented an applied case, where a strategic plan is carried out by using DeepMine in an operation deposit and is compared with the results of Codelco's plans (mainly sequence). Finally, functional tests are done to then end up with a critical review of the studied software.

As a result, DeepMine achieves a 27 per cent more of NPV in the case study in comparison with Whittle, and an 11 per cent more in comparison with Codelco's engineering in the applied case. In both cases, it is reached a bigger amount of updated fine, with less extracted mineral and in fewer years. Additionally, phases or pseudo-phases that define feasible extraction sequences that can be used as guides in later design stages are obtained. Comparison between sequences in the applied case study displays fundamental differences in the first ten years of the plan, which brings a greater value capture. From functional tests, it is demonstrated that DeepMine is able to make decisions based on future economic scenarios by incorporating the opportunity cost concept, and to be sensitive to changes in the life of the mine.

Finally, it is concluded that the evaluated methodology is in the right direction; that is, it is coherent to what industry requires: supporting the capture of the maximum value of the deposit, reachable by theory just with global optimization approaches. Therefore, and from the results of this work, it is concluded that DeepMine can favorably contribute in the strategic planning process, facilitating decision-making processes, providing extraction sequences of complete phases for later design stages, and offering much better solutions in terms of global optimization approaches, all of this in comparison with tools that are based on traditional methodology. It is important to highlight that its use is propitious as long as it is used sensibly and strictly, taking into account its capabilities and limitations.

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero agradecer a Codelco, en especial a Don Manuel Mansilla y Agustín Panes, quienes confiaron en mí y me dieron la oportunidad de contribuir con un grano de arena al país a través de esta memoria. Agradecer también a Manuel Reyes, profesor guía quien me apoyó desde un comienzo con la investigación y me acompañó durante toda la realización de esta.

Agradecer a la Universidad de Chile, en particular al departamento de Ingeniería de Minas de la FCFM, por todos los conocimientos, experiencias y herramientas entregados, además por ser el lugar donde se originaron distintas amistades, entre ellos las de Alan, Bonzi, Camila y Alfonso, con quienes compartí innumerables buenos momentos que hicieron grata y acogedora mi estancia en Santiago y en la Facultad.

Agradecer también, a mis amigos de Los Andes, quienes proporcionaron aquellas instancias de distracción y esparcimiento que sin duda fueron necesarias. A mis *roommates* del inolvidable departamento 92 donde sobrevivimos durante 6 largos años.

Agradecer a mis padres y hermanos quienes me apoyaron en todo momento. Agradecer a mi Claudia, por su amor y por su apoyo incondicional en mi etapa universitaria y en mi vida.

Finalmente, agradecer inmensamente a Dios por siempre estar presente.

## TABLA DE CONTENIDO

1 INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 Motivación del trabajo .....	2
1.2 Objetivos .....	3
1.2.1 Objetivo general.....	3
1.2.2 Objetivos específicos .....	3
1.3 Alcances .....	3
1.4 Metodología .....	4
1.5 Contenidos por capítulos .....	5
2 ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS.....	6
2.1 Planificación minera .....	6
2.1.1 Planificación minera estratégica de largo plazo.....	6
2.1.2 Planificación minera táctica de largo plazo .....	7
2.2 Definición del problema de planificación de largo plazo.....	7
2.3 Metodologías de resolución del problema de planificación a largo plazo.....	8
2.3.1 Metodología tradicional de planificación a largo plazo.....	8
2.3.2 Metodología integral .....	8
2.4 Investigación de operaciones en minería a cielo abierto.....	9
2.4.1 Determinación del pit final.....	9
2.4.2 Secuenciamiento de bloques.....	10
2.5 Herramientas de planificación estratégica .....	12
2.5.1 <i>Whittle</i> .....	12
2.5.2 <i>NPV Scheduler</i> .....	15
2.5.3 <i>DeepMine</i> .....	16
2.5.4 <i>Blazor</i> .....	19
2.5.5 <i>DOPPLER</i> .....	21
2.5.6 <i>SimSched</i> .....	22
3 CASO DE ESTUDIO MODELO 05.....	23
3.1 Características generales del yacimiento.....	23
3.1.1 Límites y dimensiones .....	23
3.1.2 Estadísticas básicas .....	24
3.1.3 Curva tonelaje versus ley.....	24
3.1.4 Modelo geológico.....	25
3.2 Desarrollo de planes mineros.....	27
3.2.1 Desarrollo de planes con la metodología <i>Whittle</i> .....	28

3.2.2	Desarrollo de planes con la metodología <i>DeepMine</i> .....	30
3.3	Resultados .....	31
3.3.1	Resultados <i>Whittle</i> .....	31
3.3.2	Resultados <i>DeepMine</i> .....	35
3.4	Comparación de resultados .....	39
3.4.1	Pits anidados .....	39
3.4.2	Planes mineros .....	40
3.4.3	Fases y secuencias .....	42
3.4.4	Tiempo de procesamiento .....	42
4	CASO APLICADO MODELO 07.....	44
4.1	Características generales del yacimiento.....	44
4.1.1	Límites y dimensiones .....	44
4.1.2	Estadísticas básicas .....	45
4.1.3	Curva tonelaje versus ley.....	45
4.1.4	Modelo geológico.....	46
4.2	Desarrollo plan minero <i>DeepMine</i> .....	48
4.2.1	Resultados plan minero .....	49
4.3	Comparación con plan Codelco 2015 .....	50
4.3.1	Planes mineros .....	50
4.3.2	Fases y secuencia .....	52
5	PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO SOFTWARE <i>DEEPMINE</i> .....	54
5.1	Alcances de los modos de resolución .....	55
5.2	Concepto de costo de oportunidad .....	57
5.3	Vida del proyecto .....	58
5.4	Oportunidades de mejoras.....	61
5.4.1	Fases .....	61
5.4.2	Ley mínima a planta.....	62
5.4.3	Estabilidad .....	62
6	CONCLUSIONES.....	64
7	BIBLIOGRAFÍA .....	66

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Esquema planificación minera tradicional.....	2
Ilustración 2. Proceso de planificación tradicional de largo plazo.....	8
Ilustración 3. Proceso de planificación integral de largo plazo.....	9
Ilustración 4. Ejemplo extracción <i>worst case</i> y <i>best case</i> .....	13
Ilustración 5. Esquema de solución de <i>DeepMine</i> .....	17
Ilustración 6. Árbol de generación de estados <i>DeepMine</i> .....	17
Ilustración 7. Proceso de optimización de software <i>Blazor</i> .....	19
Ilustración 8. Resultados obtenidos a través de DOPPLER con secuenciador BOS2M.....	21
Ilustración 9. Diagrama optimización <i>SimSched</i> .....	22
Ilustración 10. Vista 3D topografía del yacimiento (ley de cobre).....	25
Ilustración 11. Perfil N-S. Este 503,988 (ley de cobre).....	25
Ilustración 12. Perfil E-O. Norte 521,850 (ley de cobre).....	26
Ilustración 13. Vista en planta. Cota 1,615 (ley de cobre).....	26
Ilustración 14. Metodología <i>Whittle</i> .....	28
Ilustración 15. Metodología <i>DeepMine</i> .....	30
Ilustración 16. Fases y secuencia <i>Whittle</i> .....	33
Ilustración 17. Fases y secuencia <i>DeepMine</i> .....	37
Ilustración 18. Vistas en planta fases <i>Whittle – DeepMine</i> .....	42
Ilustración 19. Vista 3D topografía del yacimiento (ley de cobre).....	46
Ilustración 20. Perfil N-S. Este 24,055 (ley de cobre).....	46
Ilustración 21. Perfil E-O. Norte 26,266 (ley de cobre).....	47
Ilustración 22. Vista en planta. Cota 3,324 (ley de cobre).....	47
Ilustración 23. Secuencia de fases - Plan Codelco 2015.....	52
Ilustración 24. Secuencia de fases - Plan <i>DeepMine</i> .....	52
Ilustración 25. Gráficos de ejercicios variando la vida de la mina. Modo <i>Deep</i> .....	59
Ilustración 26. Fases infactibles y de ínfimo tonelaje.....	61
Ilustración 27. Vista pit final (Fase 11 y fase 10). Plan LOM 20 años.....	61
Ilustración 28. Ejemplo de falla en una corrida de planes.....	63

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Límites y dimensiones del modelo de bloques. ....	23
Tabla 2. Resumen cantidad de bloques del yacimiento. ....	23
Tabla 3. Estadística básica. ....	24
Tabla 4. Parámetros relevantes plan minero modelo 05. ....	27
Tabla 5. Resultados plan minero <i>Whittle</i> . ....	32
Tabla 6. Tiempo de procesamiento <i>Whittle</i> . ....	34
Tabla 7. Resultados plan minero <i>DeepMine</i> . ....	36
Tabla 8. Tiempos de procesamiento <i>DeepMine</i> . ....	38
Tabla 9. Diferencias pits anidados entre <i>Whittle</i> y <i>DeepMine</i> . ....	40
Tabla 10. Tabla comparativa planes <i>Whittle</i> y <i>DeepMine</i> . ....	41
Tabla 11. Comparación tiempos de procesamiento. ....	43
Tabla 12. Límites y dimensiones del modelo de bloques. ....	44
Tabla 13. Resumen cantidad de bloques del yacimiento. ....	44
Tabla 14. Estadística básica. ....	45
Tabla 15. Parámetros relevantes plan minero modelo 07. ....	48
Tabla 16. Resultados plan minero estratégico <i>DeepMine</i> . ....	49
Tabla 17. Comparación planes mineros. ....	50
Tabla 18. Tabla comparativa entre planes <i>Quick</i> , <i>Balanced</i> y <i>Deep mode</i> . ....	56
Tabla 19. Resumen fase 11, plan <i>Deep</i> 20 años. ....	61
Tabla 20. Ejercicio ley mínima a planta. ....	62
Tabla 21. Estadísticas de leyes por litología. ....	69
Tabla 22. Estadísticas de leyes por litología. ....	71
Tabla 23. Inputs sección “ <i>New block model</i> ”. ....	73
Tabla 24. Inputs sección “ <i>New slope set</i> ”. ....	73
Tabla 25. Inputs sección “ <i>Pit collections</i> ”. ....	73
Tabla 26. Inputs sección “ <i>Operational scenario</i> ”. ....	74
Tabla 27. Inputs sección “ <i>Pit by pit graph</i> ”. ....	74
Tabla 28. Inputs sección “ <i>New schedule graph</i> ”. ....	75
Tabla 29. Parámetros “ <i>Geo models</i> ”. ....	76
Tabla 30. Parámetros “ <i>Pit collections</i> ”. ....	76
Tabla 31. Parámetros “ <i>Mining environments</i> ”. ....	77
Tabla 32. Parámetros “ <i>Economic environments</i> ”. ....	77
Tabla 33. Parámetros “ <i>Mine plans</i> ”. ....	78
Tabla 34. Resultados pits anidados <i>Whittle</i> y <i>DeepMine</i> . ....	80
Tabla 35. Tabla datos VAN-Ritmo. ....	82
Tabla 36. Resumen fases – <i>Whittle</i> . ....	83
Tabla 37. Resumen fases – <i>DeepMine</i> . ....	83



## ÍNDICE GRÁFICOS

Gráfico 1. Ejemplo gráfico pit by pit ( <i>best case</i> y <i>worst case</i> ).....	13
Gráfico 2. Curva tonelaje versus ley para el cobre.....	24
Gráfico 3. Gráfico pit by pit <i>Whittle</i> .....	29
Gráfico 4. Resumen pits anidados – <i>Whittle</i> .....	31
Gráfico 5. Plan minero <i>Whittle</i> .....	32
Gráfico 6. Flujo de caja descontado <i>Whittle</i> (sin inversión).....	33
Gráfico 7. Resumen pit anidados – <i>DeepMine</i> .....	35
Gráfico 8. Plan minero <i>DeepMine</i> .....	36
Gráfico 9. Flujo de caja descontado <i>DeepMine</i> (sin inversión).....	37
Gráfico 10. Diferencias en tonelajes de los pits anidados.....	39
Gráfico 11. Diferencias en leyes y REM de los pits anidados.....	40
Gráfico 12. Comparación ley de cabeza por año (modelo 05).....	41
Gráfico 13. VAN Acumulado [MUS\$] (modelo 05).....	41
Gráfico 14. Curva tonelaje versus ley para el cobre.....	45
Gráfico 15. Movimiento total - Plan <i>DeepMine</i> .....	49
Gráfico 16. Comparación de mineral a planta.....	50
Gráfico 17. Comparación ley de cabeza por año (modelo 07).....	51
Gráfico 18. VAN Acumulado [MUS\$] (modelo 07).....	51
Gráfico 19. Movimiento mina – Modo <i>Quick</i> .....	55
Gráfico 20. Movimiento mina – Modo <i>Balanced</i> .....	55
Gráfico 21. Movimiento mina – Modo <i>Deep</i> .....	56
Gráfico 22. VAN y tiempo de procesamiento por modo de resolución.....	57
Gráfico 23. Planes costo de oportunidad.....	58
Gráfico 24. Van acumulado por año. Planes <i>Deep</i> 10,20 y 30 años.....	60
Gráfico 25. Histograma de frecuencia por litología.....	69
Gráfico 26. Ley promedio de Cobre por litología.....	70
Gráfico 27. Histograma de frecuencia por litología.....	71
Gráfico 28. Ley promedio de Cobre por litología.....	72
Gráfico 29. <i>Pit by pit graph</i> .....	75
Gráfico 30. Curva VAN-Ritmo – <i>Whittle</i> .....	81
Gráfico 31. Curva VAN-Ritmo – <i>DeepMine</i> .....	81
Gráfico 32. Agotamiento de mineral- <i>Whittle</i> .....	84
Gráfico 33. Agotamiento de mineral – <i>DeepMine</i> .....	84
Gráfico 34. Inversión mina.....	85
Gráfico 35. Inversión planta.....	85

# CAPÍTULO 1

---

## 1 INTRODUCCIÓN

Los proyectos mineros poseen características particulares que los distinguen de otras actividades. Entre estas características se destaca que: son intensivos en capital, tienen altos factores de riesgo, poseen largos periodos de pre inversión, se ubican en un lugar geográficamente estático y, finalmente, que están fuertemente condicionados a las circunstancias del mercado.

Uno de los procesos claves en el desarrollo de un proyecto minero es la planificación minera, disciplina encargada de transformar el recurso geológico en el mejor negocio productivo en función de los lineamientos de la empresa; estos lineamientos pueden ser, por ejemplo, maximizar el valor actual neto (VAN), el volumen total a extraer, el tiempo de explotación, entre otros. Además, es posible clasificar la planificación minera considerando el horizonte de evaluación y el detalle de los datos empleados (planificación de largo, mediano o corto plazo) o en función de las decisiones tomadas (planificación estratégica o táctica).

A partir de lo anterior, se reconoce la planificación minera estratégica de largo plazo, como aquella que tiene por objeto sincronizar el mercado con los recursos disponibles y la misión de la compañía. La relevancia de esta etapa radica en que las decisiones aquí tomadas determinarán en gran parte el valor del proyecto minero. Cabe destacar que estos planes no buscan ser operativos pero si operativizables.

El problema de planificación a largo plazo en minería a cielo abierto puede ser modelado matemáticamente como una serie de bloques que conforman un depósito donde hay que decidir para cada periodo qué bloque extraer y dónde se enviará (planta, stock o botadero). Se ha demostrado que resolver este problema tiene complejidad *NP-Hard*, esto significa que no existe un procedimiento conocido que pueda brindar una solución al problema en tiempo polinómico. En términos concretos, esto implica que una solución óptima no se puede encontrar en la práctica dada la gran magnitud del problema. Esta estructura sugiere el desarrollo de soluciones aproximadas en base a heurísticas, capaces de alcanzar buenos resultados dentro de la complejidad del problema original con tiempos de cómputos razonables.

Actualmente la forma convencional de resolver el problema de planificación es dividirlo en problemas más simples y manejables obteniendo soluciones por separado. El primer paso es usar el algoritmo definido como *Lerchs - Grossman* (L&G) para determinar el límite final del pit y para generar una serie de fases o *pushbacks* (conjuntos de pits anidados). Posteriormente, estas series de fases son utilizadas para el diseño, obteniendo, finalmente, el plan minero con herramientas de optimización de estrategia de consumo de reservas (leyes de corte).

## 1.1 Motivación del trabajo

La metodología tradicional es empleada ampliamente en la industria minera y divide el problema general de planificación de largo plazo en subproblemas más sencillos de resolver obteniendo una metodología de resolución secuencial. Ver Ilustración 1.

Si bien, posee la ventaja de que al fraccionar el problema general en subproblemas estos se vuelven más sencillos de resolver, posee la gran desventaja que la unión de las soluciones está lejos de representar el óptimo global del proceso de planificación. Asimismo, el problema se comienza a resolver solo en función del espacio sin considerar temporalidad ni costos de oportunidad (problemas al usar el algoritmo de *Lerchs-Grossman*). Se suma además que el diseño de fases es un proceso manual poco guiado y que depende en gran medida de la experiencia del planificador

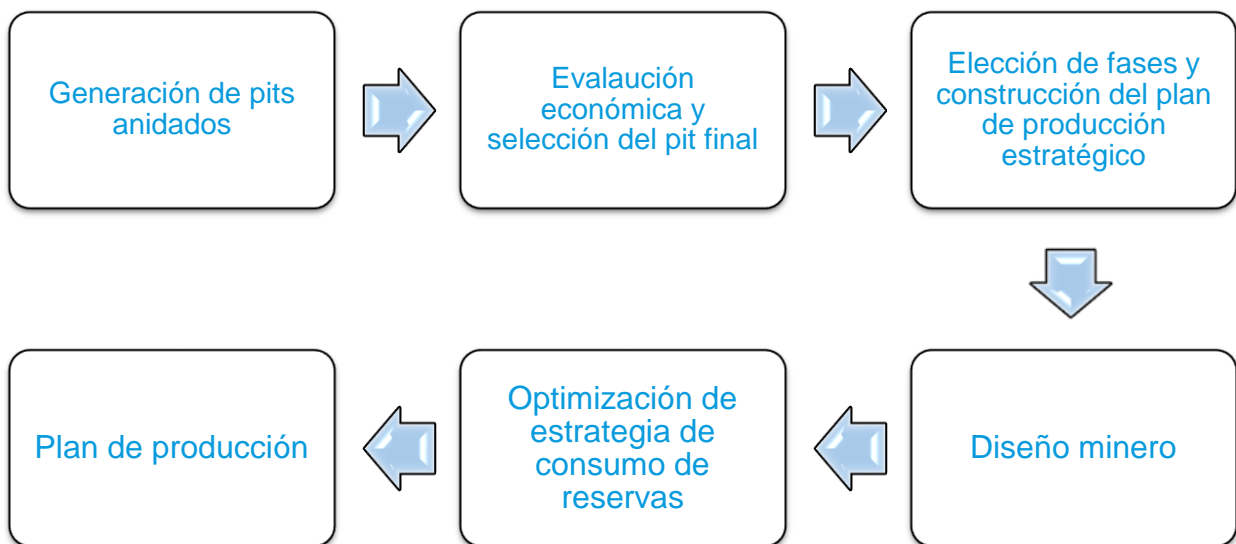


Ilustración 1. Esquema planificación minera tradicional.

Esta problemática motiva la presente memoria de título realizada en la Gerencia de Recursos Mineros de Casa Matriz de Codelco, enmarcada en la búsqueda de nuevas metodologías y herramientas de planificación que aseguren la calidad de los planes mineros estratégicos, con enfoques integradores y que capturen de mejor forma el valor del yacimiento.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo general

Realizar una comparación entre metodologías para la elaboración de planes mineros estratégicos de largo plazo en minería a cielo abierto.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Desarrollar planes mineros estratégicos a través de la metodología tradicional mediante software *Whittle*.
- Desarrollar planes mineros estratégicos a través de una metodología integral mediante software *DeepMine*.
- Comparar cualitativa y cuantitativamente planes mineros obtenidos a partir de ambas metodologías.
- Comparar cualitativa y cuantitativamente planes realizados a *DeepMine* con planes realizados por Codelco.
- Evaluar el potencial del software minero *DeepMine*.

## 1.3 Alcances

El trabajo que se presenta a continuación posee los siguientes alcances:

- Los planes se realizan sobre yacimientos de cobre de baja y mediana ley.
- Los planes se realizan a través de las herramientas de planificación *Whittle* y *DeepMine*
- Se limita a una evaluación estratégica de largo plazo y no contempla el diseño de rampas de acceso ni cálculo de equipos.
- Las comparaciones se realizan sobre variables cuantitativas y cualitativas.
- Los planes se procesan en un equipo *desktop* con *Windows 7*, procesador *Intel Core i5* con 16 Gb de memoria ram.
- Todo resultado y conclusión que se desprende de este trabajo están acotados a los escenarios definidos por los alcances anteriores.

## 1.4 Metodología

La metodología a implementar es la siguiente:

- Revisión de metodologías empleadas para resolver el problema de planificación minera a cielo abierto.
- Revisión de algoritmos de optimización determinística usados en planificación minera.
- Revisión conceptual de herramientas de planificación minera.
- Familiarización con el software estratégico *DeepMine*.
- Análisis estadístico de datos de los modelos de bloques.
- Preparación de los modelos de bloques.
- Desarrollo de planes mineros con software *Whittle*.
- Desarrollo de planes mineros con software *DeepMine*.
- Comparación cualitativa y cuantitativa de los resultados obtenidos por las diferentes metodologías.
- Comparación cualitativa y cuantitativa de los planes obtenidos en *DeepMine* versus planes realizados por Codelco.
- Realización de pruebas de funcionamiento del software *DeepMine*.
- Evaluación del potencial del software de planificación estratégica *DeepMine*.

## 1.5 Contenidos por capítulos

Los contenidos de este trabajo se discuten en los siguientes capítulos:

Capítulo 1: Corresponde a la introducción del trabajo, donde se exponen los objetivos, alcances y la metodología de investigación.

Capítulo 2: Describe los antecedentes del trabajo, la definición del problema de planificación, las metodologías de resolución y las herramientas computacionales disponibles en la industria minera.

Capítulo 3: Se presenta un caso de estudio donde se realizan planes mineros estratégicos con las metodologías propuestas por las herramientas *Whittle* y *DeepMine*. Se comparan los resultados obtenidos

Capítulo 4: Se presenta un caso aplicado, donde se realiza un plan minero estratégico con la metodología del software *DeepMine* sobre una mina en operación, comparando los resultados, en particular la secuencia obtenida.

Capítulo 5: Se presentan una serie de ejercicios realizados al software *DeepMine* en busca de falencias y oportunidades de mejora.

Capítulo 6: Se presentan las conclusiones generales, recomendaciones y trabajo futuro propuesto.

# CAPÍTULO 2

---

## 2 ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS

### 2.1 Planificación minera

La planificación minera es la disciplina encargada de transformar el recurso mineral en el mejor negocio productivo en función de los lineamientos de la empresa <sup>[28]</sup>, estos lineamientos pueden ser maximizar el valor actual neto (VAN), el volumen total a extraer, el tiempo de explotación, entre otros.

En función del horizonte de evaluación considerado y el detalle de los datos empleados es posible descomponer la planificación minera en largo, mediano y corto plazo <sup>[31]</sup>. El tiempo está relacionado con los grados de libertad que posee la operación: para el corto plazo muchas variables se encuentran previamente definidas y, por lo tanto, la planificación es más restrictiva, mientras que en la planificación a largo plazo la gran mayoría de las variables de decisión se encuentran abiertas, esto permite incorporar explícitamente el estudio de las distintas estrategias de desarrollo. En la planificación minera de corto plazo se acostumbra a trabajar en periodos de un año o menos (mensuales y semanales), por su parte, la planificación a largo plazo considera años y quinquenios.

Tomando en cuenta la planificación minera a largo plazo, los planes se pueden caracterizar a su vez como estratégicos o tácticos <sup>[13]</sup>.

#### 2.1.1 Planificación minera estratégica de largo plazo

La planificación minera estratégica de largo plazo tiene como objetivo sincronizar el mercado con los recursos disponibles y la misión de la compañía. La relevancia de esta etapa radica en que las decisiones aquí tomadas determinarán en gran parte el valor del proyecto minero. Cabe destacar que estos planes no buscan ser operativos pero si operativizables, esto quiere decir que deben permitir operatividad en etapas posteriores de ingeniería.

Dentro de las variables que se busca definir se encuentran:

- Método de explotación.
- Tamaño de la operación.
- Procesos metalúrgicos.
- Macrosecuencias mineras.

Usualmente las opciones de desarrollo que requieren análisis estratégicos son, por ejemplo, nuevos proyectos (*Greenfield*) y proyectos de expansión de operaciones existentes (*Brownfield*).

### 2.1.2 Planificación minera táctica de largo plazo

La planificación minera táctica de largo plazo busca principalmente maximizar el VAN esperado del negocio sujeto a restricciones y consideraciones estratégicas, adicionalmente deben garantizar operatividad técnica, definir la ruta de desarrollo de la operación y constituir el compromiso de la operación hacia el largo plazo. Los planes mineros tácticos de largo plazo constituyen la base de la planificación de corto y mediano plazo, por lo tanto, un plan de largo plazo con características tácticas es aquel que abarca las actividades de planificación requeridas para el funcionamiento de la operación minera con un nivel de detalle relativamente alto.

### 2.2 Definición del problema de planificación de largo plazo

El problema de planificación minera estratégica de largo plazo en operaciones a cielo abierto es conocido en inglés como *Open Pit Mining Scheduling Problem (OPMSP)*. Este problema se caracteriza por tomar como *input* un modelo de bloques geológico, condiciones de mercado y restricciones operacionales, para entregar finalmente como *output* un plan minero.

Se quiere responder las siguientes preguntas:

- ¿Qué bloques extraer?
- ¿Cuándo extraer?
- ¿Dónde enviar los bloques extraídos?

La respuesta a las preguntas anteriores debe considerar restricciones de precedencia y capacidad. La restricción de precedencia es aquella en la cual un bloque no puede ser extraído antes que un conjunto de bloques precedentes, dado por su posición relativa dentro del modelo de bloques y a los ángulos de talud aceptados producto de las condiciones geotécnicas. Por su parte, las restricciones de capacidad son aquellas que limitan la cantidad de bloques que pueden ser extraídos y la cantidad de bloques que pueden ser procesados en un periodo específico.

Gleixner (2008) <sup>[12]</sup> demostró que resolver este problema como optimización combinatorial tiene complejidad *NP-Hard*, esto significa que no existe un procedimiento conocido que pueda generar una solución al problema en tiempo polinómico. En términos concretos esto significa que una solución óptima no se puede encontrar en la práctica dada la gran magnitud del problema. Esta estructura sugiere el desarrollo de soluciones aproximadas en base a heurísticas, capaces de alcanzar buenos resultados dentro de la complejidad del problema original con tiempos de computación razonables <sup>[27]</sup>.



## 2.3 Metodologías de resolución del problema de planificación a largo plazo

En la práctica, para solucionar el problema de la planificación a largo plazo se han creado diferentes metodologías que pueden agruparse en dos grupos: la metodología tradicional y la integral.

### 2.3.1 Metodología tradicional de planificación a largo plazo

Esta metodología es empleada ampliamente en la industria minera y divide el problema general de planificación de largo plazo en subproblemas más sencillos de resolver obteniendo una metodología de resolución secuencial <sup>[32]</sup>. Ver

Ilustración 2.

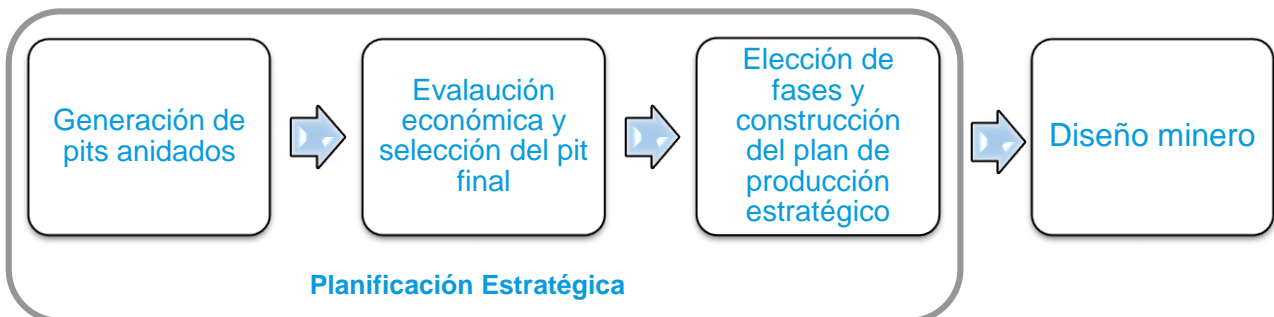


Ilustración 2. Proceso de planificación tradicional de largo plazo.

La mayor ventaja es que al fraccionar el problema general en subproblemas estos se vuelven más sencillos de resolver, pero posee la desventaja que la unión de las soluciones está lejos de representar el óptimo global del proceso de planificación, dado que el problema se comienza a resolver solo en función del espacio sin considerar temporalidad ni costos de oportunidad (problemas al usar el algoritmo de *Lerchs-Grossman*). Se suma además que el diseño de fases es un proceso manual poco guiado y que depende en gran medida de la experiencia del planificador.

Esta metodología tradicional de planificación a largo plazo resuelve por separado el problema del pit final y el programa de producción.

### 2.3.2 Metodología integral

Esta metodología busca resolver el problema de la planificación de largo plazo mediante una sola optimización. Intenta determinar simultáneamente el límite del pit final y el secuenciamiento de bloques. Ver Ilustración 3.



Ilustración 3. Proceso de planificación integral de largo plazo.

La principal ventaja de esta metodología es que proporciona soluciones más completas en comparación a la metodología tradicional ya que considera que el problema es en todo momento espacio-temporal. La principal desventaja es que usualmente las soluciones corresponden a resultados matemáticos, los que carecen de consideraciones operativas, convirtiéndose en soluciones con poca utilidad en la industria minera.

## 2.4 Investigación de operaciones en minería a cielo abierto

Numerosos autores brindan diversas técnicas para resolver el problema de planificación minera o parte de él, estas técnicas se dividen principalmente en la determinación del pit final y el secuenciamiento de bloques, detallados a continuación, estos modelos matemáticos son útiles para orientar procesos de toma de decisiones:

### 2.4.1 Determinación del pit final

El problema corresponde a encontrar el subconjunto de un modelo de bloques que maximice el valor total y está sujeta solo a restricciones de precedencia. En este problema no hay restricciones de capacidad, ni de temporalidad.

#### 2.4.1.1 Algoritmo de Lerchs - Grossmann (1965)

Es el algoritmo más conocido y empleado por las herramientas actuales para resolver el problema del pit final (UPL). Su función objetivo maximiza el beneficio total de un pit basado en el beneficio neto de cada bloque y su ubicación física en la mina.

El algoritmo en 3D se fundamenta en la teoría de grafos, considerando cada bloque como un nodo. Por su parte, las conexiones entre estos últimos son las relaciones de precedencia establecida por los ángulos máximos de talud. Este método garantiza encontrar el óptimo en tres dimensiones, sin importar cual sean las proporciones de los bloques <sup>[21]</sup>.

#### 2.4.1.2 Cono móvil (1965)

El cono móvil es un procedimiento que evalúa la conveniencia de extraer un bloque y su respectiva sobrecarga. Para esto, el algoritmo se posiciona sobre cada bloque de valor económico positivo del modelo de bloques y forma un cono invertido. La superficie lateral

del cono representa el ángulo de talud de la explotación, por lo tanto, si el beneficio neto del cono es mayor o igual que un beneficio deseado dicho cono se extrae, de lo contrario se deja en su lugar <sup>[25]</sup>.

Las desventajas de este método es que la solución obtenida dependerá en gran medida de la forma en cómo se comenzó el algoritmo y, además, el traslape de volúmenes es complejo de controlar.

#### **2.4.1.3 Algoritmo de Korobov (1974)**

El algoritmo de Korobov forma un cono invertido en cada bloque que posea valor económico positivo de la misma manera que el método anterior, no obstante permite incluir evaluaciones de sobrecarga compartida (bloques individualmente no pagan su extracción pero si conjuntamente). Este algoritmo es simple pero no considera criterios de optimalidad estricta, puesto que el resultado también depende de la dirección de la aplicación del método <sup>[17]</sup>.

#### **2.4.1.4 Cono móvil optimizante (1979)**

El cono móvil optimizante es una versión mejorada del tradicional procedimiento del cono móvil. Se detectaron una serie de deficiencias y mermas económicas producidas por el método convencional. Las deficiencias solucionadas fueron: secuencia de extracción (incluyendo el concepto de cono negativo devolviendo bloques al rajo con su respectiva sobrecarga y analizar así la conveniencia de extraerlos o no) y la sobrecarga compartida <sup>[20]</sup>.

### **2.4.2 Secuenciamiento de bloques**

El secuenciamiento de bloques tiene por finalidad integrar el factor tiempo en la resolución del problema de planificación, incluyendo así tasas de descuento y restricciones de capacidades mina y planta, reflejando con mayor exactitud el valor de un bloque en función de su extracción.

El primer intento para abordar este problema corresponde a Johnson (1969) <sup>[14]</sup>, quien utiliza programación entera mixta, definiendo variables que describen la cantidad y tipo mineral minado por bloque, así como también el destino y el periodo de extracción. Considera además una serie de restricciones de capacidad, mezcla y precedencia. Este problema resulta ser enorme debido a la cantidad de variables involucradas y a los periodos de tiempo involucrados, por lo que algoritmos como este a lo largo de la historia no habían podido ser implementados debido a la capacidad computacional de la época.

Gaupp (2008) <sup>[10]</sup>, por su parte, recopila una gran cantidad de algoritmos que han sido desarrollados para abordar el problema del secuenciamiento con herramientas que asumen el pit final como restricción inicial y otros que presentan un enfoque integral.

Gershon (1987) <sup>[11]</sup> desarrolla un secuenciamiento heurístico basado en el peso posicional de los bloques para determinar cuándo un bloque debe ser extraído. El peso

posicional de un bloque define el atractivo de remover el bloque en un punto específico en el tiempo, ponderando la calidad del bloque, posición, calidad de mineral detrás del bloque y factores de descuento.

Asimismo, Dowd y Onur (1992) <sup>[7]</sup> proporcionan una solución al problema de la secuencia de extracción de bloques mediante programación dinámica. Cabe destacar que este método sufre un crecimiento exponencial del tiempo de proceso a medida que el número de bloques aumenta. Los autores señalan además que muchas de las secuencias de extracción de bloques pueden ser eliminadas por ser no factibles, reduciendo con esto el espacio de búsqueda.

A su vez, Cacceta y Hill (2003) <sup>[3]</sup> desarrollan un modelo basado en programación entera mixta y una estrategia de *Branch-and-Cut*, obteniendo soluciones para el problema. Los autores usan su propia caracterización del problema para elegir qué variable fijar y de qué manera cruzar el espacio completo de soluciones.

Cai (2001) <sup>[4]</sup>, por otro lado, para resolver el secuenciamiento de bloques, utiliza relajación lagrangeana, incorporando las restricciones a través de multiplicadores. Cai señala, sin embargo, que aplicando multiplicadores de Lagrange no se logra una convergencia aceptable de la función objetivo para todas las instancias del problema.

Es importante limitar el alcance de estos modelos, los que abarcan sólo la operación de secuenciamiento de bloques. Algunos autores señalan que, entre los desafíos interesantes no abordados en estos modelos, se encuentra el desarrollar un modelo de secuenciamiento de larga escala que tome en cuenta un diseño óptimo de fases, ubicación de caminos, imposición en el tamaño del fondo del pit, restricciones sobre las áreas activas, entre otros <sup>[1]</sup>.

## 2.5 Herramientas de planificación estratégica

La industria del software minero ha creado diversas alternativas para apoyar los procesos de planificación. Existen herramientas que intentan cubrir el proceso completo y otras que se enfocan en partes del proceso general.

A continuación se presenta una revisión de algunas de las herramientas usadas en planificación de minas de cielo abierto a largo plazo, que permiten resolver el problema del pit final y proporcionar una serie de fases que dan origen a un plan de producción estratégico. Se exponen sus respectivas consideraciones, alcances y las bases de su funcionamiento.

### 2.5.1 *Whittle*

*Whittle* es un software que en la actualidad es propiedad *Dassault Systemes* a través de la marca de *Geovia*. Esta herramienta, a partir de un modelo de bloques, entrega una solución al problema de la planificación minera estratégica de largo plazo. *Whittle* utiliza la metodología tradicional, basando su funcionamiento en el algoritmo de *Lerchs-Grossman* para definir la envolvente económica y crear una serie de pits anidados que darán origen a las fases y al consiguiente plan minero.

Este proceso consta de las siguientes etapas:

- Creación de pits anidados.
- Valorización económica y elección del pit final.
- Elección de fases y obtención del plan de producción.

#### 2.5.1.1 Creación de pits anidados

Para la creación de pits anidados se emplea el algoritmo de *Lerchs-Grossman*, produciendo diferentes escenarios de pit final en función de un ponderador de precios denominado *Revenue Factor* (RF). Esta metodología se denomina “Parametrización”.

#### 2.5.1.2 Valorización económica del pit final

Luego de producidos los pits anidados, es necesario una evaluación económica preliminar que determine la envolvente que definirá el pit final. Dado que no se puede realizar un plan minero a priori, *Whittle* ocupa dos escenarios denominados *worst case* y *best case*, los que corresponden a planes mineros realizando una explotación banco a banco y *pit* por *pit* respectivamente. Ver Ilustración 4.

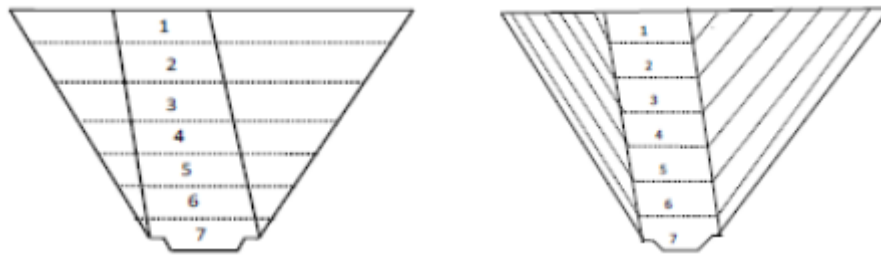


Ilustración 4. Ejemplo extracción *worst case* y *best case*.

De esta forma resultan dos escenarios extremos (Gráfico 1) con un resumen de tonelajes. Variando el ritmo de producción se puede conseguir el ritmo óptimo que maximice el VAN. La elección del pit final queda a criterio del planificador, sin embargo, habitualmente se ubica en la parte de la curva en que se tiene un mayor *worst* y *best case*, de manera de trabajar en un rango de menor variabilidad de VAN.

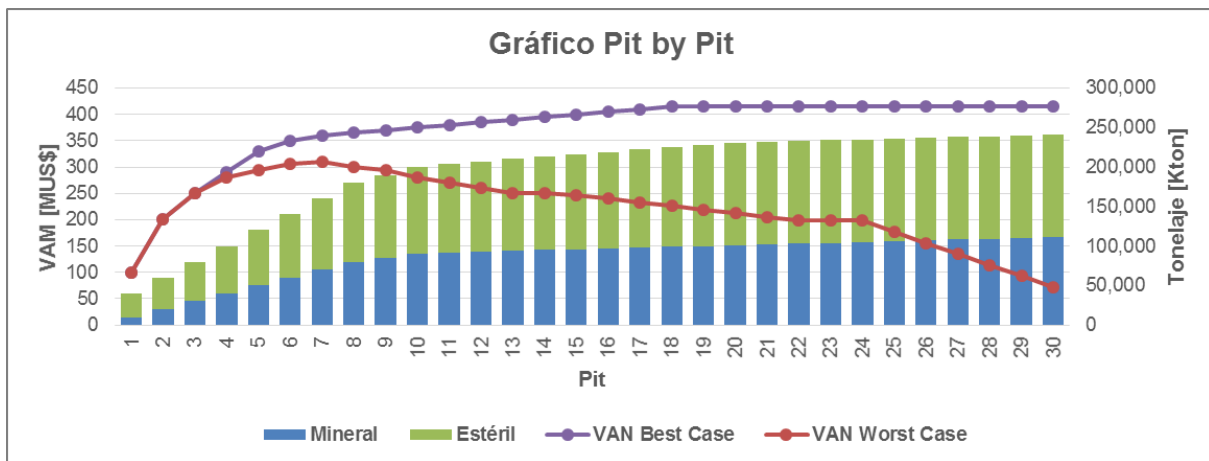


Gráfico 1. Ejemplo gráfico pit by pit (*best case* y *worst case*).

### 2.5.1.3 Elección de fases y Plan de producción

Las fases en *Whittle* se definen como un conjunto de pits anidados dentro del pit final. En este proceso, las fases y el plan minero están fuertemente enlazados, pues el resultado del plan dependerá de las fases que se elijan.

Para el secuenciamiento de fases es utilizado el algoritmo denominado *Milawa* el que ofrece dos opciones: *Milawa NPV* (que maximiza el VAN) y *Milawa Balanced* (que persigue el cumplimiento de alguna de las siguientes restricciones: capacidad planta, capacidad mina o capacidad de venta). Además dentro de este modelo existe la elección manual de fases, que conlleva un ejercicio de prueba y error o la elección semiautomática.

*Milawa NPV* es un algoritmo de programación cuya función objetivo es la maximización del VAN sujeto al secuenciamiento de bancos en fase/periodo, es decir, escoger en que momento (periodo) se extraen los bancos pertenecientes a una fase. *Milawa* intenta calcular el óptimo para el banco completo, optimizando en base a paneles de banco, no

por bloque. Cabe destacar que no existe una estrategia de ley de corte o una optimización de la utilización de *stockpiles*.

*Milawa* se basa principalmente en tres rutinas. La primera rutina toma un set de variables y crea una secuencia factible (el número de variables dependerá de los bancos en el pit final, fases y tiempo de vida). La segunda rutina evalúa el VAN o el balance de la secuencia individual. Finalmente, la tercera busca un dominio de secuencias factibles para una solución tal que su VAN sea mayor. *Milawa* no evalúa todas las soluciones factibles, sino que muestrea dentro del dominio de factibilidad hasta converger a la solución <sup>[32]</sup>.

Para controlar el avance entre fases *Milawa* se apoya en los siguientes parámetros:

- *Min Lead*: Número mínimo de bancos que deben extraerse de una fase para que pueda comenzar otra fase
- *Max Lead*: Número máximo de bancos que deben extraerse de una fase para que pueda comenzar otra fase.
- *Max Bench*: Número máximo de bancos que pueden extraerse de una fase por periodo.

### 2.5.2 NPV Scheduler

*NPV Scheduler* fue desarrollado por la empresa *DataMine*. Esta herramienta permite elaborar un plan de producción de largo plazo a partir de un modelo de bloques. El proceso consta de las siguientes etapas:

- **Pit final y creación de pits anidados**

Esta herramienta emplea el algoritmo de L&G para la cálculo de la envolvente económica generando una serie de pits anidados que son utilizados como guía para la elección de fases.

- **Creación de la secuencia de extracción óptima del pit final (OES)**

Los pit anidados obtenidos por L&G son usados para determinar el *Ultimate pit optimal extracción secuencia* (OES). Se le asigna un valor a cada bloque del banco denominado “valor de proximidad”, este define la posición en la secuencia de extracción. Realizando este procedimiento es posible obtener grupos de bloques contiguos. Este proceso se repite para cada banco en cada pit hasta que se agote el pit final.

- **Elección de fases**

La herramienta crea diferentes *pushbacks* mediante técnicas de ensayo y error apoyándose de la reclasificación del OES, se garantizan fases prácticas, con bloques que poseen conexión espacial entre ellos, se asegura una accesibilidad a la misma y existe un control en el tamaño y límite práctico entre fases (a diferencia de las fases creadas mediante pits anidados).

- **Plan de Producción**

Los planes mineros en *NPV Scheduler* se desarrollan a través de un modelo de programación dinámica que tiene como objetivo realizar un ordenamiento bajo ciertas restricciones.



### 2.5.3 *DeepMine*

*DeepMine* es un software desarrollado por *BoaMine* filial de la empresa Gestión y Economía Minera Ltda. (GEM). Esta herramienta, a partir de un modelo de bloques, capacidades mina y planta, restricciones de mezcla, pits anidados y parámetros económicos, entrega un plan minero y una serie de pseudofases<sup>1</sup> que pueden ser empleados como guía para etapas posteriores de diseño [15].

Emplea una metodología integral de resolución del problema de planificación, donde se obtiene simultáneamente el pit final y un plan minero estratégico.

#### Formulación matemática

La metodología se fundamenta bajo programación dinámica y la estrategia de *Branch and Bound* explorando espacios de soluciones en estados discretos. El algoritmo se argumenta en el principio de optimalidad de Bellman quien señala que “*si existe una solución óptima para pasar de un estado inicial a un estado final, entonces cualquier subtrayecto de estados también es óptima*” [2].

Para asignar el destino de los bloques dentro de cada estado discreto (correspondiente a un periodo fijo) se utilizan formulaciones de programación lineal entera, similar al comúnmente llamado *knapsack* o “problema de la mochila”.

Una descripción cualitativa para explicar los conceptos básicos del algoritmo se muestra a continuación [8].

#### Generación de estados

El algoritmo genera diferentes estados al seleccionar distintas zonas de trabajo. El espacio de zonas de trabajo comprende múltiples combinaciones posibles, la que es considerablemente pequeña en comparación con la solución bloque a bloque. Una vez que se ha decidido por un estado específico, los bloques dentro del estado son evaluados y se les asigna un destino en función del valor económico de la alternativa (Ilustración 5). La forma para reducir el espacio de soluciones, es aprovechar los resultados del algoritmo de *pseudoflow*<sup>2</sup> (muy similar a L&G) para guiar la explotación, considerando que solo los bloques dentro del pit final son extraíbles. Los pits anidados también funcionan como límites temporales orientando la solución.

---

<sup>1</sup> Se denomina pseudofase a sólido formado por un grupo de bloques. El software lo entrega como output y sirve como secuencia de extracción para el mismo.

<sup>2</sup> Algoritmo expuesto por Hochbaum en 2001. Utiliza un certificado de optimalidad inspirado por L&G y fue creado para encontrar la solución óptima (contorno) para el problema de minería a cielo abierto.

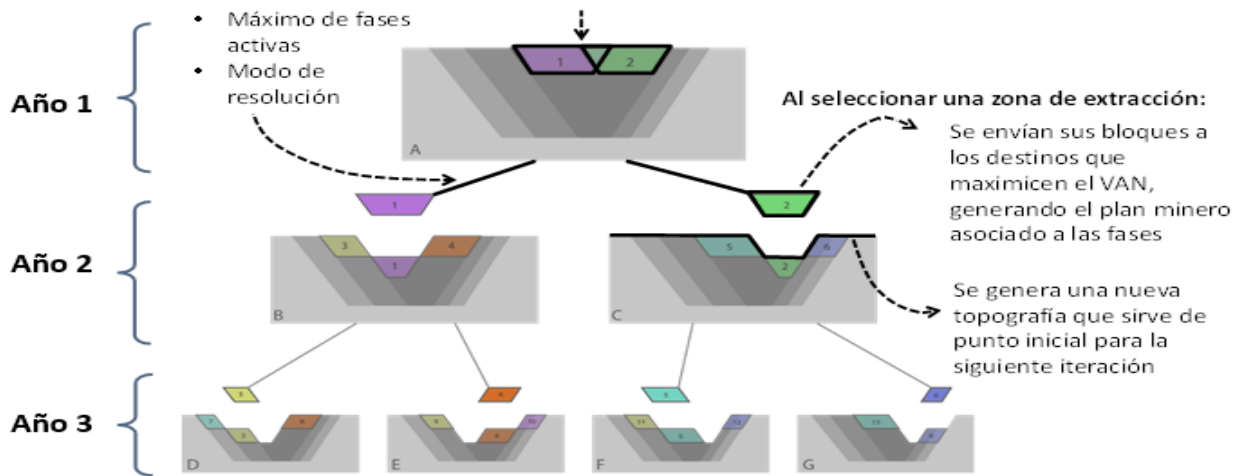


Ilustración 5. Esquema de solución de *DeepMine*.

## Poda

La naturaleza exponencial de la expansión de estados hace que sea necesario podar el árbol de exploración antes de evaluar todos los periodos, por lo tanto, los estados son clasificados en base heurísticas de evaluación rápida donde los mejores estados son seleccionados, suprimiendo los peores. Este procedimiento garantiza un uso razonable de tiempo y recursos computacionales.

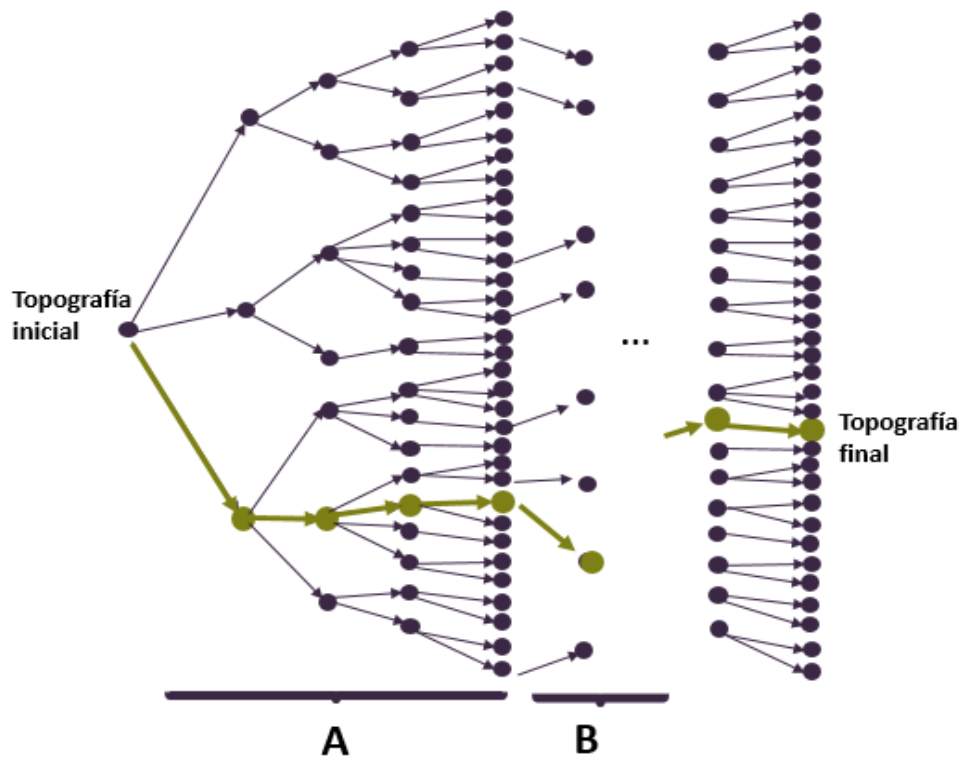


Ilustración 6. Árbol de generación de estados *DeepMine*.

En la Ilustración 6 se observa el árbol de generación de estado. Desde el estado inicial (topografía original) se desarrollan varios estados posibles dentro de los ciclos de expansión (A). Después de un número dado de períodos (cuatro en este ejemplo), sólo los mejores estados se expanden al siguiente ciclo (B). Al final del último ciclo, el mejor estado determinará el plan de la mina elegido (camino trazado).

### **Zonas de trabajo**

El grupo de bloques extraídos por periodo intenta formar una unión cohesiva que se asemeje a una explotación por fases, facilitando una posterior operativización de estas. Cada grupo de zonas de trabajo define un estado en un periodo determinado.

Las formas en que el usuario puede controlar las zonas de trabajo son; bajo el número máximo de zonas por periodo que representan el número máximo de fases activas por año (dado por las palas o excavadoras disponibles), bajo la altura máxima de zonas que representa el límite de bancos que la operación puede avanzar en cada periodo y finalmente, bajo el largo y ancho máximo de zonas de trabajo por periodo.

### 2.5.4 Blazor

El software *Blazor* fue creado por la empresa *BHB Billiton* para diseñar y optimizar el plan de producción de largo y mediano plazo para minas a cielo abierto mediante programación lineal entera mixta (similar a lo propuesto por Cacceta y Hill (2003) <sup>[3]</sup>). *Blazor* se fundamenta a través de una secuencia óptima de extracción para encontrar y diseñar el pit final y las fases mineras, no al revés como se realiza tradicionalmente <sup>[30]</sup>.

El proceso de optimización de *Blazor* pasa por las siguientes etapas:

- Cálculo de los límites del pit final.
- Agregación de bloques en *clusters*.
- Cálculo de la secuencia óptima de extracción de *clusters*.
- Definición de fases mineras.
- Cálculo y valorización de la secuencia de extracción óptima.
- Asignación de bloques individuales a destino.

El proceso de optimización se expone en la Ilustración 7.

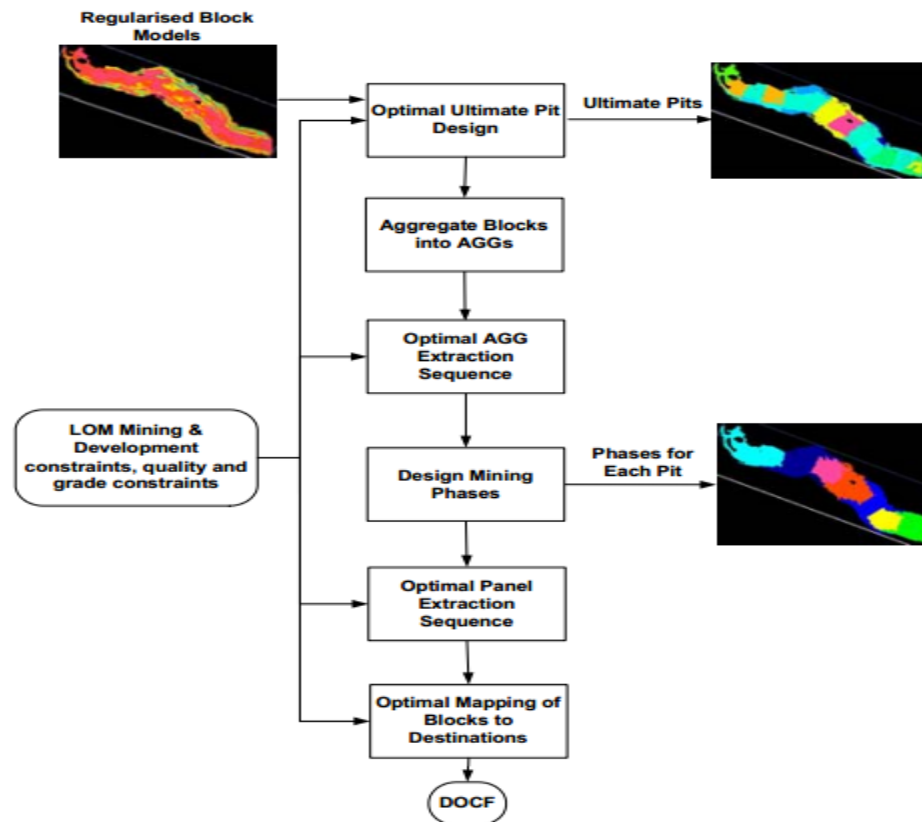


Ilustración 7. Proceso de optimización de software *Blazor*.

En términos generales, *Blazor* crea un conjunto de pits anidados mediante *Lerch - Grossman* para encontrar el pit final. Posteriormente se crean una serie de agregados de bloques con propiedades similares para luego calcular una secuencia óptima de extracción de estas, permitiendo la creación de fases. *Blazor* incluye una herramienta que le da la posibilidad al planificador a hacer modificaciones de las fases mineras originadas. Seguidamente, el software calcula, de la misma forma que para la secuencia de extracción de agregados, una secuencia óptima de paneles (intersección fase banco), esta secuencia óptima final entrega al usuario una estimación directa del VAN de la mina, además se obtiene como resultado el periodo de extracción de cada bloque.

*Blazor* considera restricciones de extracción (ángulo de talud, máxima tasa de extracción, año de inicio de cada pit, restricción de extracción suave, tasa máxima de profundización), de transporte (máxima tasa de transporte anual), de chancado (capacidad máxima de chancado) y de mercado (tonelaje objetivo por cada producto anual).

### 2.5.5 DOPPLER

DOPPLER (*Delphos Open Pit Planner*) es un software de planificación estratégica para minas de cielo abierto creado en el laboratorio de planificación de la Universidad de Chile (DELPHOS). Esta herramienta está enfocada en asistir al planificador en la toma de decisiones con el objetivo de maximizar el valor del negocio.

La herramienta otorga la opción de la planificación estratégica tradicional mediante el cálculo de envolvente económica, creación de pits anidados, selección de fases y obtención de planes mineros. Provee herramientas para el cálculo de pits anidados que emulan el funcionamiento de los software comerciales, pero usando algoritmos más eficientes y escalables, generando los planes mineros en base a las secuencias de extracción de razón estéril-mineral ascendente y descendente, y en base a un caso específico buscando maximizar el VAN y copar las capacidades mina y planta.

DOPPLER a través del secuenciador de programación lineal entera BOS2M (*Blending Optimization Sequencing and Scheduling Multi-destination*) posibilita la opción de crear un plan de producción desde el modelo de bloques (sin pasar por pits anidados), mediante la incorporación de restricciones de capacidad y geometalúrgicas (ley de alimentación a planta, contenido de contaminantes por periodo, dureza, etc.). Cabe destacar que BOS2M puede elegir el mejor destino para cada bloque en base al valor percibido según su proceso, con lo cual la ley de corte para los distintos procesos es un resultado dinámico del agendamiento. En la Ilustración 8 se puede evidenciar la solución de DOPPLER en términos gráficos.

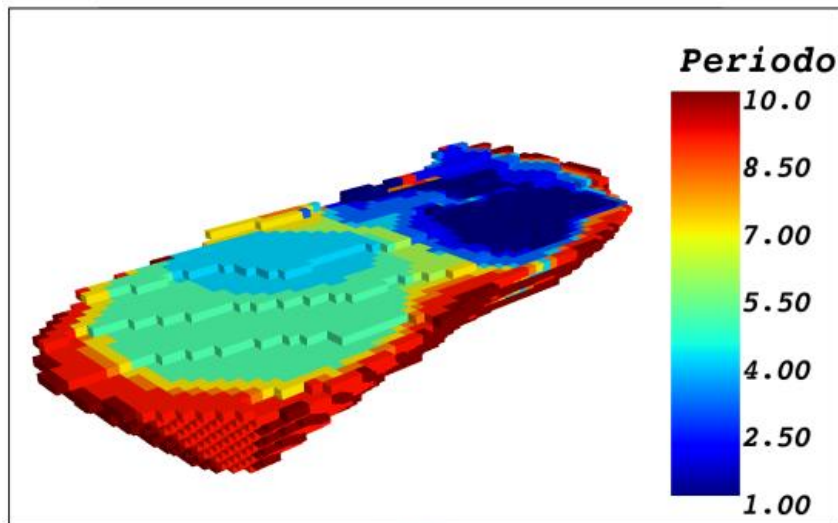


Ilustración 8. Resultados obtenidos a través de DOPPLER con secuenciador BOS2M.

### 2.5.6 *SimSched*

*SimSched* es un software desarrollado por la compañía brasileña *MiningMath Associates*, el cual, a través de una combinación de tecnologías de programación entera mixta y heurísticas, permite obtener un plan de producción a mediante una optimización global (Ilustración 9). La metodología no emplea en ningún momento algoritmos de pit final estáticos tales como *Lerchs-Grossman*.

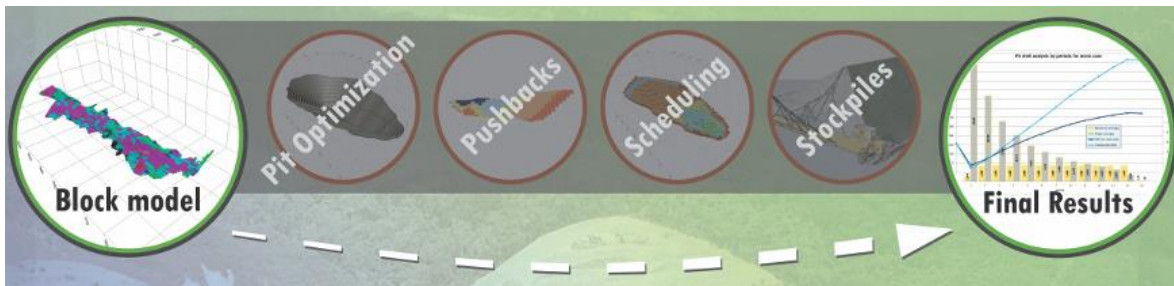


Ilustración 9. Diagrama optimización *SimSched*.

La herramienta aspira a maximizar el VAN del proyecto, decidiendo que bloque será extraído, cuando será extraído y el destino que tendrá (planta, stock, botadero, etc.). Es posible establecer límites físicos que simulen restricciones operativas obteniendo soluciones operativizables.

# CAPÍTULO 3

## 3 CASO DE ESTUDIO MODELO 05

En este capítulo se presenta un caso de estudio donde se realizan planes mineros estratégicos con las metodologías de *Whittle* y *DeepMine*, herramientas que utilizan diferentes enfoques de resolución del problema (tradicional e integral respectivamente). Para la realización de los planes se usan los mismos parámetros de entrada en ambos casos. Al final de este capítulo se comparan los resultados.

Los planes se procesan en un equipo *desktop* con *Windows 7*, procesador *Intel Core i5* y memoria ram de 16 GB.

### 3.1 Características generales del yacimiento

Para el caso estudio se utiliza un modelo de bloques denominado “Modelo 05”, un yacimiento de cobre de baja ley que no posee minerales que puedan considerarse contaminantes.

Las características generales del yacimiento se resumen a continuación (más detalles en Anexo A):

#### 3.1.1 Límites y dimensiones

El modelo de bloques posee los siguientes límites y dimensiones:

	Unidad	X	Y	Z
<b>Mínimo centroide</b>	M	502,756.25	7,520,856.25	1,202.5
<b>Máximo centroide</b>	M	505,218.75	7,522,843.75	2,432.5
<b>Tamaño bloque</b>	M	12.5	12.5	15
<b>Tamaño</b>	M	2,475	2,000	1,245
<b>N° bloques</b>	#	198	160	83

Tabla 1. Límites y dimensiones del modelo de bloques.

Bloques	Unidad	Cantidad
<b>Bloques totales</b>	#	2,629,440
<b>Bloques de aire</b>	#	207,799
<b>Bloques de material</b>	#	2,421,641

Tabla 2. Resumen cantidad de bloques del yacimiento.



### 3.1.2 Estadísticas básicas

A continuación se expone una tabla donde se muestra la estadística básica de la ley de cobre del yacimiento:

Parámetro	Cobre [%]
Ley mínima	0.00
Ley máxima	1.71
Ley promedio	0.17
Desviación estándar	0.12

Tabla 3. Estadística básica.

### 3.1.3 Curva tonelaje versus ley

Del mismo modo, se exhibe la curva tonelaje-ley del yacimiento.

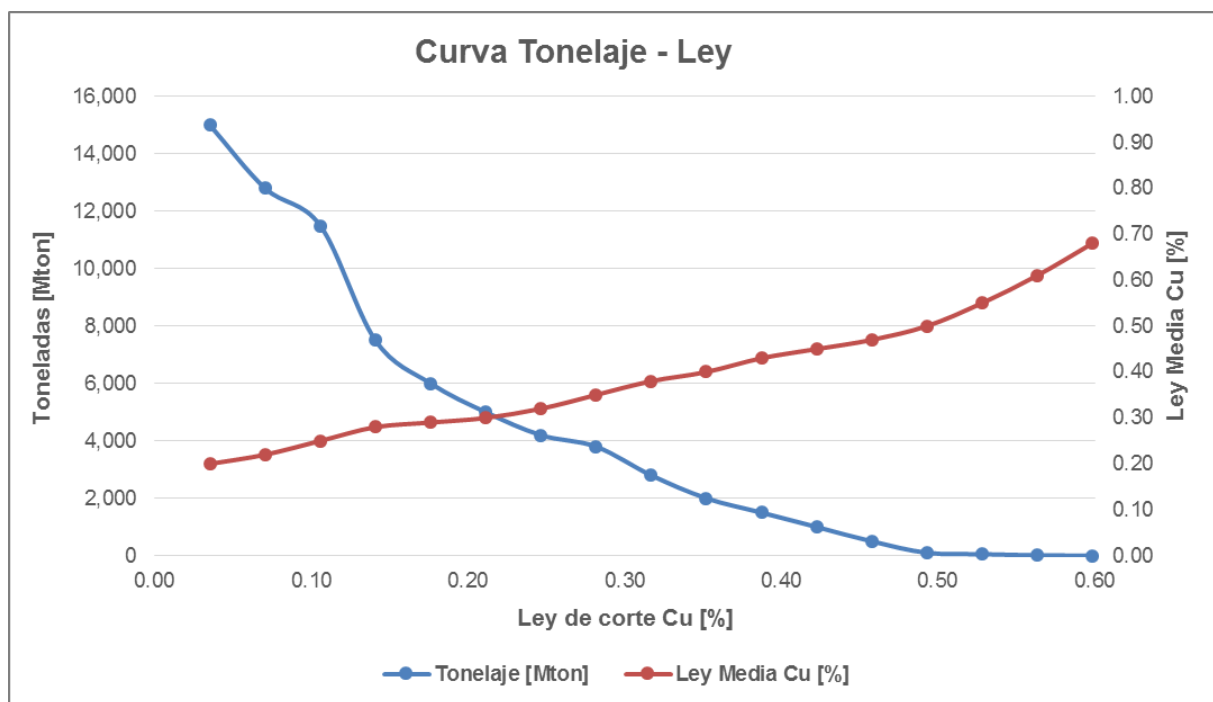


Gráfico 2. Curva tonelaje versus ley para el cobre.

Se observa que los recursos totales llegan a 15,000 Mton con una ley promedio de cobre de 0.17%. Con este gráfico es posible cuantificar los recursos geológicos para distintas leyes de corte.

### 3.1.4 Modelo geológico

En seguida se exponen una serie de perfiles representativos del yacimiento visualizando la ley de cobre.

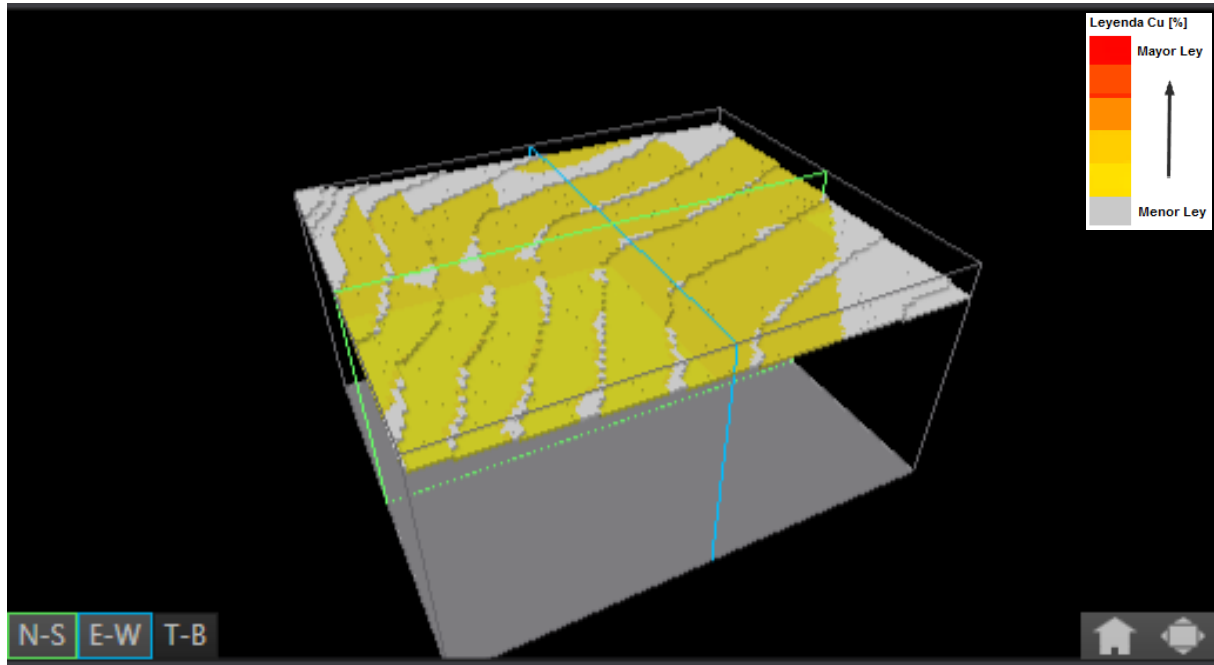


Ilustración 10. Vista 3D topografía del yacimiento (ley de cobre).

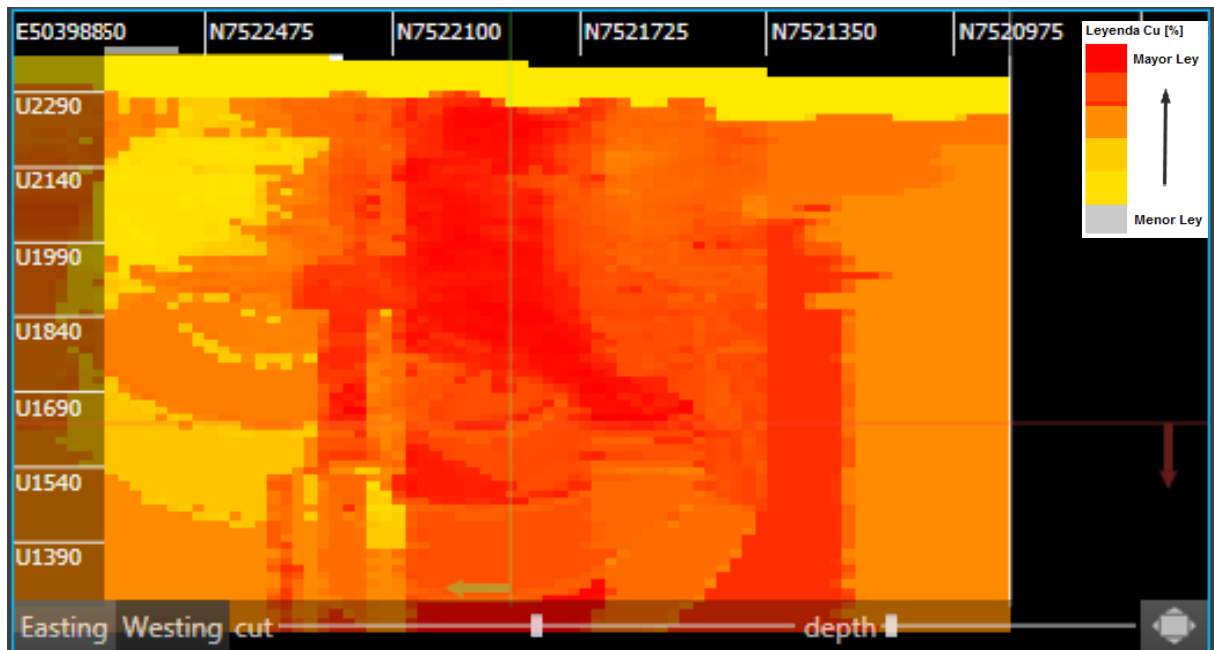


Ilustración 11. Perfil N-S. Este 503,988 (ley de cobre).

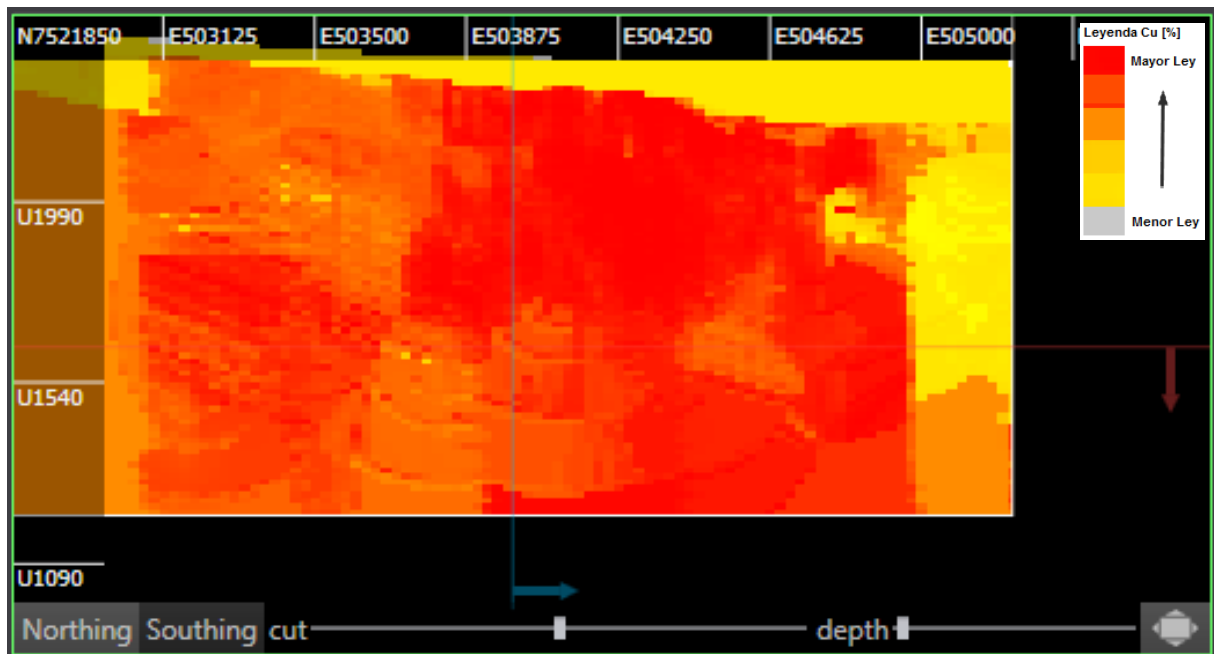


Ilustración 12. Perfil E-O. Norte 521,850 (ley de cobre).

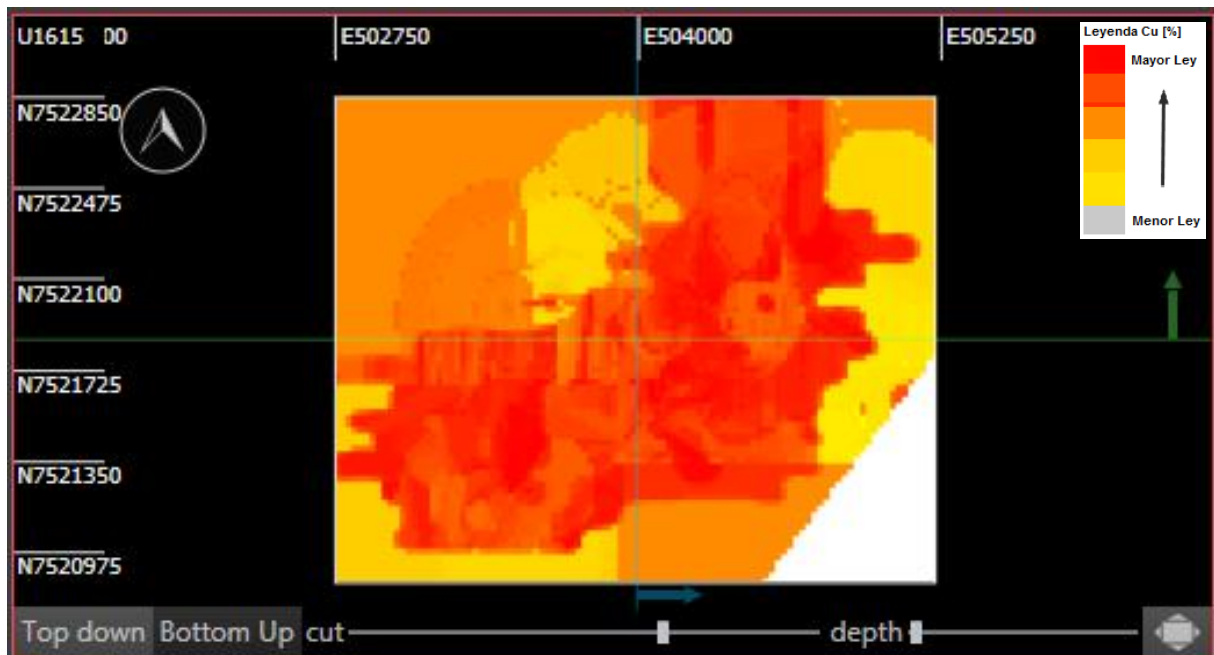


Ilustración 13. Vista en planta. Cota 1,615 (ley de cobre).

Se puede observar que el modelo 05 es un yacimiento masivo de baja ley con características de pórfido cuprífero.

### 3.2 Desarrollo de planes mineros

Se desarrollan planes mineros con las metodologías dispuestas por *Whittle* y *DeepMine*. Los parámetros relevantes a utilizar para la generación de los ambos planes son los expuestos en la Tabla 4.

<b>Parámetros relevantes</b>		
<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
<b>Costo mina</b>	US\$/t	1.64
<b>Costo planta óxidos</b>	US\$/t	4.3
<b>Recuperación cobre</b>	%	69
<b>Precio cobre</b>	US\$/lb	3

Tabla 4. Parámetros relevantes plan minero modelo 05.

Estos parámetros corresponden a una explotación masiva de óxidos de cobre. El costo mina considera costos de extracción mina y transporte a planta, mientras que el costo planta considera costos de lixiviación y de SX-EW<sup>3</sup>. La recuperación metalúrgica de cobre es fija en 69%.

Para estimar las inversiones necesarias en la evaluación económica de cada plan se utilizan curvas ritmo-inversión que son detalladas en Anexo I.

Una vez realizados los planes mineros, se realiza una comparación entre los resultados obtenidos por ambas metodologías en relación a: pits anidados, planes mineros, secuencia de fases proporcionada y en última instancia a los tiempos de procesamiento de ambas herramientas.

<sup>3</sup> SX-EW: Extracción por solvente y electroobtención.

### 3.2.1 Desarrollo de planes con la metodología *Whittle*

El software *Whittle* propicia una solución al problema de la planificación minera estratégica de largo plazo a través de la metodología tradicional, la cual divide el problema general en subproblemas más sencillos de resolver (ver Ilustración 14).

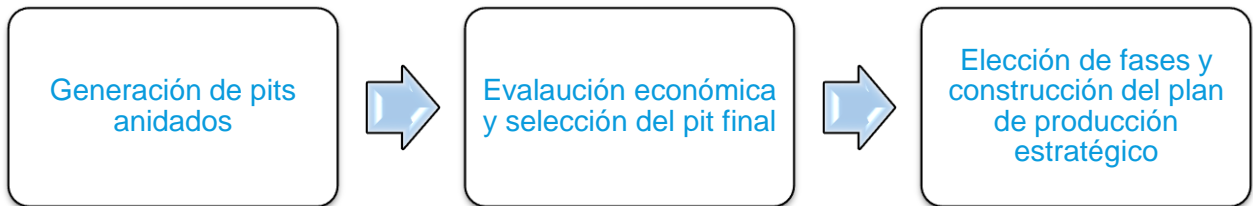


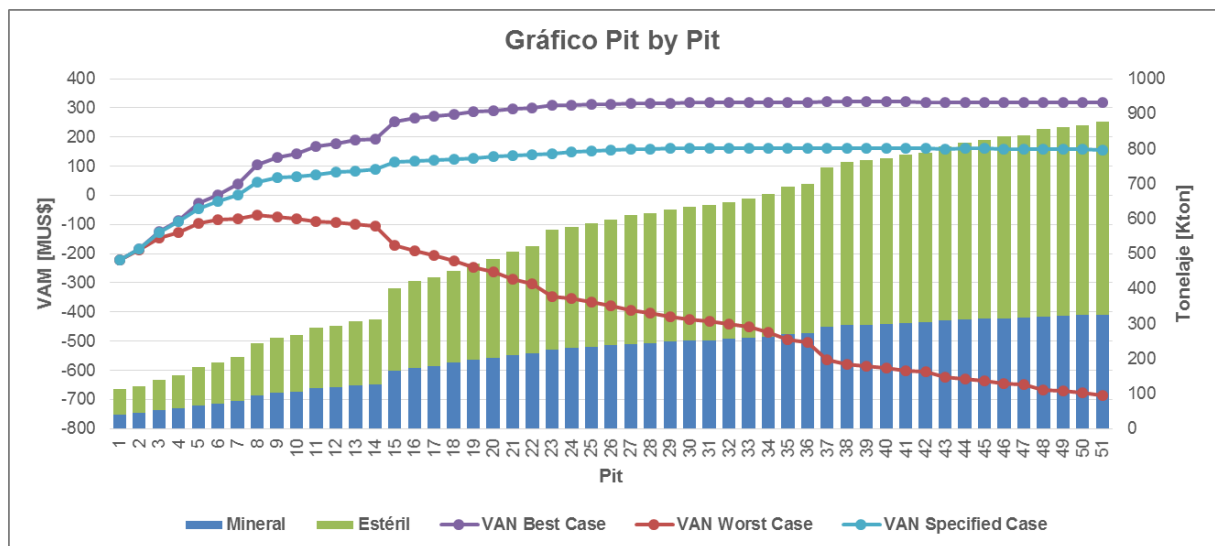
Ilustración 14. Metodología *Whittle*.

En específico, la metodología tradicional a desarrollar consta de lo siguiente:

**Generación de pits anidados:** En esta etapa, se generan una serie de pits anidados a través del algoritmo de *Lerchs-Grossman*, produciendo diferentes escenarios de pit final en función de un ponderador de precios denominado *Revenue Factor* (RF). El método de selección de mineral a utilizar para el proceso es el denominado *Cash flow*, método que calcula el flujo de caja para cada bloque, de esta forma discrimina qué bloque se considera mineral o estéril.

Los pits anidado obtenidos en esta etapa conforman la base para continuar con la metodología tradicional y juegan un papel preponderante ya que conjuntos de estos conformarán las fases y darán origen a la secuencia de extracción.

**Evaluación económica y selección del pit final:** Una vez producidos los pits anidados, es necesario una evaluación económica preliminar que determine la envolvente que definirá el pit final. Dado que no se puede realizar un plan minero a priori, *Whittle* ocupa dos escenarios denominados *worst case* y *best case*, los que corresponden a planes mineros realizando una explotación banco a banco y pit por pit respectivamente. (Gráfico 3)

Gráfico 3. Gráfico pit by pit *Whittle*.

En esta etapa es necesario realizar múltiples iteraciones que consisten en modificar el ritmo mina-planta y la razón estéril mineral (Ver Anexo F). A partir de lo anterior, es posible encontrar los ritmos que maximizan el VAN y en que pit final.

**Elección de fases y construcción del plan de producción estratégico:** Las fases en *Whittle* se definen como un conjunto de pits anidados dentro del pit final. En este proceso, las fases (también denominados *pushbacks*) y el plan minero están fuertemente enlazados, pues el resultado del plan dependerá de las fases que se elijan.

Se eligen de forma manual (guiado por función automática de *Whittle*) los *pushbacks* que conformarán las fases necesarias para construir el plan de producción. En este paso, es necesario volver a realizar corridas del gráfico pit *by pit*, ahora analizando que el pit final del *specified case* continúe siendo el mismo óptimo que el encontrado en la etapa anterior.

Para el secuenciamiento de fases se utiliza el algoritmo denominado *Milawa NPV* el que maximiza el VAN de la operación. Cabe señalar que también se realizan planes con el algoritmo *Milawa Balanced* para constatar las posibles diferencias.

*Milawa* es el encargado de destinar los bloques de las fases previamente definidas, por lo tanto la secuencia de extracción en ningún caso es una variable de la metodología de *Whittle*.

El detalle de todos los pasos necesarios para la obtención del plan estratégico con esta herramienta se encuentra en el Anexo C.

### 3.2.2 Desarrollo de planes con la metodología *DeepMine*

El software *DeepMine* propicia una solución al problema de la planificación minera estratégica de largo plazo a través de una metodología que intenta resolver el problema de forma integral (Ilustración 15).

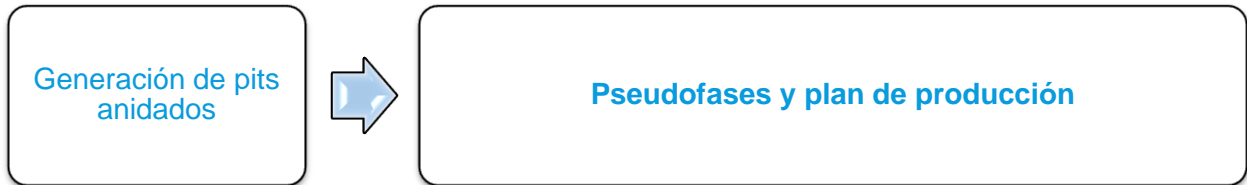


Ilustración 15. Metodología *DeepMine*.

En específico, la metodología expuesta por *DeepMine* a desarrollar consta de lo siguiente:

**Generación de pits anidados:** Al igual que la metodología de *Whittle*, *DeepMine* requiere elaborar una serie de pits anidados, pero a diferencia de *Whittle*, estos son utilizados para guiar la búsqueda de la mejor secuencia (disminuyendo el espacio de soluciones y los tiempos de respuesta), no formando necesariamente fases ni condicionando en etapas tempranas el pit final .

**Obtención de Pseudofases y plan de producción:** Una vez configurados todos los ambientes o módulos necesarios para generar el plan minero, *DeepMine* otorga como resultado simultáneamente el pit final, el plan de producción y una serie de fases (también denominadas pseudofases).

Sin embargo, de la misma forma que *Whittle*, antes de llegar a la solución final es necesario realizar diversas iteraciones para encontrar el ritmo óptimo de explotación. Las iteraciones consisten en modificar el ritmo mina-planta y la razón estéril mineral (Ver Anexo F).

El detalle de los pasos necesarios para obtención del plan estratégico con esta herramienta se encuentra en el Anexo D.

### 3.3 Resultados

#### 3.3.1 Resultados *Whittle*

A continuación se exponen los resultados de la realización del plan minero estratégico con la metodología del software *Whittle*. Los resultados se dividen en la obtención de los pits anidados y el respectivo plan minero.

##### 3.3.1.1 Pits Anidados

Se generan 51 pits anidados, desde 0 a 3.5 US\$/lb con pasos de 0.05 US\$/lb. Los resultados se observan en el Gráfico 4.

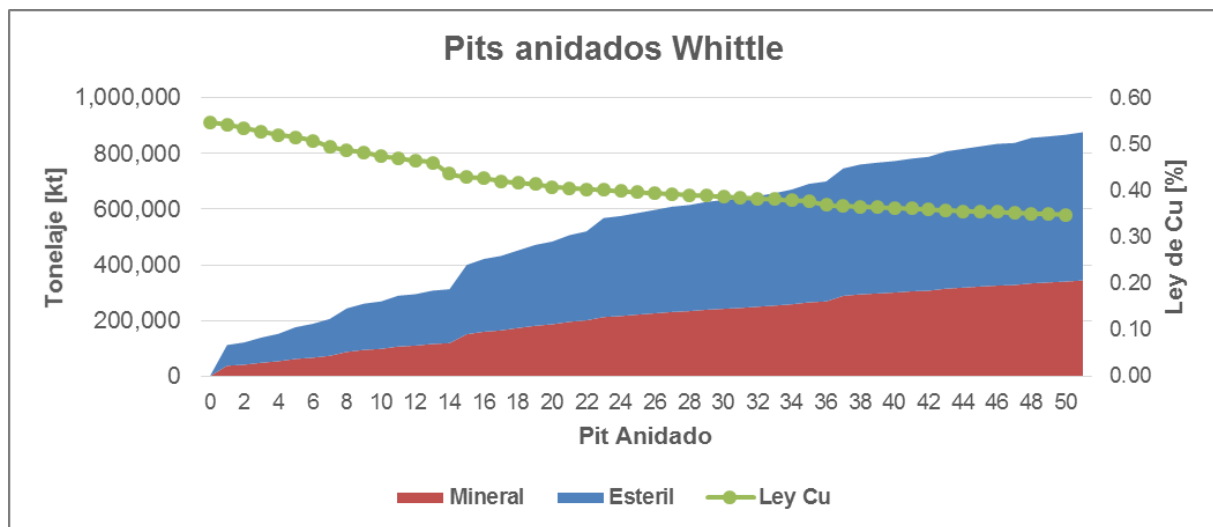


Gráfico 4. Resumen pits anidados – *Whittle*.

Se evidencia que la ley promedio de cobre va disminuyendo en función del número de pit anidado, mientras el mineral y el estéril aumentan gradualmente.

Un mayor detalle se encuentra en el Anexo E.

##### 3.3.1.2 Plan minero

Para el plan minero se encuentra que el mayor VAN se obtiene con un ritmo mina de 30,000 kt/año y una capacidad de planta de 11,538 kt/año (REM 1.6) en el pit final número 35. Lo anterior se obtiene luego de las diversas iteraciones (Anexo F).

Se eligen de forma manual (guiado por función automática de *Whittle*) que los *pushbacks* 1- 9 y 35 conformen las fases necesarias para construir el plan de producción.



Los resultados del plan minero se muestran en la Tabla 5 y en el Gráfico 5

Resultados plan <i>Whittle</i>		
Parámetro	Unidad	Valor
VAN	MUS\$	162
LOM	Años	28
Total Material extraído	Kton	691.2
Mineral procesado	Kton	269.4
Fino nominal	Kton	1,014
Lastre	Kton	421.7
Fino actualizado (8%)	Kton	399.2
Ley promedio cobre	%	0.38
Número de pseudofases <sup>4</sup>	#	3

Tabla 5. Resultados plan minero *Whittle*.



Gráfico 5. Plan minero *Whittle*.

Como se constata en la tabla y gráfico anterior, se alcanza un VAN de 162 MUS\$ en 28 años de operación. Durante los primeros 11 años del proyecto se extraen considerablemente las mejores leyes. Cabe señalar que en varios periodos no se logra completar el proceso de la planta, en particular el segundo año, donde su llenado es prácticamente nulo e impacta directamente en el VAN.

El flujo descontado se deja en manifiesto a continuación (Gráfico 6).

<sup>4</sup> Si bien lo que proporciona el software no son necesariamente las fases (propias de la etapa de diseño minero) para efectos de simplificación en este documento se utilizarán indistintamente los términos fases y pseudofases.

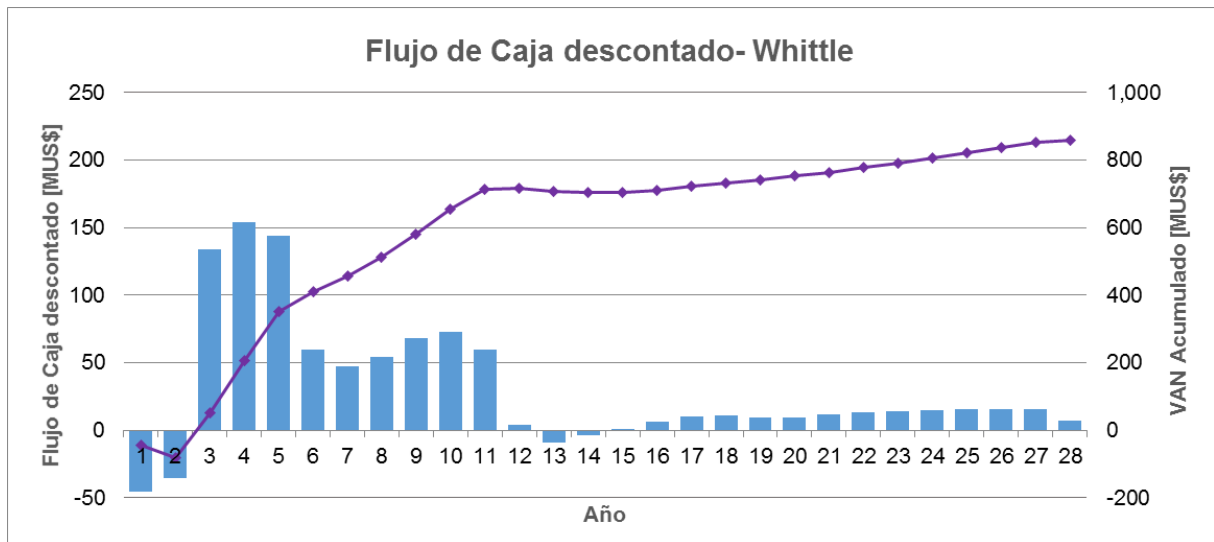


Gráfico 6. Flujo de caja descontado *Whittle* (sin inversión).

El flujo descontado y el VAN acumulado expuesto en el gráfico anterior confirman que durante los 11 primeros años del proyecto se captura la mayor proporción del VAN. Asimismo se evidencia que durante los años 13 y 14 se consiguen flujos de caja negativo.

### 3.3.1.3 Fases y secuencia

Se expone en la Ilustración 16 una vista en planta de las fases y la secuencia obtenida a través de la metodología de *Whittle*. El detalle de estas se encuentra en el Anexo G.

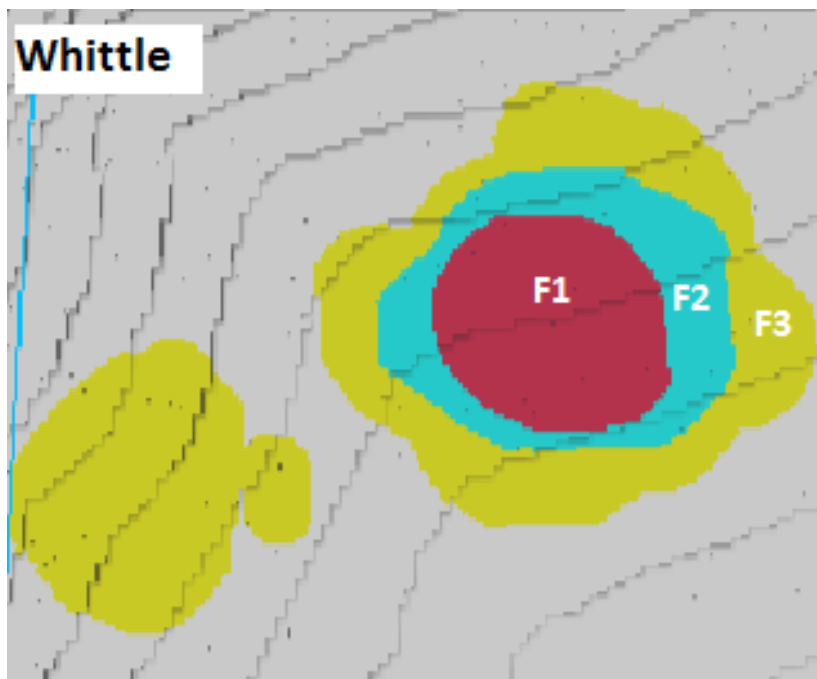


Ilustración 16. Fases y secuencia *Whittle*.

Se observa a través de la ilustración anterior que la secuencia obtenida sigue el orden de los pits anidados, no proporcionando mayor noción sobre el direccionamiento de la explotación. Posteriormente en etapas de diseño (fuera del alcance de este trabajo), se deberán realizar pruebas de ensayo y error para lograr definir verdaderas secuencias.

#### 3.3.1.4 Tiempos de procesamiento

Los tiempos de procesamiento necesarios para realizar el plan minero en *Whittle* se observan en la Tabla 6.

<b>Tiempo de procesamiento</b>	
<b>Etapa</b>	<b>[hr:min:seg]</b>
<b>Importar modelo</b>	<b>0:09:51</b>
<b>Pits anidados</b>	<b>0:02:58</b>
<b>Pit by pit</b>	<b>0:06:32</b>
<b>Plan minero</b>	<b>0:00:31</b>
<b>Total</b>	<b>0:19:52</b>

Tabla 6. Tiempo de procesamiento *Whittle*.

Es importante señalar que los tiempos expuestos en la tabla anterior consideran la realización de un plan unitario. Para realizar un plan de calidad, es necesario iterar y hacer diversas “corridas”, por lo que este tiempo es solo referencial.

### 3.3.2 Resultados *DeepMine*

A continuación se exponen los resultados de la realización del plan minero estratégico con la metodología de *DeepMine*. Los resultados se dividen en la obtención de los pits anidados y el respectivo plan minero.

#### 3.3.2.1 Pits Anidados

Se generan (al igual que en *Whittle*) 51 pits anidados, desde 0 a 3.5 US\$/lb con pasos de 0.05 US\$/lb. Los resultados se observan en el Gráfico 7.

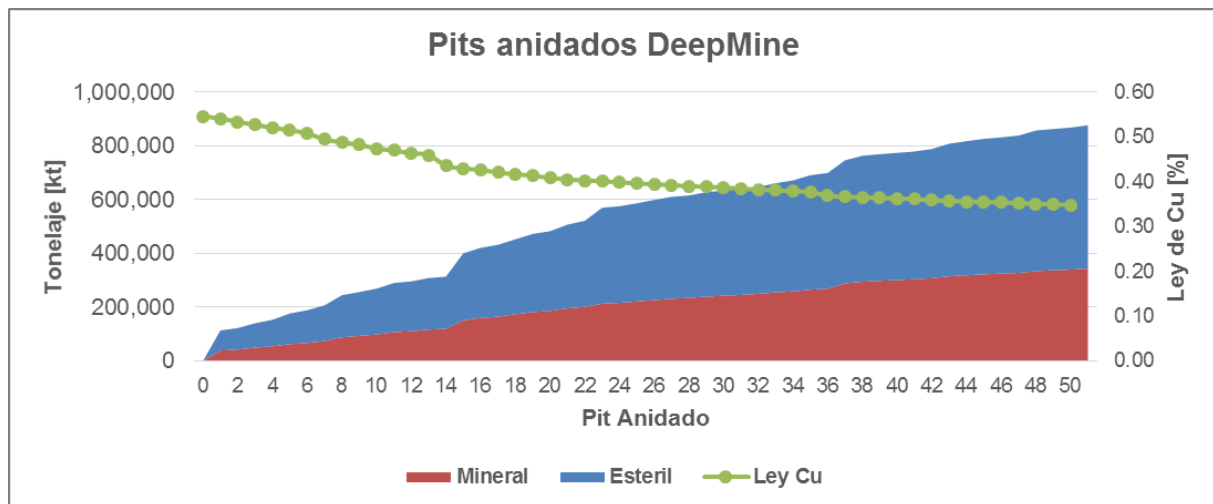


Gráfico 7. Resumen pit anidados – *DeepMine*.

Se evidencia que la ley promedio de cobre va disminuyendo en función del número de pit anidado, mientras el mineral y el estéril aumentan gradualmente.

Un mayor detalle se encuentra en el Anexo E.

#### 3.3.2.2 Plan minero

Para el plan minero se encuentra que el mayor VAN se obtiene, al igual que *Whittle*, con un ritmo mina de 30,000 kt/año. Cabe destacar que se consiguen valores similares en VAN dado este ritmo mina para las 3 capacidades de planta evaluadas, de este modo, se elige la planta de 11,538 kt/año para considerar la misma que en la metodología anterior (*Whittle*).

Los resultados del plan minero se muestran en la Tabla 7 y en el Gráfico 8.

Resultados plan <i>DeepMine</i>		
Parámetro	Unidad	Valor
VAN	MUS\$	230
LOM	Años	22
Total Material extraído	Kton	656.9
Mineral procesado	Kton	213.3
Lastre	Kton	446.6
Fino nominal	Kton	836.5
Fino actualizado (8%)	Kton	407.3
Ley promedio cobre	%	0.39
Número de pseudofases	#	17

Tabla 7. Resultados plan minero *DeepMine*.

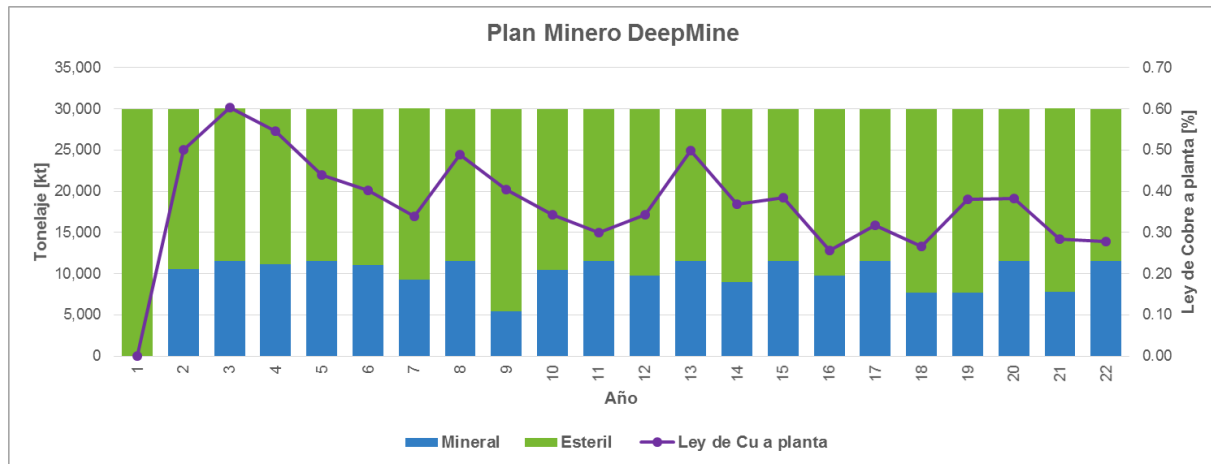


Gráfico 8. Plan minero *DeepMine*.

Como se constata en la tabla y gráfico anterior, se alcanza un VAN de 230 MUS\$ en 22 años de operación. Se observa que la ley promedio decrece paulatinamente en función de los años. Cabe señalar que en varios periodos no se logra completar el proceso de la planta.

El flujo descontado se deja en manifiesto a continuación (Gráfico 9).

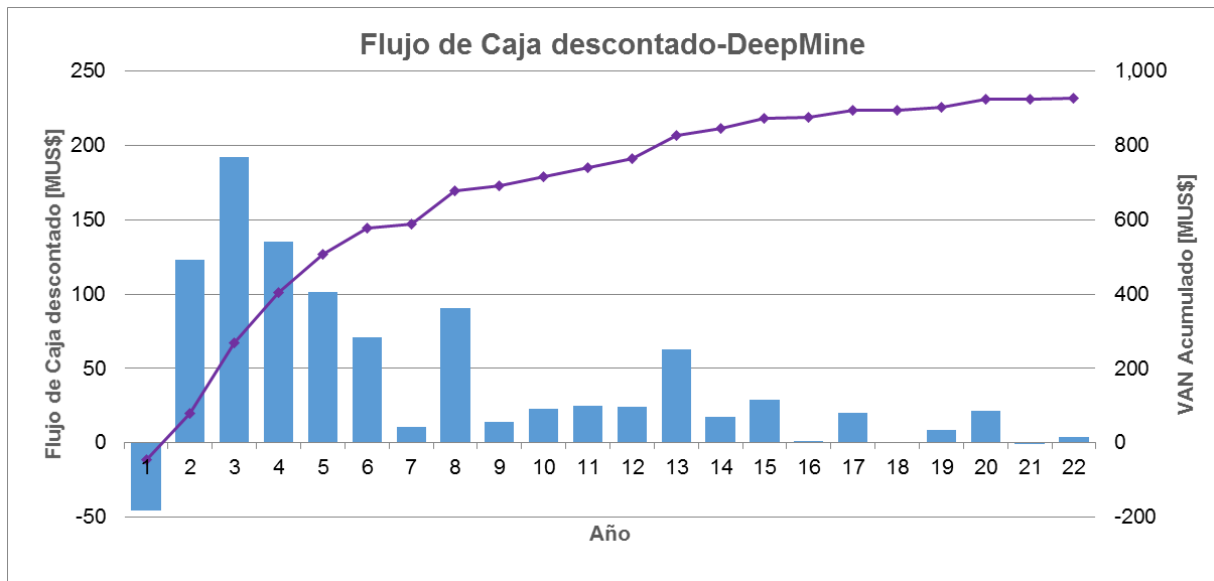


Gráfico 9. Flujo de caja descontado *DeepMine* (sin inversión).

El flujo descontado y el VAN acumulado expuesto en el gráfico anterior evidencian un aumento gradual de la captura del VAN y no se observan años con flujo de caja negativos salvo el año 1 que considera un *prestripping* manual.

### 3.3.2.3 Fases y secuencia

Se expone en la Ilustración 17 una vista en planta de las fases y la secuencia obtenida a través de la metodología de *DeepMine*. El detalle de estas se encuentra en el Anexo G.

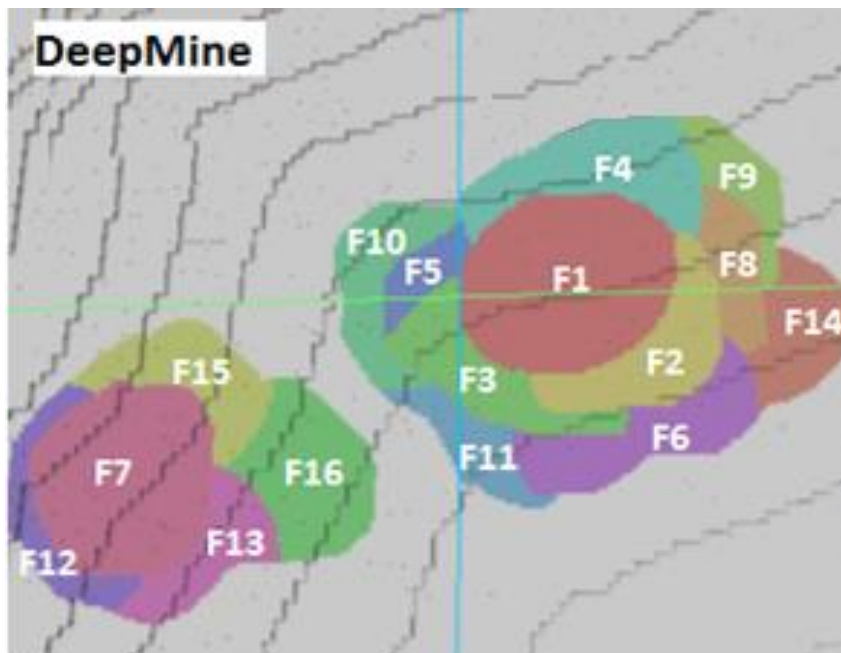


Ilustración 17. Fases y secuencia *DeepMine*.

Se observa a través de la ilustración anterior que la secuencia obtenida otorga fuertes nociones sobre el direccionamiento de la explotación con 16 fases o pseudofases claramente definidas.

### 3.3.2.4 Tiempos de procesamiento

Los tiempos de procesamiento necesarios para realizar un plan minero en *DeepMine* se observan en la Tabla 8.

<b>Tiempo de procesamiento</b>	
<b>Etapa</b>	<b>[hr:min:seg]</b>
<b>Importar modelo</b>	<b>0:17:21</b>
<b>Pits anidados</b>	<b>0:04:40</b>
<b>Pit by pit</b>	-
<b>Plan minero</b>	<b>0:29:49</b>
<b>Total</b>	<b>0:51:50</b>

Tabla 8. Tiempos de procesamiento *DeepMine*.

Al igual que para la metodología anterior, los tiempos expuestos en la tabla anterior consideran la realización de un plan unitario. Para realizar un plan de calidad, es necesario iterar y hacer diversas “corridas”, por lo que este tiempo es solo referencial.

### 3.4 Comparación de resultados

A continuación se realiza una comparación entre los resultados obtenidos por ambas metodologías. Se realiza una comparación con respecto a los pits anidados obtenidos, a los planes mineros, a la secuencia de fases proporcionada y finalmente a los tiempos de procesamiento de ambas herramientas.

#### 3.4.1 Pits anidados

Se realiza una comparación en relación a los pits anidados generados por ambas herramientas con el fin de constatar las diferencias o similitudes que proveen estos resultados. En el Gráfico 10 se exponen las diferencias que existen en términos de tonelaje. Por su parte, en el Gráfico 11 se presentan las diferencias que existen en términos de leyes y de razón estéril mineral.

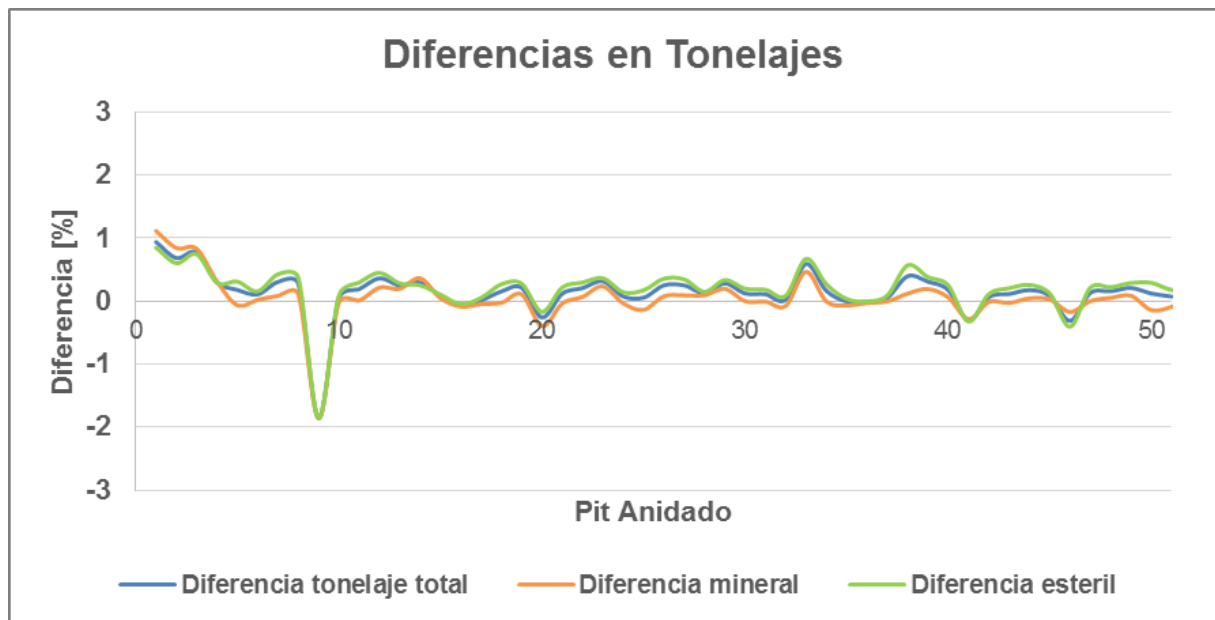


Gráfico 10. Diferencias en toneladas de los pits anidados.



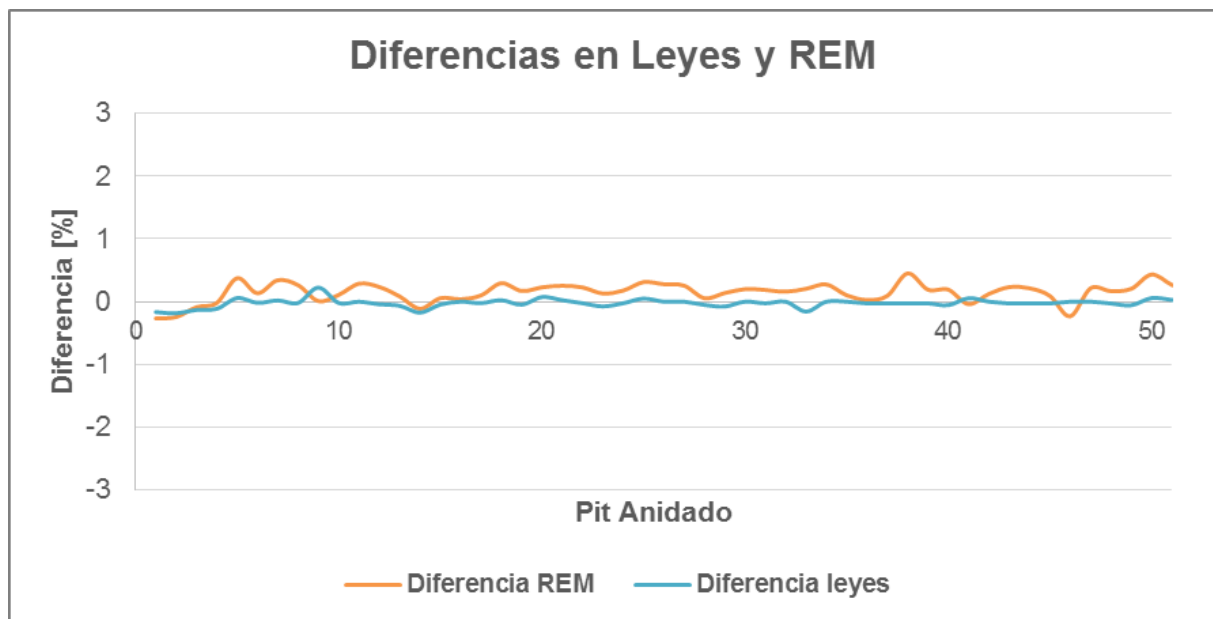


Gráfico 11. Diferencias en leyes y REM de los pits anidados.

Los resultados anteriores se resumen en la Tabla 9.

		Tonelaje total	Mineral	Estéril	REM	Ley Cu
<b>Diferencia porcentual promedio</b>	[%]	0.14	0.04	0.19	0.15	-0.02
<b>Diferencia porcentual absoluto máximo</b>	[%]	1.82	1.83	1.82	0.45	0.23

Tabla 9. Diferencias pits anidados entre *Whittle* y *DeepMine*.

De lo anterior se evidencia que las diferencias entre los resultados de ambos algoritmos de creación de pits anidados son mínimas, produciendo en tonelaje diferencias absolutas promedios de 0.14% y máximas de 1.82%. Esto se debe principalmente a que ambas metodologías utilizan similares algoritmos para resolver el mismo problema del pit final (*Lerchs-Grossman* y *pseudoflow* respectivamente).

El detalle de la Tabla 9 en Anexo B.

### 3.4.2 Planes mineros

Con respecto a los planes mineros, en la Tabla 10 se exhibe un resumen de los resultados más importantes de la respectiva comparación. Adicionalmente en el Gráfico 12 y en el Gráfico 13, se presentan confrontaciones de los resultados de las leyes de cabeza y del VAN acumulado por periodo.

		<i>Whittle</i>	<i>DeepMine</i>	Diferencia [%]
<b>VAN</b>	MUS\$	162	230	30
<b>LOM</b>	Años	28	22	-27
<b>Ley promedio cobre</b>	%	0.38	0.39	3
<b>Movimiento total</b>	Kt	691,188	659,945	-5
<b>Mineral</b>	Kt	269,441	213,281	-26
<b>Lastre</b>	Kt	421,746	446,665	6
<b>Fino nominal</b>	Kt	1,012	837	-21
<b>Fino actualizado (8%)</b>	Kt	399	407	2

Tabla 10. Tabla comparativa planes *Whittle* y *DeepMine*.

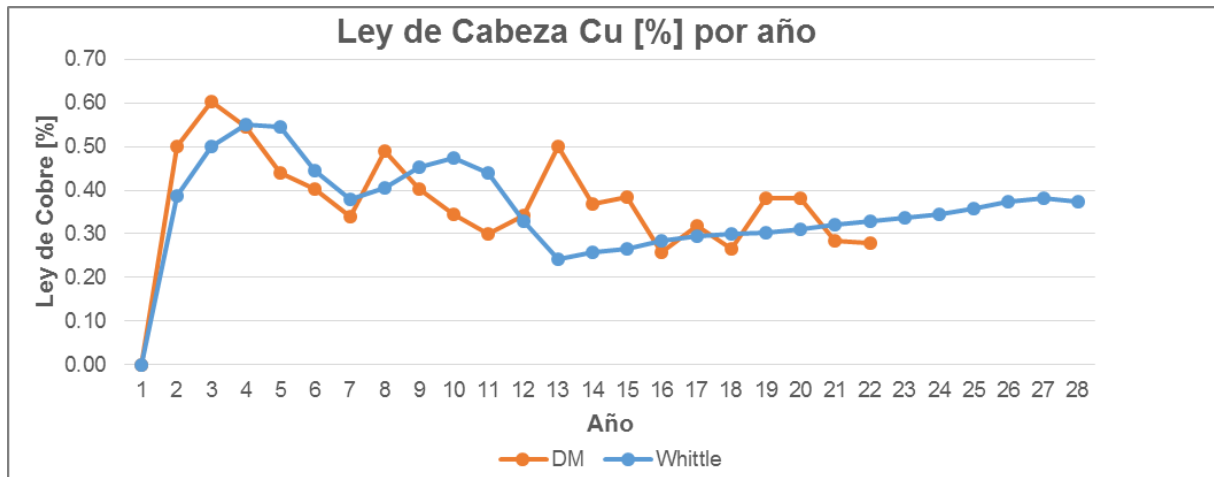


Gráfico 12. Comparación ley de cabeza por año (modelo 05).

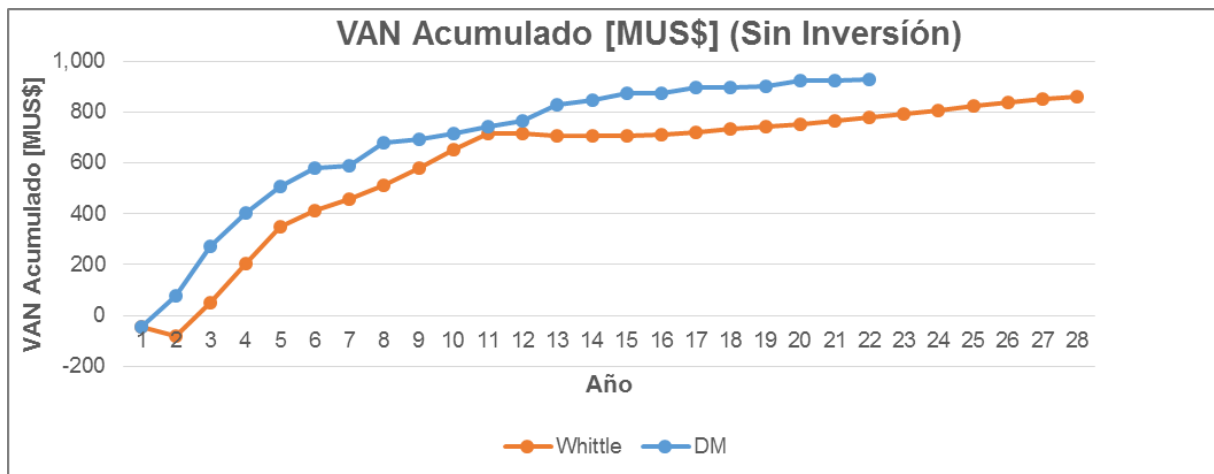


Gráfico 13. VAN Acumulado [MUS\$] (modelo 05).

Se constata que los planes realizados a través de la herramienta *DeepMine* logran mejores resultados en términos de VAN (30% superior) en menos tiempo de la vida de la mina (27% menos), esto se debe principalmente a que en el segundo y tercer año del proyecto, *DeepMine* permite adelantar leyes que son significativamente más altas en

comparación a *Whittle* (Gráfico 12), provocando, ya en el segundo año, un mayor VAN acumulado que se mantiene durante la vida de la mina (Gráfico 13) . En términos de movimiento total son muy similares, sin embargo *DeepMine* procesa menor cantidad de mineral (26% menos).

### 3.4.3 Fases y secuencias

Posteriormente, se exhiben vistas en planta que posibilitan contemplar los diferentes *pushbacks* producidos en *Whittle* y las fases o pseudofases obtenidas por *DeepMine* (Ilustración 18).

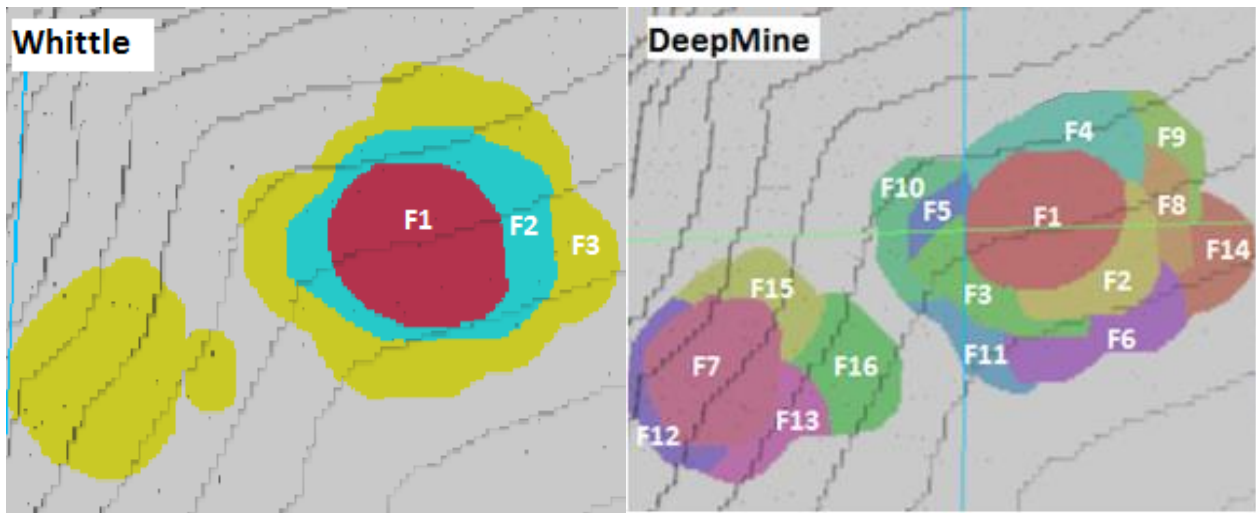


Ilustración 18. Vistas en planta fases *Whittle* – *DeepMine*.

Se observa que *DeepMine*, a diferencia de *Whittle*, otorga fases y secuencias de fases considerablemente más definidas, lo que facilitará el posterior diseño ya que proporciona nociones más fuertes sobre el direccionamiento de la explotación. Cabe destacar que *DeepMine* permite, dado que sus fases no son conjuntos de pits anidados como en el caso de *Whittle*, generar “mini pits” (más pequeños de lo que se puede obtener con el menor *Revenue Factor* en *Whittle*) anticipando mejores leyes que implican en un aumento en el VAN.

Un detalle de las fases se encuentra en el Anexo G.

### 3.4.4 Tiempo de procesamiento

El tiempo de procesamiento juega un rol fundamental en lo que respecta a planificación estratégica, dado que es necesario en etapas de evaluaciones estratégicas realizar una gran cantidad de escenarios en cortos tiempos.

La Tabla 11 muestra la comparación de los tiempos de procesamientos para un plan minero (primera “corrida”), cabe destacar que para alcanzar resultados satisfactorios es

necesario muchas veces realizar una gran cantidad de “corridos” para un mismo escenario.

	Tiempo de procesamiento [hr:min:seg]			
	<i>Whittle</i>	<i>DeepMine</i>	Diferencia	Diferencia [%]
<b>Importar modelo</b>	0:09:51	0:17:21	0:07:30	76
<b>Pits anidados</b>	0:02:58	0:04:40	0:01:42	57
<b>Pit by pit</b>	0:06:32	-	-	-
<b>Plan minero</b>	0:00:31	0:29:49	0:29:18	5671
<b>Total</b>	<b>0:19:52</b>	<b>0:51:50</b>	<b>0:31:58</b>	<b>161</b>

Tabla 11. Comparación tiempos de procesamiento.

Como se comprueba en la tabla anterior, *DeepMine* demora en total 1,5 veces más en realizar en plan estratégico en comparación con *Whittle*. Esto se debe principalmente a que *DeepMine*, en busca de soluciones más completas, realiza simultáneamente la búsqueda del pit final y del programa de producción (a través de su algoritmo de programación dinámica), a esto se suma que entrega como “*output*” una serie de pseudofases que maximizan el VAN, requiriendo mayor tiempo de procesamiento. Cabe destacar que la ganancia en el valor de las soluciones compensa en gran medida el aumento en el tiempo de procesamiento. Además, estos tiempos siguen siendo aceptables para la realización de planes mineros estratégicos.

# CAPÍTULO 4

## 4 CASO APLICADO MODELO 07

A continuación se presenta un caso aplicado donde se realiza un plan minero estratégico con la metodología del software *DeepMine* sobre una mina en operación que fue evaluada con anterioridad a través de la metodología tradicional por personal de Codelco. Se desea comparar en particular la secuencia de fases obtenida, dado que el plan base a comparar (Codelco 2015<sup>5</sup>) es un plan minero táctico operativizado.

### 4.1 Características generales del yacimiento

Para el caso aplicado se utiliza un modelo de bloques denominado “Modelo 07”, un yacimiento de cobre de mediana ley que posee altos niveles de Arsénico como contaminante. Este yacimiento actualmente es explotado por Codelco.

Las características generales del yacimiento se resumen a continuación (más detalles en Anexo B):

#### 4.1.1 Límites y dimensiones

El modelo de bloques posee los siguientes límites y dimensiones:

	Unidad	X	Y	Z
<b>Mínimo centroide</b>	M	22,660	24,210.5	2,228
<b>Máximo centroide</b>	M	25,600	28,980.5	4,452
<b>Tamaño bloque</b>	M	30	30	16
<b>Tamaño</b>	M	2,940	4,770	2,224
<b>N° bloques</b>	#	99	160	140

Tabla 12. Límites y dimensiones del modelo de bloques.

Bloques	Unidad	Cantidad
<b>Bloques totales</b>	#	2,217,600
<b>Bloques de aire</b>	#	586,237
<b>Bloques de material</b>	#	1,631,363

Tabla 13. Resumen cantidad de bloques del yacimiento.

<sup>5</sup> Se denominará plan Codelco 2015, al plan minero táctico operativizado que se tuvo acceso en la realización de la memoria y que servirá para efectuar la respectiva comparación.

### 4.1.2 Estadísticas básicas

A continuación se expone una tabla donde se muestra la estadística básica de las leyes de Cobre.

Parámetro	Cobre [%]
Ley mínima	0.00
Ley máxima	3.52
Ley promedio	0.21
Desviación estándar	0.30

Tabla 14. Estadística básica.

### 4.1.3 Curva tonelaje versus ley

Del mismo modo, se presenta la curva tonelaje-ley del yacimiento.

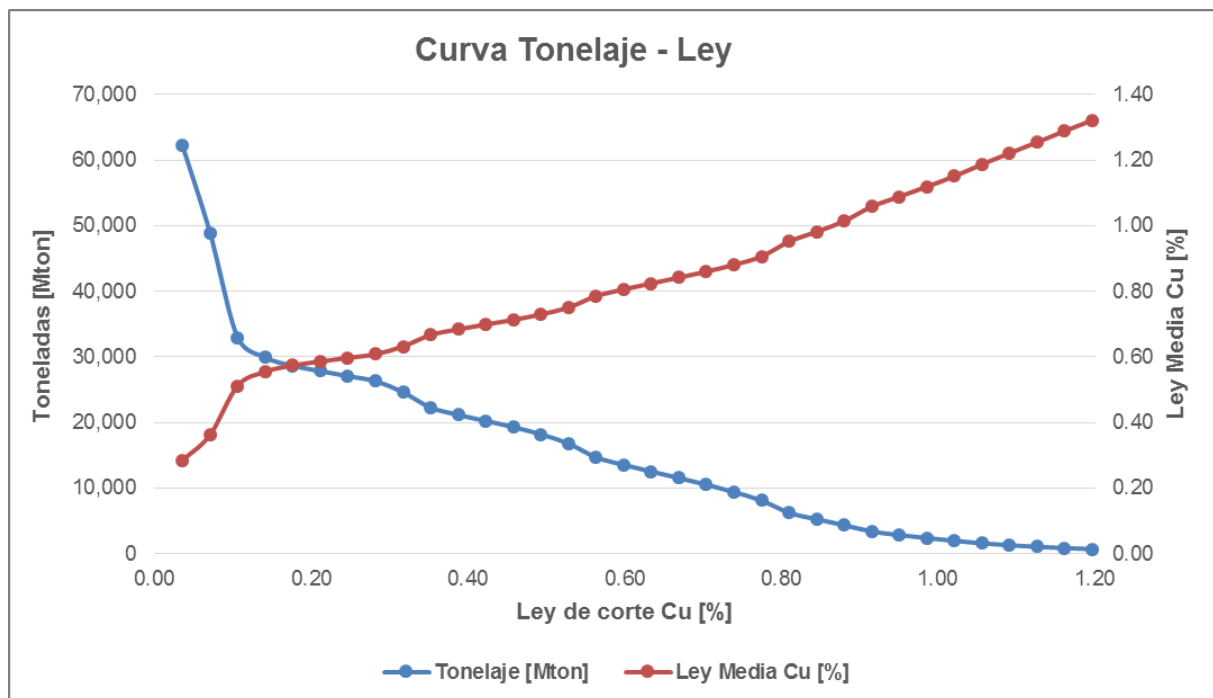


Gráfico 14. Curva tonelaje versus ley para el cobre.

Se observa que los recursos totales superan los 60,000 Mton con una ley promedio de cobre de cercana a 0.2%.

#### 4.1.4 Modelo geológico

En seguida se exponen una serie de perfiles representativos del yacimiento visualizando la ley de cobre.

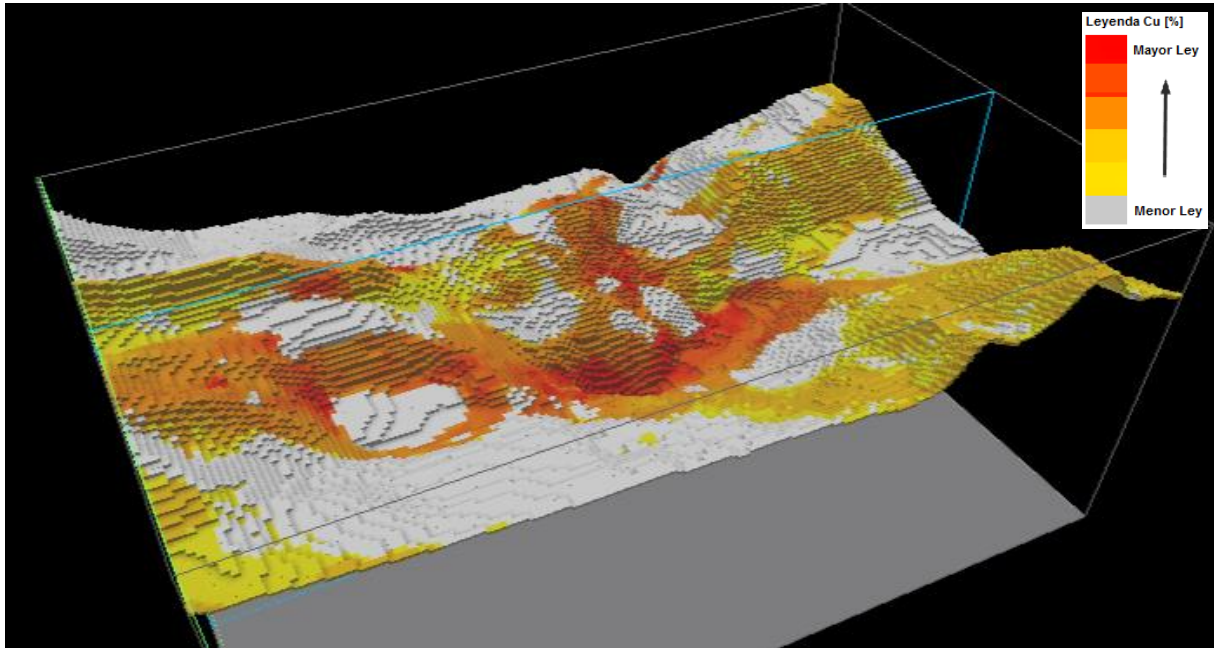


Ilustración 19. Vista 3D topografía del yacimiento (ley de cobre).

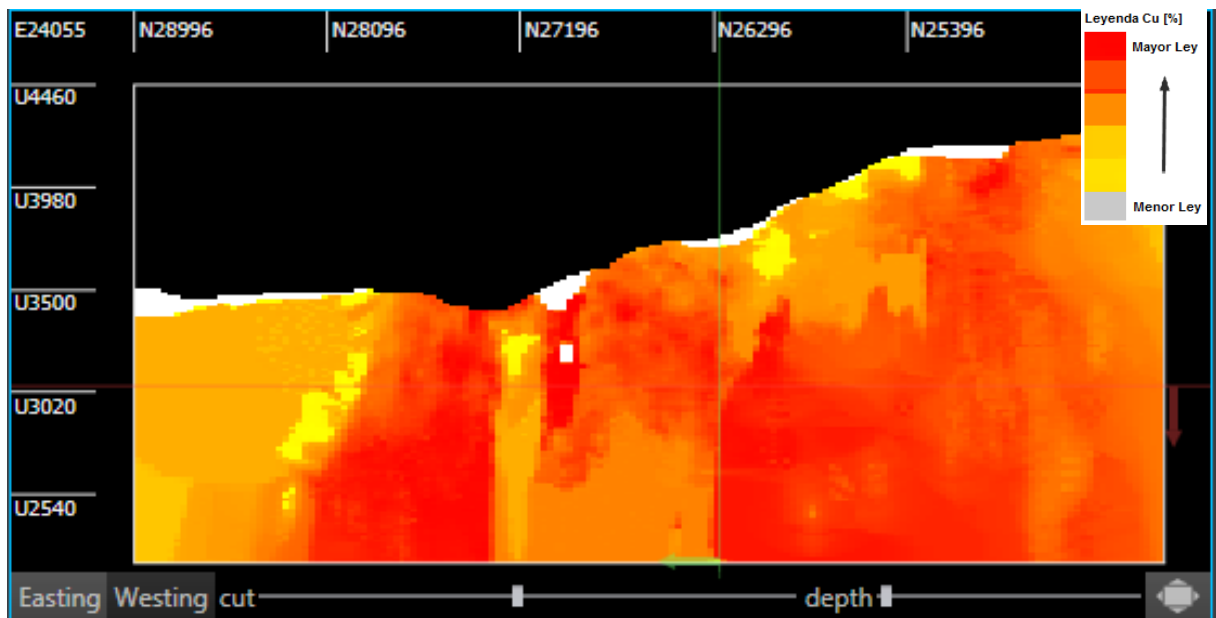


Ilustración 20. Perfil N-S. Este 24,055 (ley de cobre).

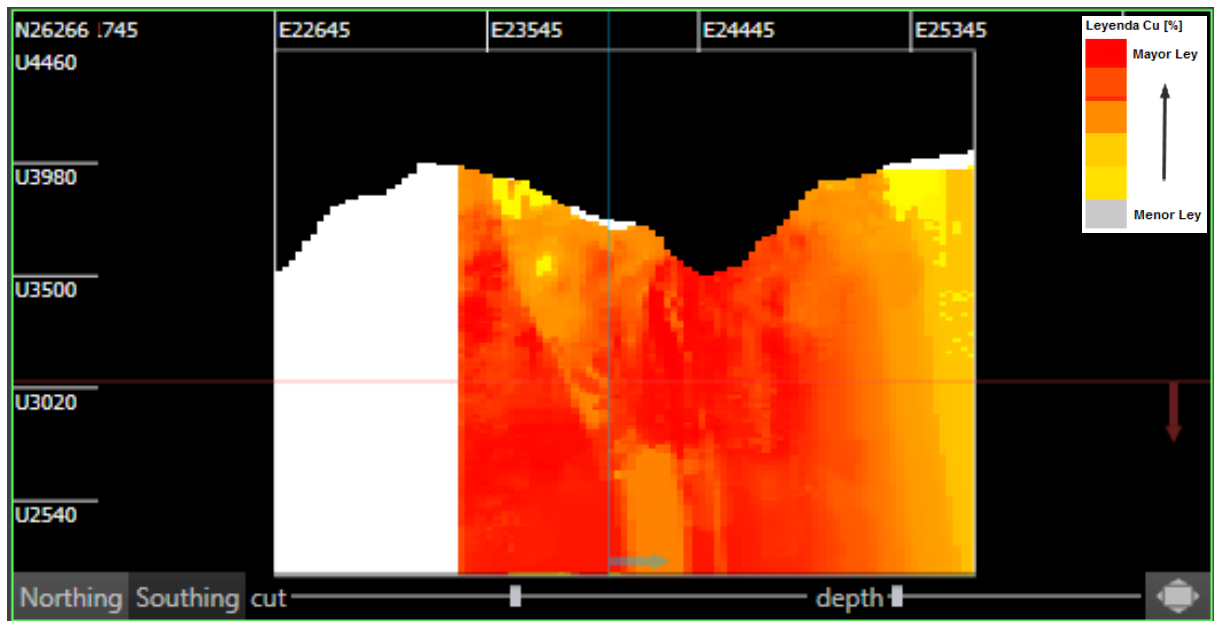


Ilustración 21. Perfil E-O. Norte 26,266 (ley de cobre).

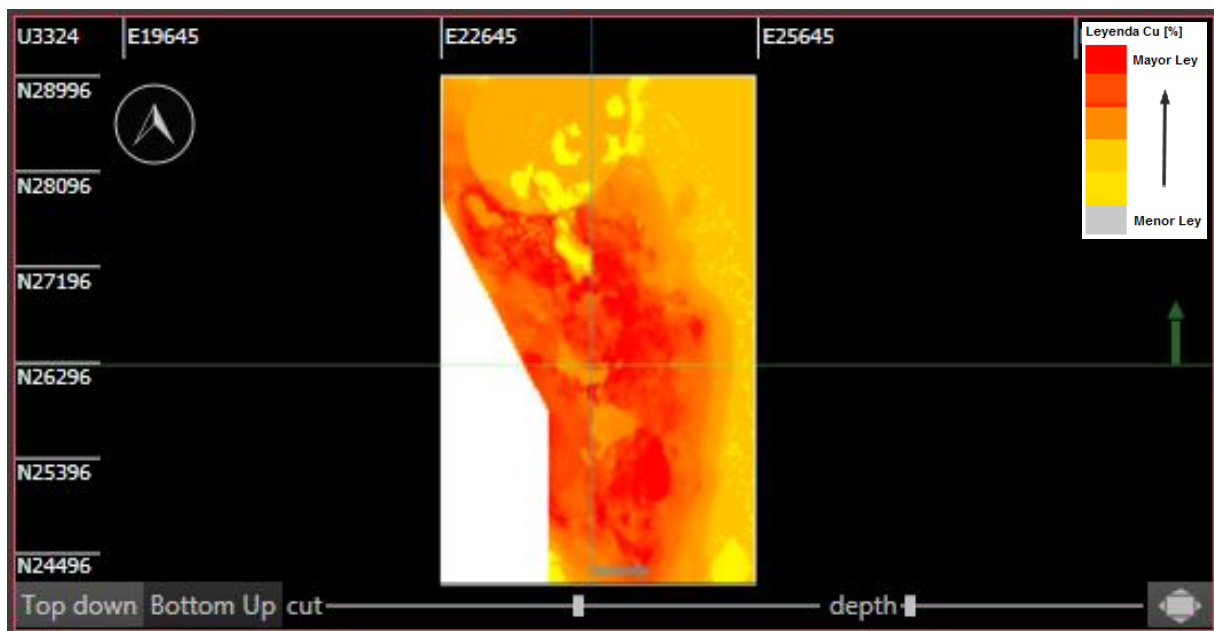


Ilustración 22. Vista en planta. Cota 3,324 (ley de cobre).

Es posible observar que el modelo 07 es un yacimiento masivo de mediana ley con características de pórfido cuprífero (al igual que el modelo 05). Las diferentes vistas permiten dimensionar lo avanzado de la explotación, con un pit claramente formado.



## 4.2 Desarrollo plan minero *DeepMine*

Se realiza un plan minero estratégico con el software *DeepMine* de la misma forma que en capítulo anterior. Los parámetros relevantes a utilizar son expuestos en la Tabla 15.

Parámetros relevantes		
Parámetro	Unidad	Valor
Costo mina	US\$/t	2.6
Costo planta concentradora	US\$/t	10.25
Recuperación cobre	%	88
Precio cobre	US\$/lb	3

Tabla 15. Parámetros relevantes plan minero modelo 07.

Estos parámetros corresponden a una explotación masiva de sulfuros de cobre. El costo mina considera costos de extracción mina y transporte a planta, mientras que el costo planta considera solo el costo de concentración<sup>6</sup>. La recuperación metalúrgica de cobre es fija en 88%.

Para la realización del plan minero en *DeepMine* no se itera en busca del mejor ritmo de explotación a diferencia de los ejercicios del capítulo 3, sino que para este caso se tiene una planta fija de 88 kt/d a partir del año 7 en adelante y un movimiento mina fijo equivalente a 200 kt/d. Se fijan estos movimientos y capacidades con el fin de replicar el plan Codelco 2015.

Cabe señalar que el plan en *DeepMine* a realizar en este capítulo se desea comparar con el plan Codelco 2015 que posee características tácticas y se encuentra operativizado, por lo tanto la comparación se centra en la secuencia de extracción de fases, más que en variables cuantitativas. El plan Codelco 2015, es un plan minero que se realizó a través de la metodología tradicional completa, esto quiere decir que paso por etapas de diseño y por etapas de optimización de estrategia de consumo de reservas.

<sup>6</sup> El costo de concentración corresponde al chancado, molienda y flotación.

### 4.2.1 Resultados plan minero

Como se dijo anteriormente, el plan minero realizado replica los movimientos mina y planta de planes realizados por Codelco en 2015, esto corresponde a una capacidad de planta de 88 kt/d con movimiento mina total de 200 kt/d. Los principales resultados se exhiben en la Tabla 16 y en el Gráfico 15.

Resultados plan <i>DeepMine</i>		
Parámetro	Unidad	Valor
Año inicio	Año	2016
LOM	Años	40
VAN	MUS\$	10,187
Fino nominal	Kt	7,891
Fino actualizado (8%)	Kt	2,446
Ley promedio cobre	%	0.74
Movimiento total	Kt	2,385,725
Mineral	Kt	1,072,078
Lastre	Kt	1,313,647

Tabla 16. Resultados plan minero estratégico *DeepMine*.

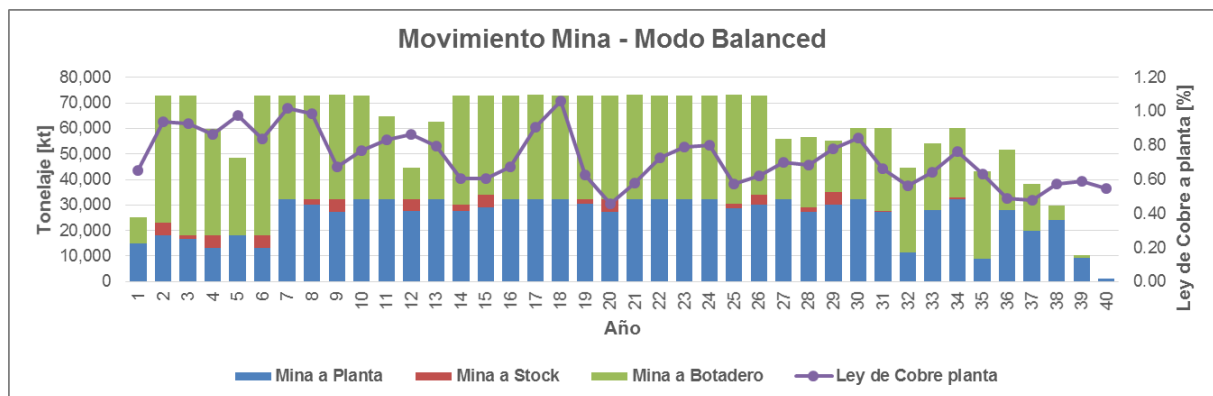


Gráfico 15. Movimiento total - Plan *DeepMine*.

A partir del gráfico anterior se logra contemplar un plan minero de 40 años con una extracción sobre el millón de toneladas de mineral con ley promedio de 0.74. La ley sigue la tendencia esperable al decaer durante la duración del proyecto. Adicionalmente, se observa el pleno uso de la capacidad planta en la mayoría de los años para la planta (salvo últimos años), no así con la capacidad mina, la que no se logra copar totalmente en múltiples periodos.

### 4.3 Comparación con plan Codelco 2015

A continuación se compara el plan estratégico realizado en *DeepMine* con el plan de Codelco 2015 el que fue realizado a través de la metodología tradicional.

#### 4.3.1 Planes mineros

En la Tabla 17 y el Gráfico 16 se exponen las comparaciones respectivas de ambos planes, permitiendo contemplar las diferencias existentes.

Comparación planes mineros			
		Plan Codelco 2015	Plan DM réplica
<b>Año inicio</b>	Año	2016	2016
<b>LOM</b>	Años	43	40
<b>VAN</b>	MUS\$	9,064	10,187
<b>Fino nominal</b>	Kt	9,255	7,891
<b>Fino actualizado (8%)</b>	Kt	2,334	2,446
<b>Ley promedio cobre</b>	%	0.72	0.74
<b>Movimiento total</b>	Kt	2,569,129	2,385,725
<b>Mineral</b>	Kt	1,284,345	1,072,078
<b>Lastre</b>	Kt	1,284,784	1,313,647

Tabla 17. Comparación planes mineros.

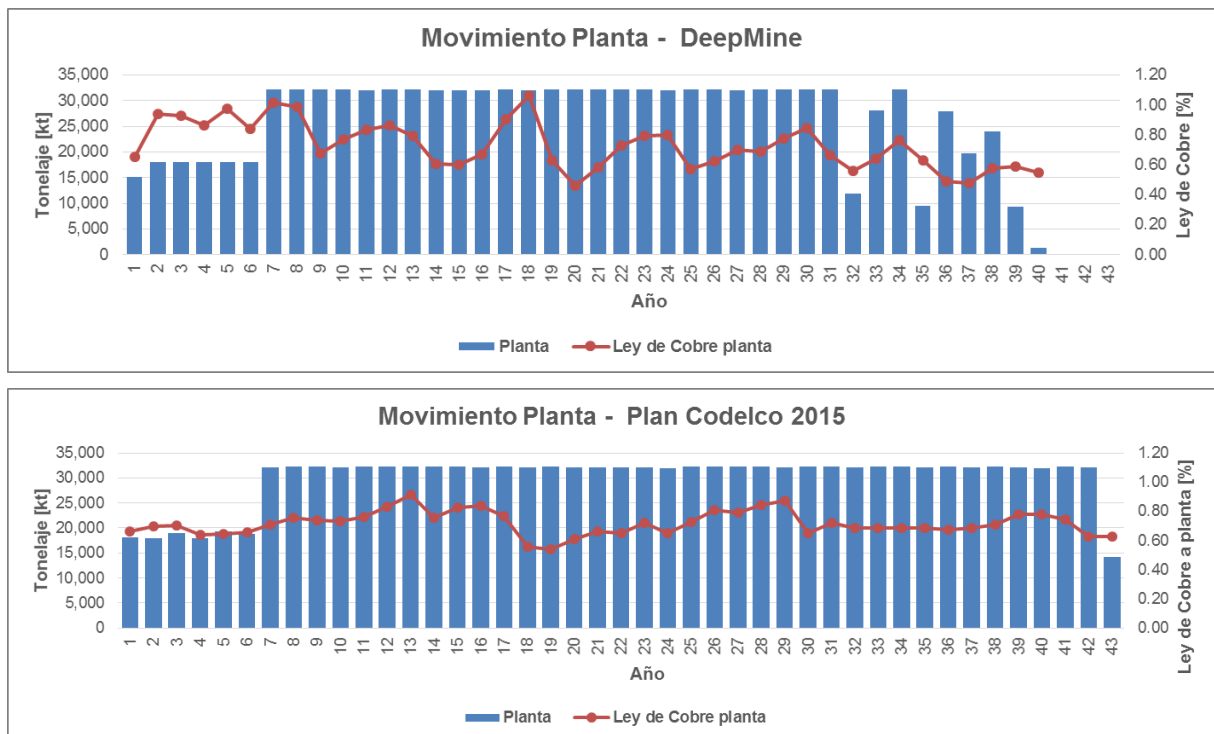


Gráfico 16. Comparación de mineral a planta.

El Gráfico 17 nota las diferencias en relación a la ley de cabeza procesada anualmente para ambos planes.

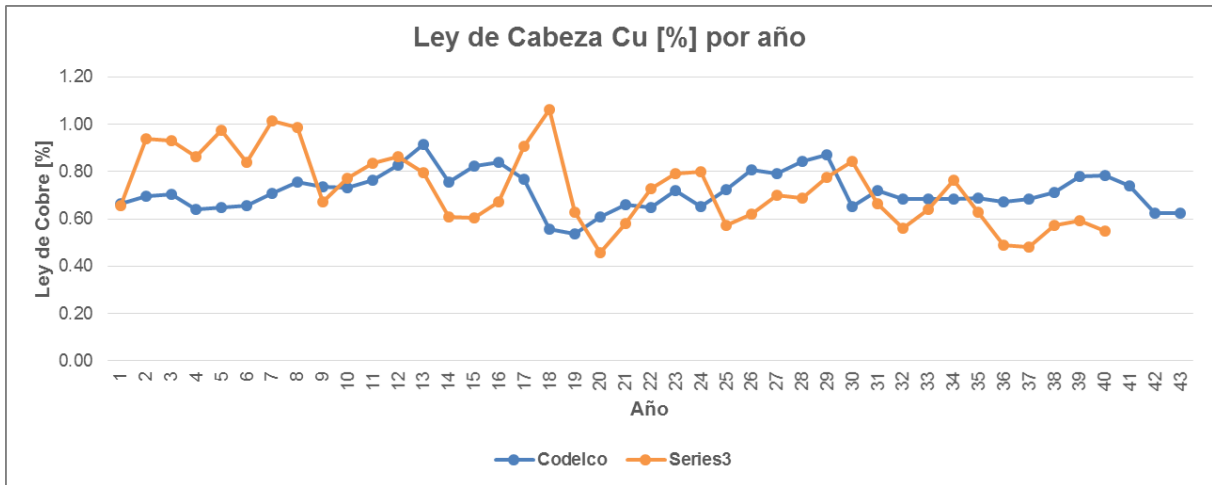


Gráfico 17. Comparación ley de cabeza por año (modelo 07).

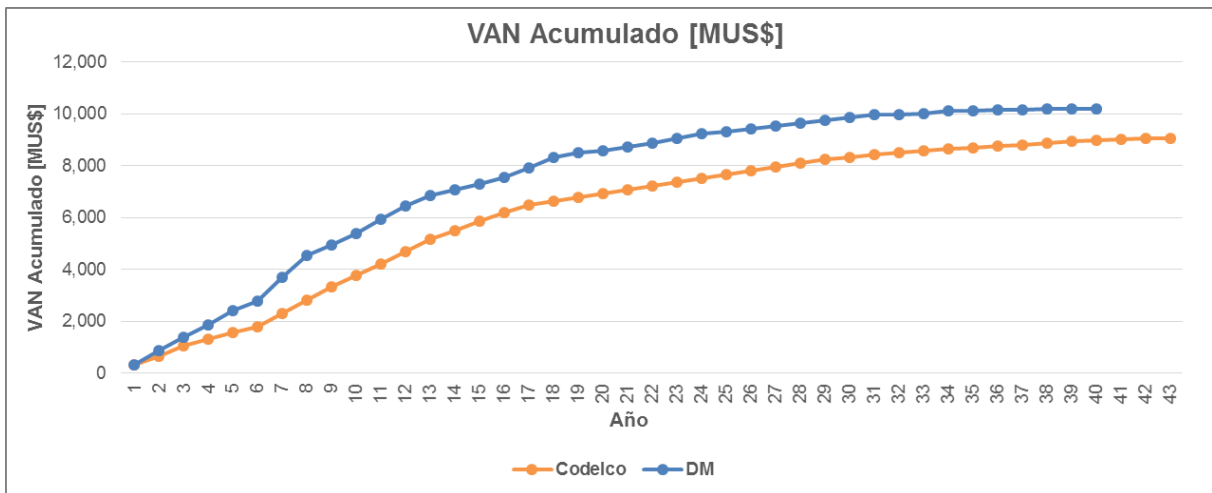
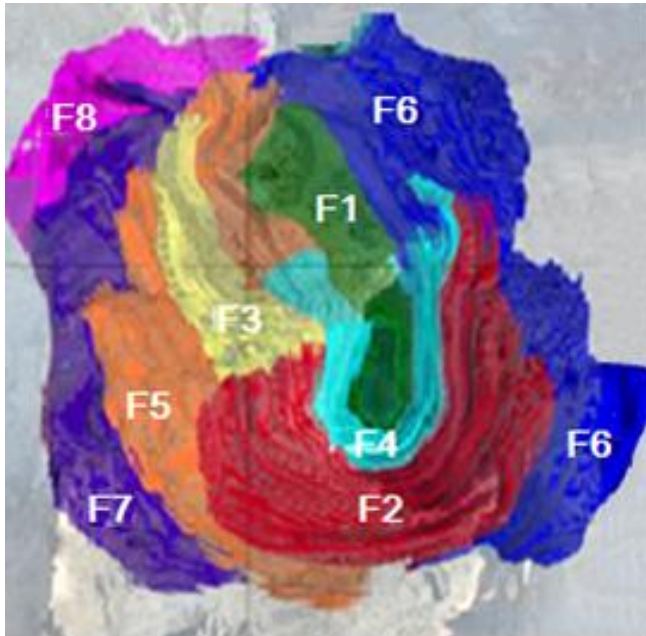


Gráfico 18. VAN Acumulado [MUS\$] (modelo 07).

Lo anterior manifiesta que el plan realizado en *DeepMine* si bien extrae una menor cantidad de material total, mineral y fino nominal se obtiene una mayor cantidad de fino actualizado, esto se debe principalmente a que *DeepMine* logra adelantar los 8 primeros años mejores leyes en relación a la metodología tradicional (Gráfico 17), esto trae consigo mayor valor en VAN (Gráfico 18).

### 4.3.2 Fases y secuencia

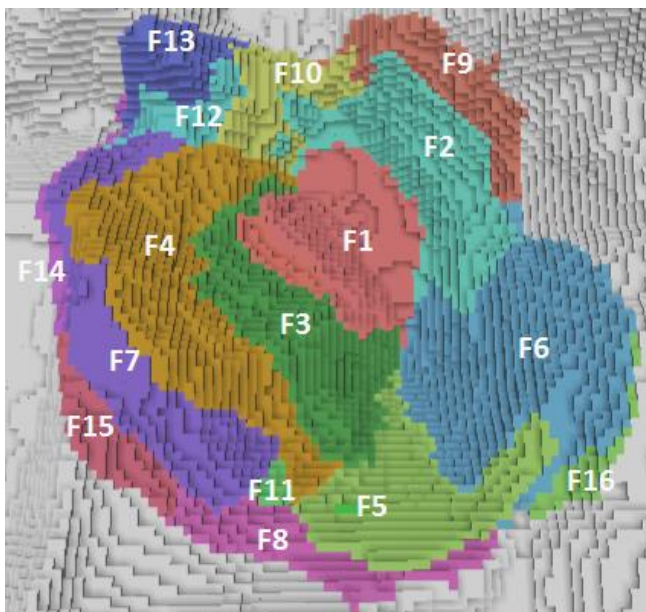
La Ilustración 23 y la Ilustración 24 proveen de vistas en plantas de los rajos finales junto con tablas resumen con reportes de sus respectivas fases. Esto permite contrastar las formas y las secuencias de las fases entre ambos planes mineros.



	Esteril	Mineral	Total	Ley Cu
	Mt	Mt	Mt	%
F1	51	57	108	0.72
F2	153	35	188	0.65
F3	29	9	38	0.74
F4	64	141	205	0.89
F5	179	144	323	0.85
F6	374	201	575	0.81
F7	386	267	653	0.76
F8	360	181	541	0.76
Total	1,596	1,035	2,631	0.79

Mineral mayor a 0.5% ley de Cu

Ilustración 23. Secuencia de fases - Plan Codelco 2015.



	Esteril	Mineral	Total	Ley Cu
	Mt	Mt	Mt	%
F1	43	62	105	0.88
F2	117	24	142	0.87
F3	82	79	160	1.00
F4	176	120	297	0.79
F5	37	75	111	0.75
F6	184	151	336	0.78
F7	232	188	420	0.67
F8	12	1	14	0.48
F9	78	66	144	0.65
F10	45	39	84	0.73
F11	51	64	116	0.63
F12	55	52	107	0.85
F13	106	67	173	0.71
F14	15	21	35	0.53
F15	69	57	126	0.50
F16	12	5	17	0.42
Total	1,315	1,072	2,387	0.74

Ilustración 24. Secuencia de fases - Plan DeepMine.

Dentro de las similitudes observadas, se destaca que ambos planes comienzan la explotación en el fondo del rajo a través de la fase 1 con cerca de 60 Mt de mineral. Así mismo la forma de los rajos finales es similar, sin embargo el pit final *DeepMine* es cerca de 300 Mt más pequeño.

Las diferencias más notorias vienen dadas por la temprana explotación del sector N-E del rajo en el plan *DeepMine* (fase 2 en *DeepMine* y parte norte de fase 6 en el plan Codelco), fase que si bien contempla mayoritariamente laste, proporciona mineral de alta ley en los primeros 5 años. Adicionalmente, se observa que las fases 3 y 4 de *DeepMine* proveen en conjunto cerca de 200 Mt de ley 0.87% dentro de los primeros 10 años del proyecto, valores superior comparado a lo que ofrece el plan Codelco cuyas fases análogas no superan en ley los 0.8% en esos mismo años .

Lo anterior permite concebir nuevas nociones de explotación para este yacimiento, adelantando sectores de alta ley que impactarían de manera positiva en la captura de valor final del proyecto.

# CAPÍTULO 5

---

## 5 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO SOFTWARE *DEEPMINE*

En este capítulo se presentan una serie de ejercicios de prueba utilizando el software *DeepMine* con motivo de evaluar y corroborar un adecuado comportamiento bajo determinadas situaciones.

En concreto en este capítulo se revisa lo siguiente:

- **Alcances de los modos de resolución:** Se realizan planes mineros a través de los 3 modos de resolución disponibles en el software (*Quick*, *Balanced* y *Deep*), con objeto de evaluarlos en función de su calidad y del tiempo de procesamiento que requieren. A partir de los resultados, se entregan recomendaciones para el uso de los distintos modos.

Este ejercicio se realiza sobre el modelo 07.

- **Concepto de costo de oportunidad:** Se realizan diversas pruebas para corroborar que el software sea capaz de tomar decisiones en función de escenarios económicos futuros. En primer lugar se realiza un plan base con parámetros habituales y típicos en la minería a cielo abierto, luego en segunda instancia se realiza un plan donde súbitamente durante 10 años sube el precio del cobre de 3 a 20 US/lb y finalmente se realiza un plan donde durante los mismos 10 años existe un aumento considerable del costo planta de 10 a 30 US/t. Se comparan los resultados.

Este ejercicio se realiza sobre el modelo 07 utilizando el modo de resolución *Balanced*.

- **Vida del proyecto como *input*:** Se realizan ejercicios para comprobar que el software sea sensible a cambios en la duración del proyecto en lo que respecta a la obtención de resultados óptimos. Se realizan planes con LOM máximo de 35, 30, 20 y 10 años. Se comparan los resultados.

Este ejercicio se realiza sobre el modelo 07 utilizando el modo de resolución *Deep*.

- **Oportunidades de mejora:** Se presentan una serie de falencias que se reportaron a lo largo de la realización de este trabajo. Cabe destacar que estas falencias son propias de los ejercicios en particular realizados en este trabajo y no se generalizan.

Estos ejercicios se realizan sobre los modelo 05 y 07, utilizando en diferentes casos los modos de resolución *Balanced* y *Deep*,

### 5.1 Alcances de los modos de resolución

El software *DeepMine* posee tres modos de resolución; *Quick*, *Balanced* y *Deep*, en los ejercicios expuestos en los capítulos anteriores se empleó el modo *Balanced*, el cual según el proveedor entrega resultados balanceando el tiempo de resolución *versus* el VAN. A continuación se muestran los resultados de ejercicios que logran evidenciar las diferencias existentes entre estos tres modos (Gráfico 19, Gráfico 20, Gráfico 21):

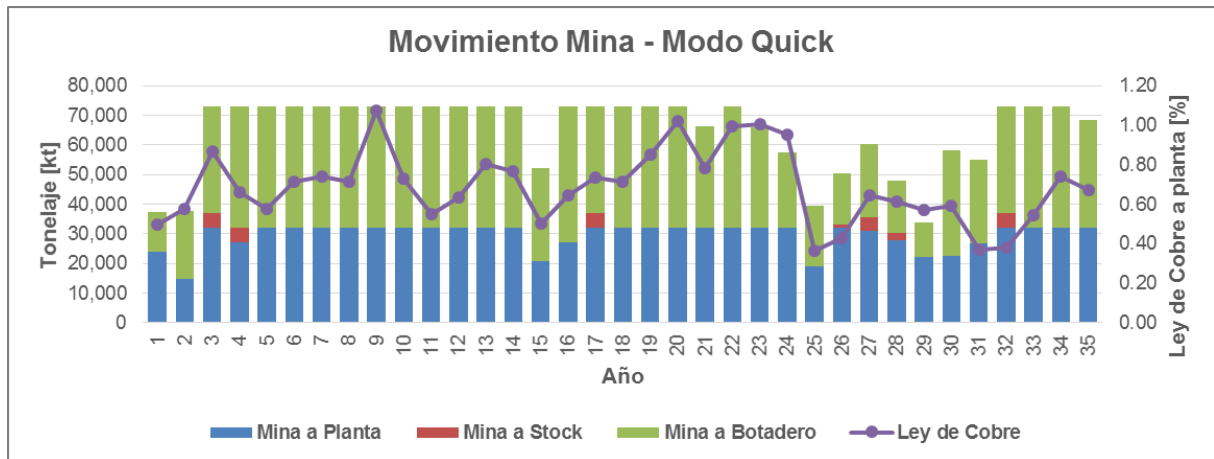


Gráfico 19. Movimiento mina – Modo *Quick*.

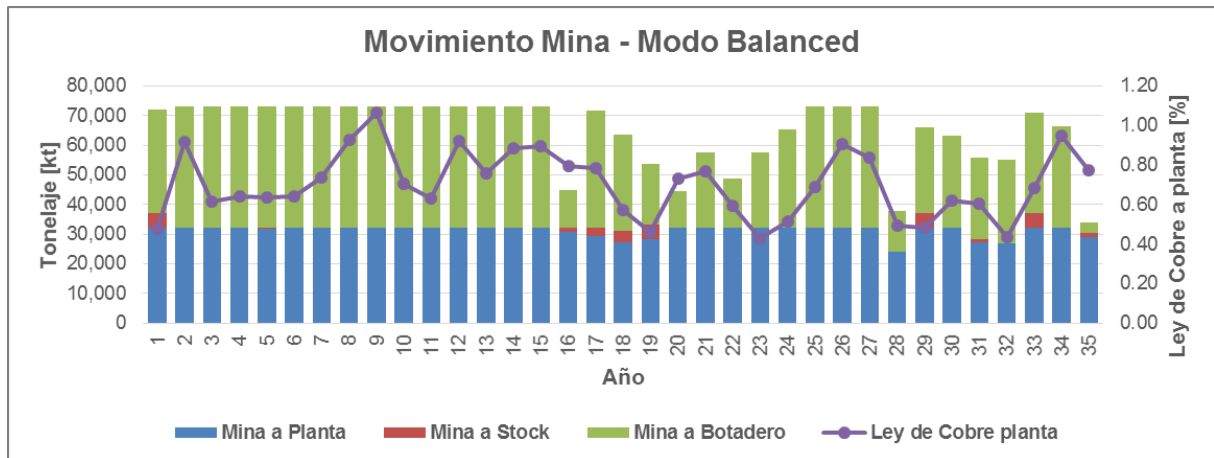


Gráfico 20. Movimiento mina – Modo *Balanced*.



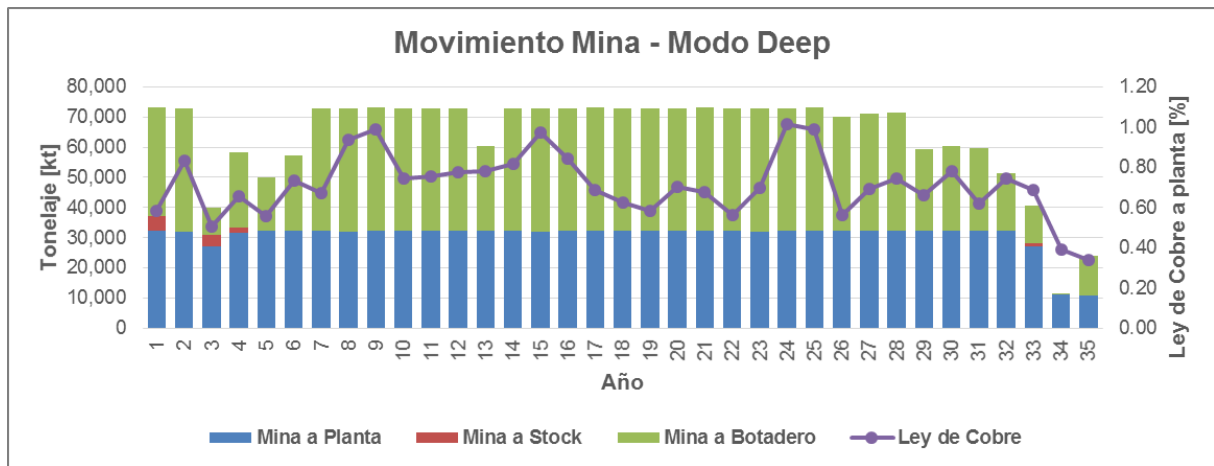


Gráfico 21. Movimiento mina – Modo Deep.

Como se advierte en los gráficos anteriores, el modo *Quick* es el más deficiente en lo que respecta a llenado de planta y uso de capacidad mina disponible, por su parte, el modo *Balanced* y *Deep*, logran llenar satisfactoriamente la planta, mientras que ambos poseen algunas deficiencias en la utilización total de la capacidad mina

A continuación se presenta un resumen de los tres planes mineros:

Comparación de modos de resolución DM				
		<i>Quick</i>	<i>Balanced</i>	<i>Deep</i>
<b>LOM</b>	Años	35	35	35
<b>VAN</b>	MUS\$	9,704	10,693	10,797
<b>Fino nominal</b>	Kt	7,372	7,862	7,849
<b>Fino actualizado (8%)</b>	Kt	2,446	2,679	2,680
<b>Ley promedio cobre</b>	%	0.70	0.70	0.72
<b>Movimiento total</b>	Kt	2,264,679	2,270,092	2,246,000
<b>Mineral</b>	Kt	1,062,536	1,120,370	1,083,341
<b>Lastre</b>	Kt	1,202,143	1,149,685	1,162,642
<b>Tiempo procesamiento</b>	Min	4	25	186

Tabla 18. Tabla comparativa entre planes *Quick*, *Balanced* y *Deep mode*.

A través de la tabla anterior, es posible destacar que el VAN es creciente en función del modo de resolución, debido a que al pasar a modos de resolución más avanzados, el algoritmo es capaz de evaluar mayores cantidades de estados, logrando mejores soluciones. Esto se comprueba en el aumento de la ley promedio y el mayor fino actualizado en el modo *Deep*.

En lo que respecta al tiempo de procesamiento, este aumenta casi exponencial. Para constatar de forma más clara este comportamiento el Gráfico 22 compara el VAN y el tiempo de procesamiento para los tres modos de resolución disponibles.

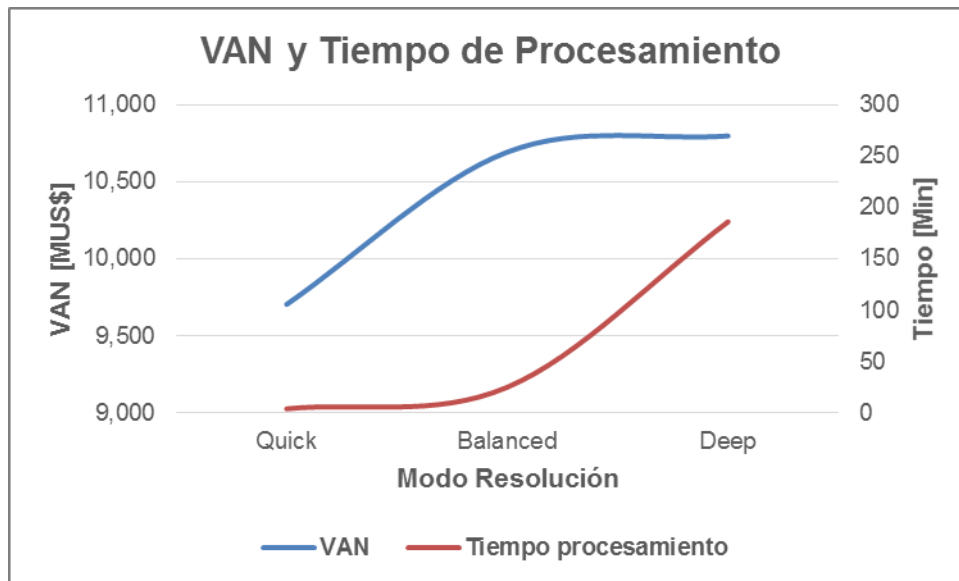


Gráfico 22. VAN y tiempo de procesamiento por modo de resolución.

Por lo que se concluye que, en este ejercicio en particular, el modo *Balanced* alcanza el 99% del VAN del modo *Deep* en 7 veces menos de tiempo.

En término de calidad de fases encontradas no parece haber diferencia, esto se explica a que las heurísticas y formas de solución no difieren, sino que solo en las alternativas evaluadas para buscar el mejor plan.

A partir de lo anterior, se recomienda el uso del modo *Balanced* para los diferentes estudios estratégicos, dado que equilibra en correcta forma la calidad en el plan con un relativo bajo tiempo de procesamiento. Ahora bien, se recomienda el uso del modo *Quick* en situaciones que requieran respuestas sumamente rápidas y el modo *Deep* para optimizar un plan final definitivo obtenido través del modo *Balanced*.

## 5.2 Concepto de costo de oportunidad

Se realizan ejercicios para comprobar que el software sea capaz de tomar decisiones en función de escenarios económicos futuros, para ello se elaboran los siguientes planes:

- “Plan base”: precio del cobre 3 US/lb, costo planta 10 US/lb y tasa de descuento de 8% para toda la vida de la mina.
- “Plan precio del cobre”: aumento del precio del cobre de 3 a 20 US/lb durante un periodo de 10 años.
- “Plan costo planta”: aumento del costo planta de 10 a 30 US/t durante un periodo de 10 años.

Los resultados de estos planes se exhiben a continuación:

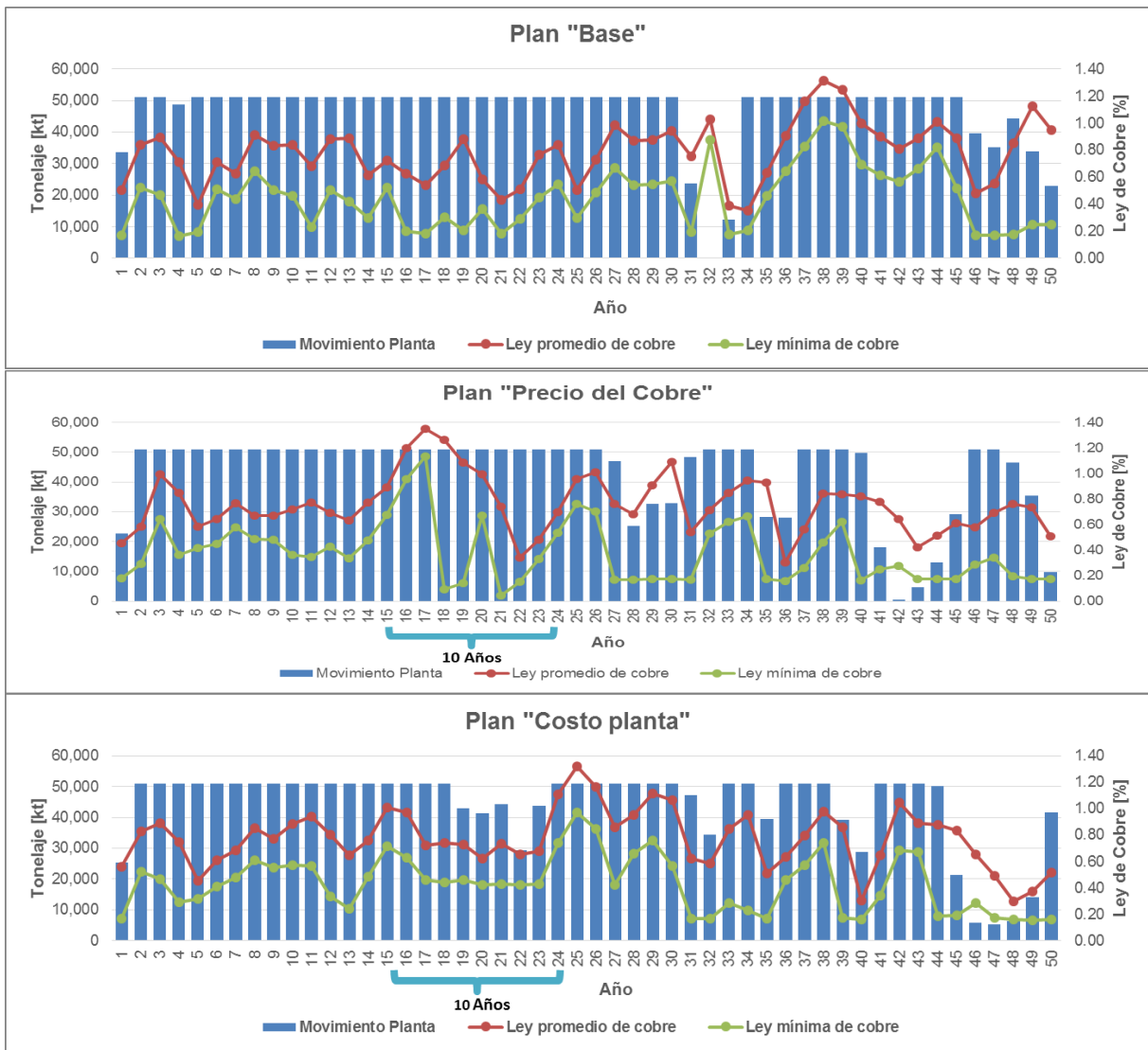


Gráfico 23. Planes costo de oportunidad.

A partir de estas pruebas se logra constatar que el software es capaz de evaluar situaciones futuras en la toma de decisión, ya que extrae las mejores leyes dentro de los períodos con mayor precio del cobre, produciendo mayor beneficio. Para años con costos altos, el software disminuye la ley promedio y aumenta la ley mínima, lo que es lógicamente esperable (Gráfico 23).

### 5.3 Vida del proyecto

Se realizan ejercicios para comprobar que el software sea sensible a cambios en la duración del proyecto en lo que respecta a la obtención de resultados óptimos.

Estas pruebas se desarrollan para los tres modos de resolución, a continuación se exhiben los resultados del modo *Deep* ya que este debiese responder de mejor forma a dichos cambios.

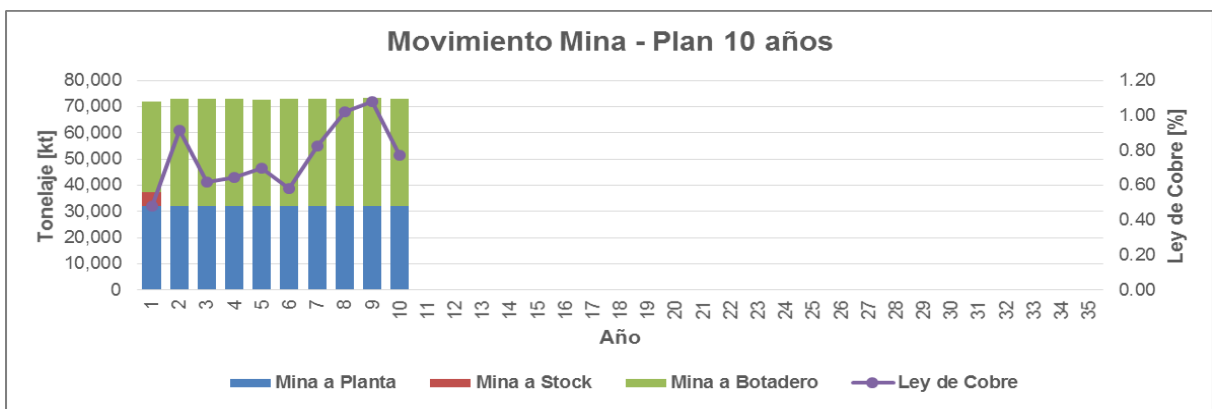
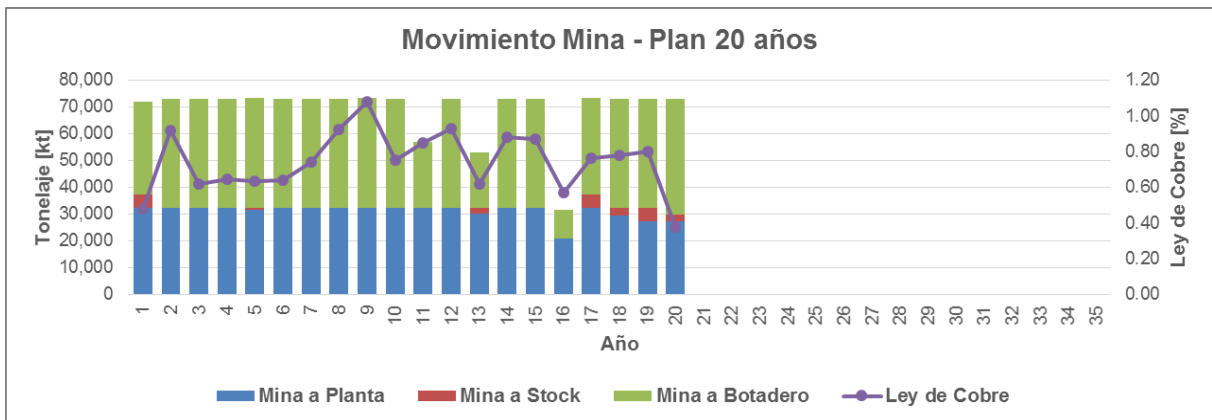
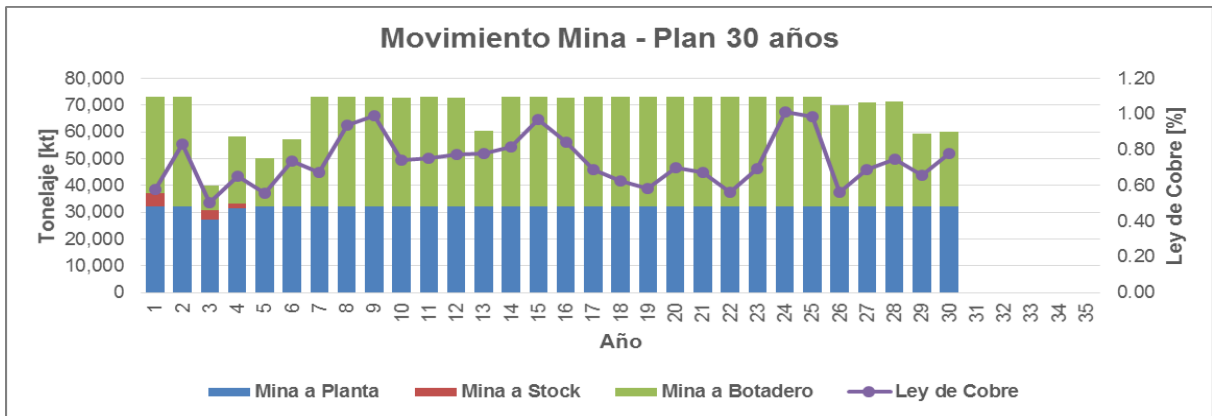
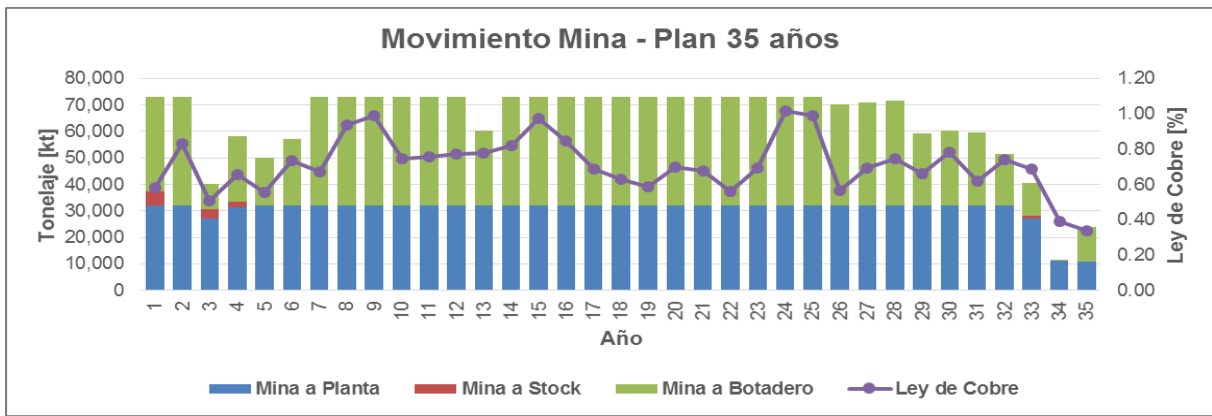


Ilustración 25. Gráficos de ejercicios variando la vida de la mina. Modo *Deep*.

A través de los gráficos de la Ilustración 25, se logra observar que existen diferencias en los planes en términos de leyes y movimientos de material en función de la duración del proyecto. Se evidencia, por ejemplo, que al variar de 20 a 30 años la vida de la mina implica un cambio en la secuencia desde el año 3, por lo tanto, este modo de resolución sí reacciona a cambios en este *input*. Cabe destacar que los modos *Quick* y *Balanced* también reaccionan de esta manera pero sus diferencias son menos significativas.

El Gráfico 24 corrobora lo anterior, se grafica el VAN acumulado por año para los planes de 10, 20 y 30 años, donde se observa que al aumentar el largo de la vida del proyecto las estrategias difieren en particular en los últimos años. En términos de VAN estas diferencias son bajas y no superan el 5% del valor.

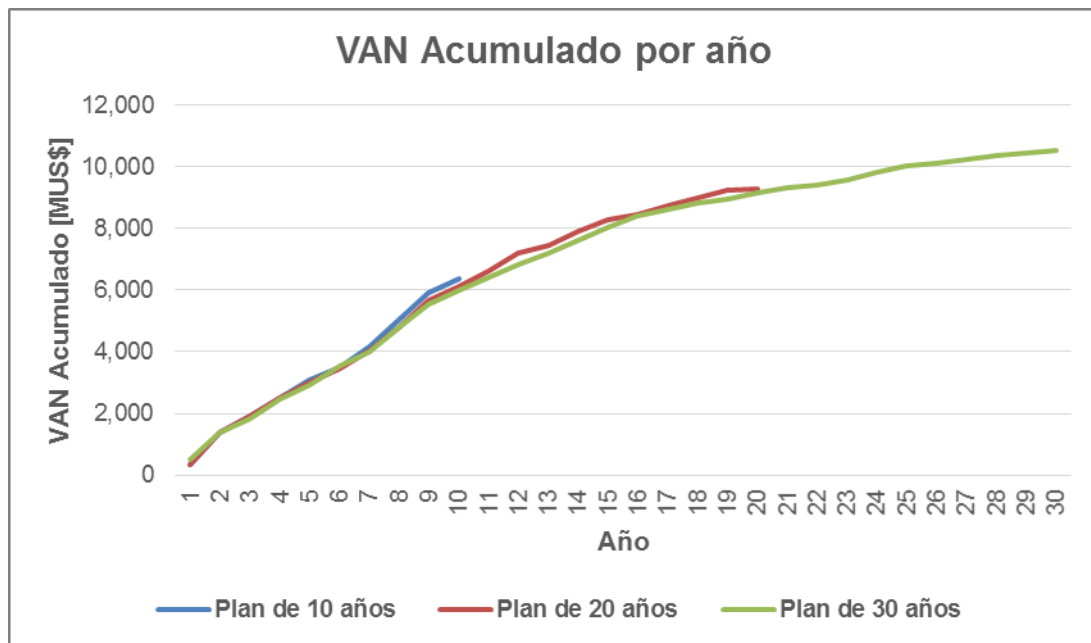


Gráfico 24. Van acumulado por año. Planes *Deep* 10,20 y 30 años.

## 5.4 Oportunidades de mejoras

A partir del uso de la versión de *DeepMine* 2.2.8 y durante la realización de este trabajo, se observan y reportan una serie de falencias que pueden servir como oportunidades de mejora, estas son detalladas a continuación:

### 5.4.1 Fases

En algunos planes en particular, el software tiende a crear fases no factibles operacionalmente en últimos años del proyecto, ya sean excesivamente angostas, de ínfimo tonelaje (Ilustración 26). Asimismo, en ciertas ocasiones se crean fases finales de VAN negativo (Ilustración 27 y Tabla 19).

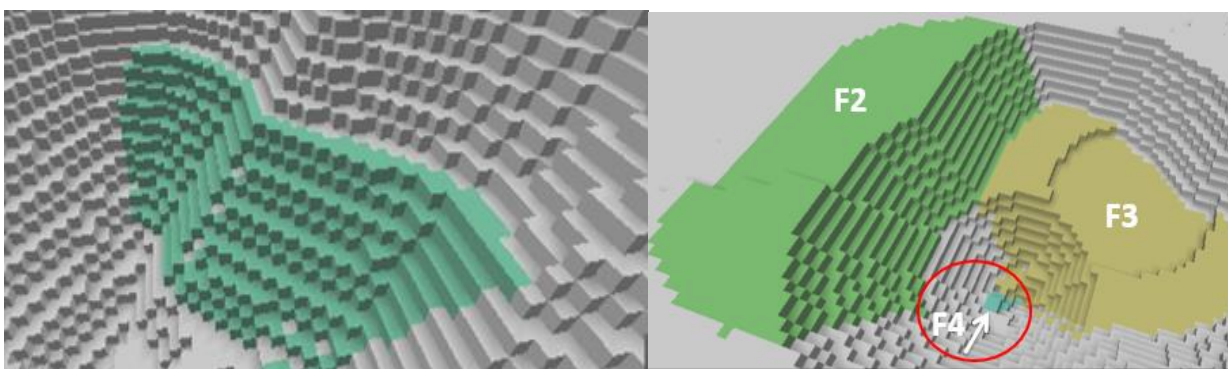


Ilustración 26. Fases infactibles y de ínfimo tonelaje.

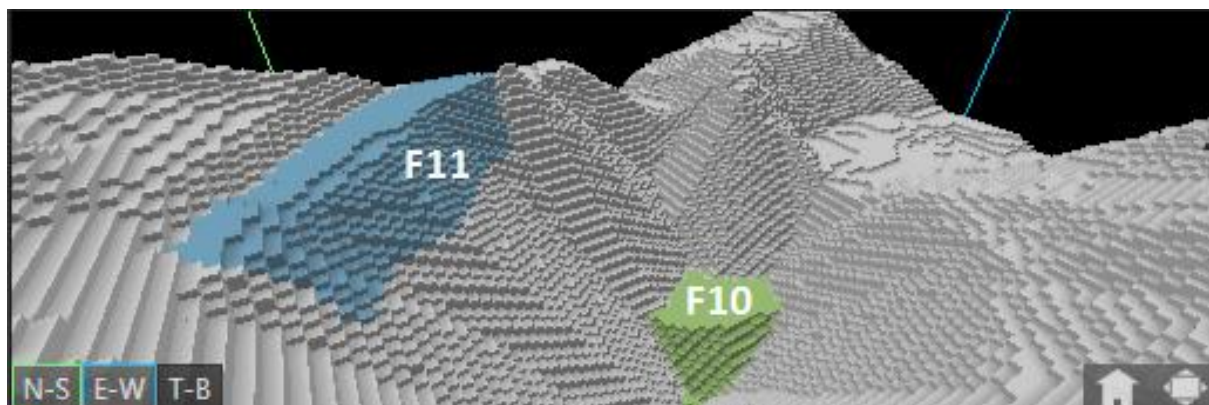


Ilustración 27. Vista pit final (Fase 11 y fase 10). Plan LOM 20 años.

Resumen fase 11. Plan <i>Deep</i> 20 años		
Flujo caja descontado	MUS\$	-33
Movimiento total	Kt	125,129
Mineral	Kt	28,852
Estéril	Kt	96,278

Tabla 19. Resumen fase 11, plan *Deep* 20 años.

A través de la Ilustración 27 y la Tabla 19 se constata que la inclusión de la fase 11 solo empeora los beneficios obtenidos del pit (basta no extraer la fase 11 y se obtiene mejor VAN). Por lo tanto, si bien el software es capaz de responder a cambios de la vida del proyecto, estos no son suficiente para garantizar una solución intuitivamente óptima en todos los casos evaluados.

#### 5.4.2 Ley mínima a planta

Si bien, en los reportes *DeepMine* entrega resultados anuales de “*Cut-off*”, esto no representa una ley de corte, sino más bien una ley mínima a destino. Esto viene dado porque las evaluaciones de destinos se hacen en base a una optimización del beneficio económico y el costo oportunidad.

Dado lo anterior, se realizan ejercicios introduciendo como restricción una ley mínima a planta de 0.3% de cobre para un plan del modelo 07. Los resultados son los siguientes:

	Unidad	Sin restricción	Con restricción	Diferencia [%]
<b>VAN</b>	MUS\$	9,719	10,189	5
<b>LOM</b>	Años	43	43	0
<b>Ley promedio cobre</b>	%	0.70	0.70	-1
<b>Movimiento total</b>	Kt	2,332,976	2,408,181	3
<b>Mineral</b>	Kt	1,167,568	1,077,775	-8
<b>Lastre</b>	Kt	1,165,408	1,330,405	14
<b>Fino nominal</b>	Kt	7,229	7,918	10
<b>Fino actualizado</b>	Kt	2,084	2,153	3

Tabla 20. Ejercicio ley mínima a planta.

Por ende, es posible lograr mejores resultados de VAN, restringiendo la ley del mineral que entra a planta. Cabe destacar que esta conclusión se enmarca para este ejemplo en particular y no se asegura el mismo efecto en otros depósitos.

#### 5.4.3 Estabilidad

Vale decir que, en algunas ocasiones (menor al 1% de las veces), al realizar “*corridas*” en modo *Deep*, el software falla sin mostrar alguna solución (Ilustración 15). También, en otras situaciones (menor al 5% de las veces) el programa deja de funcionar sin previo aviso.



MP	Plan 1 88ktpd DEEP	Failed Task	Added 9/24/2015 5:38:28 PM
			Started 9/24/2015 9:29:34 PM
			Elapsed 3:32:11
MP	Plan 1 88ktpd DEEP	Failed Task	Added 9/24/2015 5:38:11 PM
			Started 9/24/2015 5:38:11 PM
			Elapsed 3:51:06

Ilustración 28. Ejemplo de falla en una corrida de planes.



# CAPÍTULO 6

---

## 6 CONCLUSIONES

### Conclusiones generales

A partir del trabajo realizado se puede concluir lo siguiente:

La metodología evaluada en este trabajo otorga nuevos abanicos de soluciones que impactarían de manera positiva en el valor final de un proyecto. Esto se debe principalmente a que se introduce en el inicio de la etapa de la planificación (etapa de definición de la secuencia) el concepto del valor del dinero en el tiempo, concediendo guías de fases más sólidas para una posterior etapa de diseño.

Dentro de los puntos a favor, se comprueba que la herramienta *DeepMine* puede ser empleada para definir el valor potencial de un yacimiento dado que logra resultados coherentes en términos de VAN; resultados que son cuantitativa y cualitativamente superiores que los proporcionados por la metodología tradicional (*Whittle*) dentro de un análisis estratégico. Asimismo, este software permite generar de forma sencilla nociones de los ritmos apropiados para llevar a cabo la explotación. Además, su uso es factible en la definición de secuencias de extracción.

Por otra parte, si bien *DeepMine* posee un tiempo de procesamiento mayor que *Whittle*, este no alcanza a ser significativo y aún faculta la producción de una serie de planes en tiempos reducidos y el análisis de múltiples opciones con objeto de alcanzar un mejor valor del yacimiento.

A su vez, la interfaz del software es simple, lo que canaliza un manejo casi intuitivo, a diferencia de otros programas que son más complejos de manejar. *DeepMine* proporciona una visualización clara y didáctica de los resultados en todo momento.

Entre los puntos en contra, se detectan una serie de falencias entre las que destacan: inestabilidad del software, poca regularidad en los movimientos, fases no operativizables y fases terminales de lastre. Aun así, cabe destacar que es un software joven con solo tres años en el mercado por lo que es amplia la posibilidad de una mejora progresiva y sustancial.

Finalmente, se concluye que la metodología evaluada va en la dirección correcta, es decir, es coherente a lo que la industria requiere: apoyar la captura del máximo valor del depósito, alcanzable en la teoría solo con enfoques globales de optimización. Por lo tanto, y a partir de los resultados de este trabajo, se concluye que *DeepMine* puede contribuir favorablemente en el proceso de planificación estratégica, facilitando procesos de toma de decisiones, proporcionando secuencias de extracción de fases robustas para posteriores etapas de diseño y entregando soluciones más completas en base a enfoques globales de optimización, todo esto en comparación con herramientas que se basen en la metodología tradicional. Cabe destacar que su uso es propicio siempre que se use criteriosa y rigurosamente, entendiendo los alcances y limitaciones de este.

## Recomendaciones y trabajo futuro propuesto

Se recomienda el uso del software *DeepMine* en estudios estratégicos que requieran evaluaciones de múltiples opciones dado que: es una herramienta intuitiva de utilizar, posee tiempos de procesamiento bajos, entrega guías de fases y secuencias más definidas en comparación con la metodología tradicional. Adicionalmente, se recomienda el uso de esta herramienta debido a que la base de su funcionamiento va en dirección de enfoques globales de optimización.

Para trabajos futuros y de manera de complementar este estudio, se deja propuesto realizar planes mineros que incluyan diseños para ambas metodologías, generando así, planes de producción con nivel de detalle táctico que permitan una comparación completa constatando el impacto a nivel global de las diferentes secuencias de extracción, no focalizándose solo en la planificación estratégica.

Adicionalmente, se recomienda para posteriores trabajos, evaluar los modos estocásticos y flexibles del software *DeepMine*, de manera de cuantificar el impacto de introducir conceptos de incertidumbre de precios en la elaboración de planes mineros estratégicos.

## 7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Acosta, R. 2014. Metodología para la definición de fases a partir de un secuenciamiento de bloques en un rajo abierto, Memoria de Ingeniería Civil de Minas. Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 136 p.
- [2] Bellman, Richard, Dreyfus, Stuart. 1962. Applied Dynamic Programming. Princeton University Press, New Jersey.
- [3] Cacceta, L., Hill, S. 2003. An application of branch and Cut to Open Pit Mine Scheduling. Journal of Global Optimization, No. 27, pp. 349-365.
- [4] Cai, W. 2001. Design of open-pit phases with consideration of schedule constraints.
- [5] Castillo, L. 2009. Modelos de optimización para la planificación minera a cielo abierto, Memoria de Ingeniería Civil de Minas. Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 60 p.
- [6] Deck, C., Guzmán, J., Hinrichsen, C., Lichtin, C., Rademacher, M., Cancino, R., Henríquez, J., Jara, E., Morales, G., Echeverría, A., Juárez, G., Recabarren, M., Ronda, J., Vila-Echague, E. 2013. Flexible stochastic planning: the ultimate frontier. Mine Planning. Santiago de Chile.
- [7] Dowd, P.A., Onur, A.H. 1992. Optimising open pit design and sequencing. Proceedings the 26th symposium on the Application of Computers and Operations research in the Mineral Industry, Chapter 42, pp. 411-422.
- [8] Echeverría, A., Juárez, G., Recabarren, M., Ronda, J., Vila-Echagüe, E., Deck, C., Guzmán, J. I., Hinrichsen, C., Lichtin, C., Rademacher, M., Cancino, R., Henríquez, J., Jara, E., Morales, G. 2013. Open pit strategic mine planning under uncertainty – robust and flexible plans. Proceedings 36th Applications of Computers and Operations Research in the Mineral Industry, pp 482–491.
- [9] Espinoza, D., Goycolea, M., Moreno, E., Newman, A. 2012. MineLib: A library of open pit mining problems.
- [10] Gaupp, M. 2008. Methods for improving the tractability of the block sequencing problem for an open pit mine, pp. 15-22.
- [11] Gershon, M. 1987. Heuristic approaches for mine planning and production scheduling. International Journal of Mining and Geological Engineering, No.5, pp. 1-13.
- [12] Gleixner, A. 2008. Solving large-scale open pit mining production scheduling problems by integer programming. Instituto de matemática. Berlín. Alemania.
- [13] Hinrichsen, C. 2015. Planificación minera de largo plazo: ¿táctica o estratégica?

- [14] Jonhson, T. 1969. Optimum open-pit mine production scheduling. A decade of digital computing in the mineral industry – A Review of the State-of-the-Art, p. 539-562.
- [15] Juarez, G., Dodds, R., Echeverria, A., Guzman, J., Recabarren, M., Ronda, J., Vila-Echague, E. 2014. Open pit strategic mine planning with automatic phase generation. Orebody modelling and strategic mine planning symposium. perth, Australia.
- [16] King, B. 2000. Schedule optimisation of large complex mining operations. APCOM Conference. Denver. EEUU.
- [17] Kovorob, S. 1974. Method for determining optimal open pit limits. Rapport Technique ED 74- R-4; Dept. of Mineral Engineering; Ecole Polytechnique de Montreal; Canada.
- [18] Lagos, G. 2011. Estudio de métodos de optimización robusta para el problema de planificación de producción en minería a cielo abierto, Memoria de Ingeniería Civil de Minas. Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 105 p.
- [19] Lane, K. F. 1964. Choosing the optimum cutoff grade. Quarterly of the Colorado School of Mines.
- [20] Lemieux, M. 1979. Moving cone optimizing algorithm. Computer Methods for the 80's in the Mineral Industry.
- [21] Lerchs, Grossman. 1965. Optimum design of open-pit Mines. Transactions of the Canadian Institute of Mining and Metallurgy, Volume LXVII, pp. 17-24.
- [22] Maurette, M., Ojeda, I. 2006. Programación Dinámica.
- [23] Menabde, M., Stone, P., Law, B., Baird. 2007. A generalized strategic mine planning optimization tool. SME Annual Meeting.
- [24] Newman, A., Rubio, E., Weintraub, A. 2007. A review of operations research in mine planning. Workshop on Operations Research in Mining.
- [25] Pana, M. T. 1965. The simulation approach to open pit design. Preceedings 5 th APCOM Symposium, Tucson Arizona.
- [26] Ramazan, S., Dimitrakopoulus, R. 2004. Recent applications of operations research and efficient MIP formulations in open pit mining, Transactions of the Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Vol. 316, pp 73-78.
- [27] Reeves, C.R. 1995. Modern heuristic techniques for combinatorial problems. McGraw-Hill, United Kingdom.
- [28] Rubio, E. 2006. Block cave mine infrastructure reliability applied to production planning. Thesis (Ph. D.). Vancouver, Canada. The University of British Columbia. The Faculty of Graduate Studies.

- [29] Shapiro, A., Dentcheva, D., Ruszczyński, A. 2009. Lectures on stochastic programming: Modeling and Theory. Society for Industrial Mathematics. 447 p.
- [30] Stone, P., Floyland, G., Menabde, M., Law, B., Pasyar, R., Monkhouse, P. 2007. Blaser-blended iron- ore Mine Planning optimisation at Yandi, Orebody Modelling and Strategic Mine Planning, Perth, Australia, pp. 285-288.
- [31] Vargas, M. 2011. Modelo de planificación de minería de corto y mediano plazo incorporando restricciones operacionales y de mezcla. Tesis para optar al grado de Magíster en Minería, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería de Minas.
- [32] Whittle, J. 1998. Four-X User Manual. Whittle Programming Pty Ltd. Melbourne, Australia, p. 12-23.

## ANEXO A

Litología	Frecuencia	Mínima ley cobre [%]	Máxima ley cobre [%]	Ley promedio cobre [%]	Desv. Estándar [%]
A	207,799	0.00	0.04	0.00	0.00
B	6,505	0.00	0.00	0.00	0.00
C	628	0.13	0.63	0.40	0.10
D	21,238	0.00	0.63	0.24	0.07
E	42,398	0.00	1.47	0.38	0.14
F	185,111	0.00	0.75	0.11	0.06
G	1,942	0.00	0.67	0.29	0.15
H	239,394	0.00	1.71	0.33	0.13
I	650,597	0.00	1.32	0.25	0.09
J	1,724	0.00	1.34	0.45	0.23
K	1,100,746	0.00	0.48	0.09	0.03
M	171,358	0.00	0.49	0.03	0.01
<b>Total</b>	<b>2,629,440</b>	<b>0.00</b>	<b>1.71</b>	<b>0.17</b>	<b>0.12</b>

Tabla 21. Estadísticas de leyes por litología.

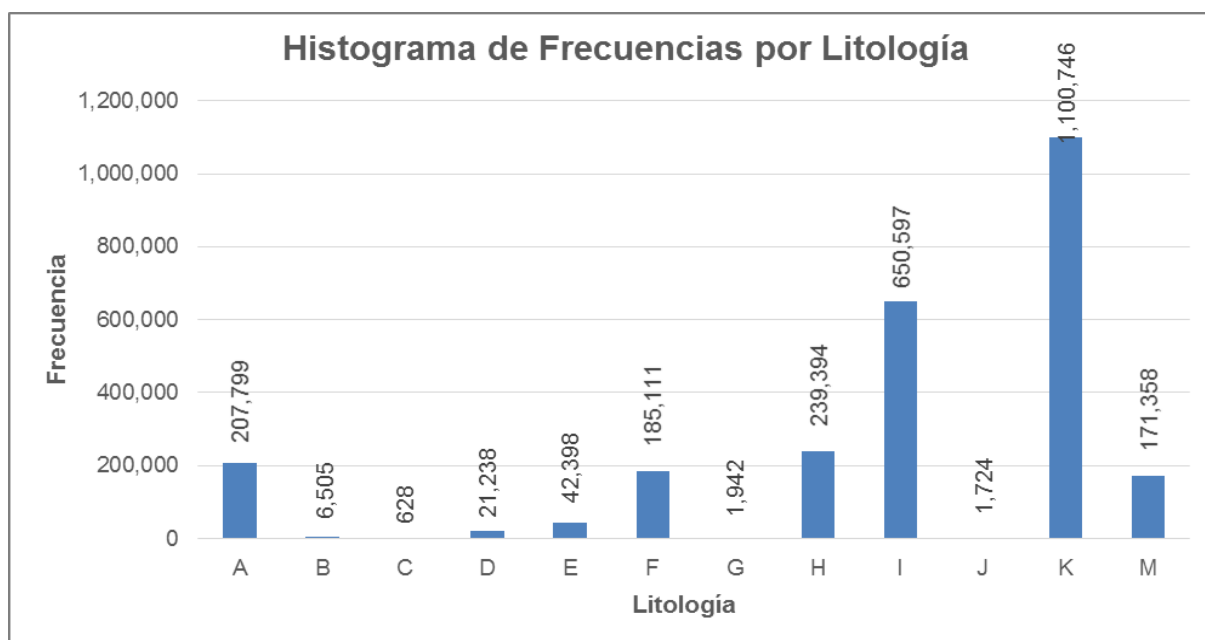
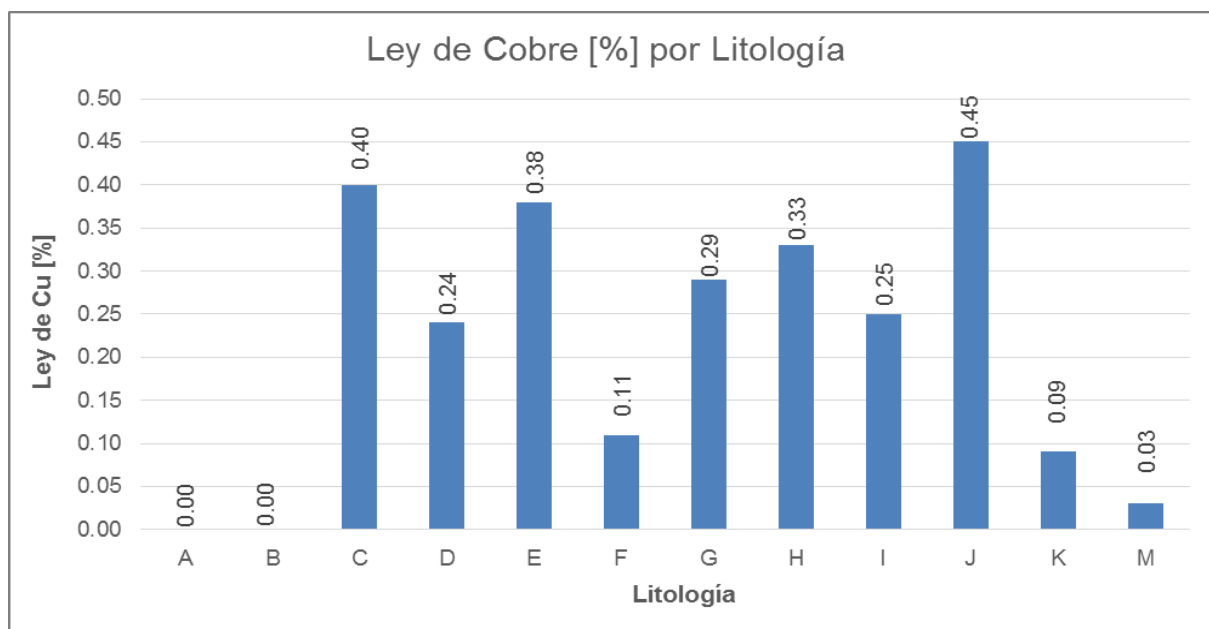


Gráfico 25. Histograma de frecuencia por litología.



**Gráfico 26. Ley promedio de Cobre por litología.**

## ANEXO B

## Estadísticas por litología modelo 07

Litología	Frecuencia	Mínima ley cobre [%]	Máxima ley cobre [%]	Ley promedio cobre [%]	Desv. Estándar [%]
A	586,237	0.00	0.00	0.00	0.00
B	1,599,570	0.00	3.52	0.28	0.32
C	10,838	0.00	0.79	0.01	0.06
D	2,676	0.00	0.14	0.00	0.01
E	561	0.00	0.39	0.01	0.03
F	5,485	0.01	1.35	0.46	0.29
G	12,233	0.01	1.79	0.46	0.29
<b>Total</b>	<b>2,217,600</b>	<b>0.00</b>	<b>3.52</b>	<b>0.21</b>	<b>0.30</b>

Tabla 22. Estadísticas de leyes por litología.

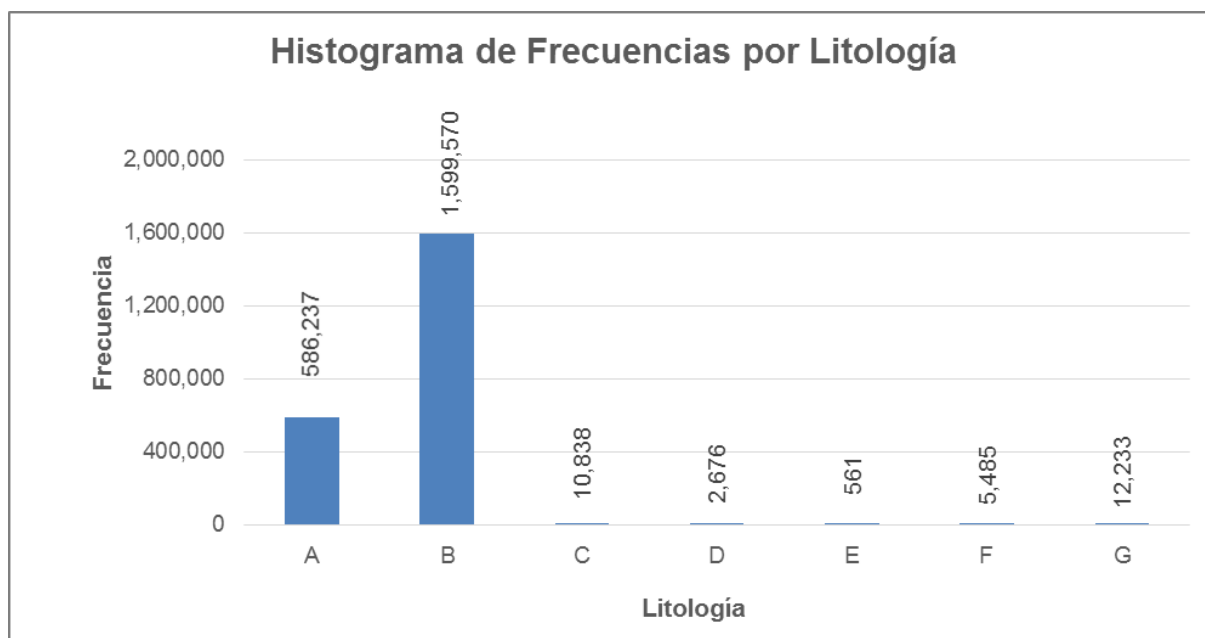


Gráfico 27. Histograma de frecuencia por litología.



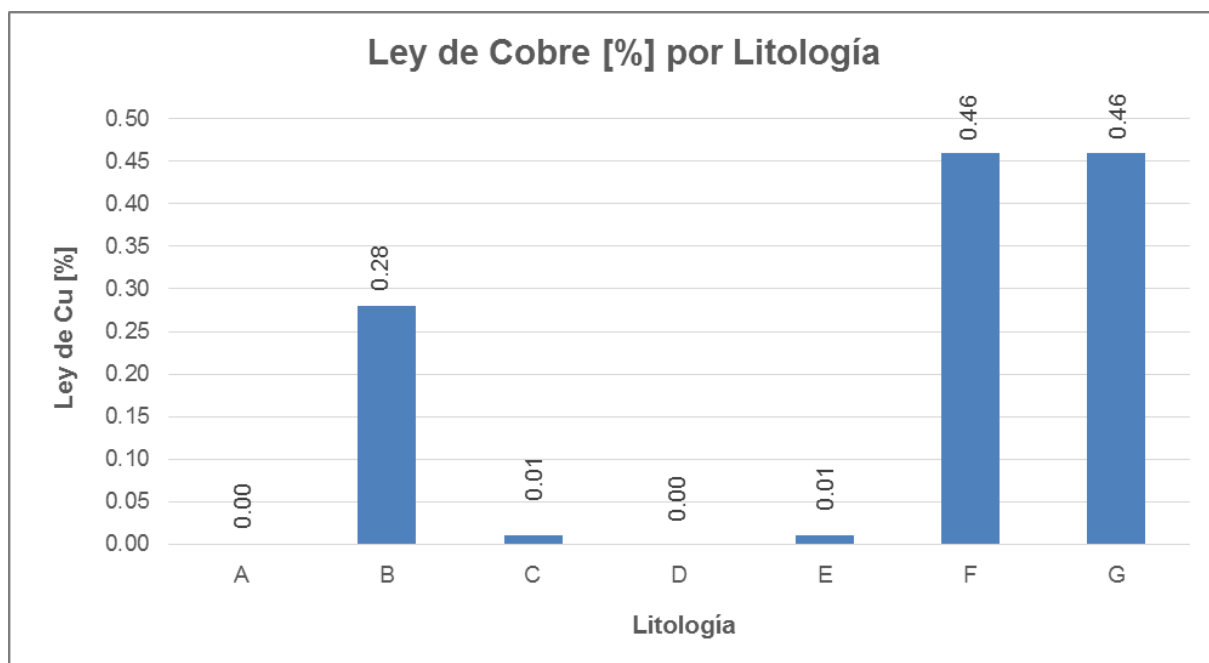


Gráfico 28. Ley promedio de Cobre por litología.

## ANEXO C

Pasos realización plan minero *Whittle*.**1- New block model**

En primera instancia es necesario importar el modelo de bloques. Se ingresan las coordenadas de origen propias del modelo en estudio (Tabla 23).

<b>Dimensions</b>		
<b>Coordenada origen</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
X	M	502,750
Y	M	7,520,850
Z	M	1,195

Tabla 23. Inputs sección "*New block model*".

Tiempo de procesamiento: 9 minutos y 51 segundos.

**2- New slope set**

Se ingresan los ángulos de talud correspondientes (Tabla 24), en este caso se usa un valor fijo.

<b>Slope set</b>		
<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
Angulo talud	°	48

Tabla 24. Inputs sección "*New slope set*".

**3- New pit shells**

Se ingresan los parámetros necesarios para obtener los pits anidados (Tabla 25).

<b>Pit collections</b>		
<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
Costo mina	US\$/t	1,643
Costo planta	US\$/t	4,3
Recuperación cobre	%	Variable
Pits anidados	#	51 (0.0-3.5.0;0.05) <sup>7</sup>

Tabla 25. Inputs sección "*Pit collections*".

<sup>7</sup> 51 pits anidados, precio de 0 US\$/lb hasta 3.5 US\$/lb, con paso de 0.05 US\$/lb

Tiempo procesamiento: 2 minutos y 58 segundos.

#### 4- *New operational scenario*

Se ingresan los parámetros correspondientes (Tabla 26), cabe destacar que el ritmo mina se fijó luego de diversas iteraciones para encontrar el ritmo óptimo, por lo que esta etapa está relacionada directamente con la etapa del plan minero.

<b>Operational scenario</b>		
<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
<b>Costo mina</b>	US\$/t	1,643
<b>Costo planta</b>	US\$/t	4,3
<b>Recuperación cobre</b>	%	Variable
<b>Precio del cobre</b>	US\$/lb	Vector <sup>8</sup>
<b>Costo venta</b>	US\$/lb	0.11
<b>Inversión</b>	MUS\$	697
<b>Capacidad mina</b>	Kt/año	30,000
<b>Capacidad planta</b>	Kt/año	10,000 <sup>9</sup>

Tabla 26. Inputs sección “Operational scenario”.

#### 5- *Pit by pit graph*

Se ingresan los parámetros necesarios para obtener el gráfico “*pit by pit*”

<b>Pit by pit graph</b>		
<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
<b>Algoritmo</b>	-	<i>Milawa NPV</i>
<b>Pushbacks</b>	Nº	1 - 9 - 35
<b>Max bench</b>	Nº	10

Tabla 27. Inputs sección “Pit by pit graph”.

Se elige como pit final el pit 35 con los *pushbacks* 1, 9 y 35. (guiado por el modo automático que entrega *Whittle*).

El gráfico se muestra a continuación (Gráfico 29).

<sup>8</sup> Vector de precios que considera desde el 2015 los precios de 2.81-2.8-2.89-3.01-3.04-3 [US\$/lb], este último es el precio a largo plazo. Fuente: Orientaciones Comerciales de Codelco 2016.

<sup>9</sup> Se consideró un año de prestripping, por lo que el primer año no se envía mineral a la planta.

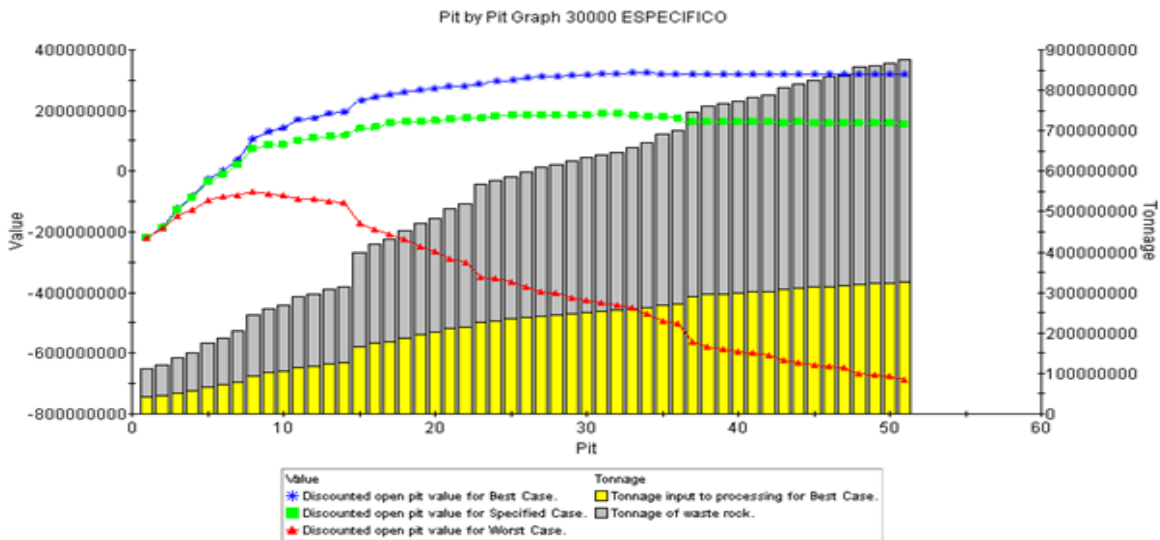


Gráfico 29. Pit by pit graph.

Tiempo de procesamiento: 6 minutos y 32 segundos.

### 6- New schedule graph

Finalmente se ingresan los parámetros necesarios para obtener el plan minero (Tabla 28).

<i>New schedule graph</i>		
Parámetro	Unidad	Valor
Pit final	#	35
Algoritmo		Milawa NPV
Pushbacks		1 – 9 – 35
Max bench		10

Tabla 28. Inputs sección “New schedule graph”.

Tiempo de procesamiento: 31 segundos.

## Anexo D

### Pasos realización plan minero *DeepMine*.

#### 1- *Geo models*

En primera instancia es necesario importar el modelo de bloques en estudio, se ingresa además el ángulo de talud (Tabla 29).

<i>Geo models</i>		
Parámetro	Unidad	Valor
Ángulo talud	°	48

Tabla 29. Parámetros “*Geo models*”.

El tiempo de procesamiento es de 17 minutos con 21 segundos.

#### 2- *Pit collections*

En la siguiente etapa es necesario crear los pit anidados, donde es necesario ingresar los siguientes parámetros (Tabla 30).

<i>Pit collections</i>		
Parámetro	Unidad	Valor
Costo extracción	US\$/t	0,77
Costo transporte botadero	US\$/t	0,87
Costo planta	US\$/t	4,3
Costo transporte planta	US\$/t	0,87
Recuperación cobre	%	Variable
Pits anidados	#	51 (0.0-3.5.0;0.05) <sup>10</sup>

Tabla 30. Parámetros “*Pit collections*”.

El tiempo de procesamiento de esta etapa es de 4 minutos y 40 segundos.

#### 3- *Mining environments*

En esta sección es necesario ingresar los parámetros característicos al ambiente minero (Tabla 31), cabe destacar que el ritmo mina se fijó luego de diversas iteraciones para

<sup>10</sup> 51 pits anidados, precio de 0 US\$/lb hasta 3.5 US\$/lb, con paso de 0.05 US\$/lb

encontrar el ritmo óptimo, por lo que esta etapa está relacionada directamente con la etapa del plan minero. El detalle se encuentra en el Anexo F.

<i>Mining environments</i>		
<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
<b>Costo fijo</b>	MUS\$/año	0
<b>Inversión</b>	MUS\$	697
<b>Costo mina</b>	US\$/t	0.77
<b>Capacidad mina</b>	Kt/año	30,000
<b>Costo planta</b>	US\$/t	4,3
<b>Costo transporte planta</b>	US\$/t	0.873
<b>Capacidad planta</b>	Kt/año	11,538 <sup>11</sup>
<b>Recuperación cobre</b>	%	Variable
<b>Costo transporte stock</b>	US\$/t	-
<b>Capacidad stock</b>	Kt	-
<b>Costo remanejo</b>	US\$/t	-
<b>Costo transporte botadero</b>	US\$/t	0.873
<b>Capacidad botadero</b>	Kt	Ilimitado

Tabla 31. Parámetros “*Mining environments*”.

#### 4- *Economic environments*

En esta sección es necesario ingresar los parámetros económicos (Tabla 32).

<i>Economic environments</i>		
<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
<b>Tasa descuento</b>	%	8
<b>Precio cobre</b>	US\$/lb	Vector <sup>12</sup>
<b>Costo venta cobre</b>	US\$/lb	0.11
<b>Impuesto</b>	%	0
<b>Royalty</b>	%	0

Tabla 32. Parámetros “*Economic environments*”.

#### 5- *Mine plans*

Finalmente, se ingresan los parámetros característicos del plan minero (Tabla 33).

<sup>11</sup> Se consideró un año de prestripping, por lo que el primer año no se envía mineral a la planta.

<sup>12</sup> Vector de precios que considera desde el 2015 los precios de 2.81-2.8-2.89-3.01-3.04-3 [US\$/lb], este último es el precio a largo plazo. Fuente: Orientaciones Comerciales de Codelco 2016.

<b>Mine plans</b>		
<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
<b>LOM limite</b>	Años	22
<b>Fases activas</b>	#/Año	1,2,3 <sup>13</sup>
<b>Máximo largo fase</b>	M	700
<b>Mínimo ancho</b>	M	150
<b>Guía pit</b>	%	30
<b>Pit final</b>	Nº	36 <sup>14</sup>
<b>Máxima altura en bancos</b>	#	10
<b>Mínimo tonelaje fase</b>	Kt	0

Tabla 33. Parámetros “*Mine plans*”.

El tiempo de procesamiento del plan minero es de 29 minutos y 18 segundos

<sup>13</sup> Se refiere a: 1 fase activa el primer año, 2 fases el segundo año y del tercero hacia delante 3 fases.

<sup>14</sup> Corresponde al precio de 2.75 [US\$/lb]

## ANEXO E

Detalle pits anidados a través de *Whittle* y *DeepMine*.

Pit	[US\$/lb]	Tonelaje total [kt]		Mineral [kt]		Esteril [kt]		REM		Ley Cu [%]	
		DM	Whittle	DM	Whittle	DM	Whittle	DM	Whittle	DM	Whittle
1	1	113,176	112,118	38,165	37,741	75,011	74,377	1.965	1.971	0.546	0.547
2	1.05	122,201	121,369	41,931	41,579	80,269	79,789	1.914	1.919	0.542	0.543
3	1.1	140,076	138,994	48,924	48,518	91,152	90,476	1.863	1.865	0.534	0.535
4	1.15	152,902	152,450	54,181	54,014	98,720	98,436	1.822	1.822	0.527	0.528
5	1.2	176,310	176,002	62,090	62,132	114,221	113,870	1.840	1.833	0.521	0.520
6	1.25	188,330	188,135	66,691	66,680	121,639	121,455	1.824	1.821	0.515	0.516
7	1.3	206,596	205,973	73,497	73,438	133,099	132,535	1.811	1.805	0.508	0.508
8	1.35	244,481	243,804	87,588	87,493	156,892	156,311	1.791	1.787	0.495	0.495
9	1.4	256,080	260,833	92,915	94,645	163,165	166,188	1.756	1.756	0.488	0.487
10	1.45	268,853	268,735	98,230	98,254	170,623	170,481	1.737	1.735	0.483	0.483
11	1.5	289,774	289,235	107,039	107,033	182,735	182,201	1.707	1.702	0.474	0.474
12	1.55	295,837	294,779	110,342	110,110	185,494	184,669	1.681	1.677	0.470	0.470
13	1.6	308,271	307,511	116,241	116,014	192,031	191,496	1.652	1.651	0.464	0.464
14	1.65	313,611	312,700	119,341	118,912	194,269	193,789	1.628	1.630	0.460	0.461
15	1.7	400,433	400,119	151,037	150,971	249,397	249,148	1.651	1.650	0.436	0.436
16	1.75	420,962	421,236	159,733	159,876	261,228	261,359	1.635	1.635	0.430	0.430
17	1.8	432,314	432,268	164,540	164,624	267,774	267,644	1.627	1.626	0.427	0.427
18	1.85	452,522	451,840	173,412	173,466	279,110	278,375	1.610	1.605	0.421	0.421
19	1.9	472,829	471,836	181,438	181,248	291,390	290,589	1.606	1.603	0.417	0.417
20	1.95	482,704	483,971	185,966	186,717	296,737	297,255	1.596	1.592	0.414	0.414
21	2	507,261	506,674	195,349	195,427	311,912	311,247	1.597	1.593	0.409	0.408
22	2.05	521,527	520,458	201,127	200,996	320,401	319,463	1.593	1.589	0.405	0.405
23	2.1	570,216	568,443	213,076	212,586	357,140	355,857	1.676	1.674	0.403	0.403
24	2.15	575,972	575,558	216,162	216,246	359,810	359,312	1.665	1.662	0.401	0.401
25	2.2	586,841	586,540	221,151	221,467	365,690	365,073	1.654	1.648	0.399	0.399
26	2.25	599,312	597,833	226,402	226,235	372,910	371,598	1.647	1.643	0.396	0.396
27	2.3	610,651	609,148	230,964	230,762	379,687	378,386	1.644	1.640	0.394	0.394
28	2.35	615,885	615,126	234,257	234,050	381,628	381,077	1.629	1.628	0.393	0.393
29	2.4	628,108	626,366	239,271	238,812	388,837	387,554	1.625	1.623	0.390	0.391
30	2.45	634,169	633,416	242,310	242,322	391,859	391,093	1.617	1.614	0.389	0.389
31	2.5	639,588	638,913	245,403	245,427	394,185	393,486	1.606	1.603	0.387	0.387
32	2.55	647,464	647,343	249,509	249,707	397,955	397,636	1.595	1.592	0.385	0.385
33	2.6	661,580	657,689	255,051	253,872	406,528	403,817	1.594	1.591	0.382	0.383
34	2.65	672,138	671,058	258,578	258,598	413,559	412,460	1.599	1.595	0.381	0.381
35	2.7	691,114	691,170	265,115	265,304	425,999	425,867	1.607	1.605	0.379	0.379
36	2.75	699,643	699,762	268,680	268,771	430,963	430,991	1.604	1.604	0.377	0.377
37	2.8	746,899	746,520	288,722	288,741	458,177	457,779	1.587	1.585	0.369	0.369
38	2.85	763,763	760,767	294,509	294,168	469,254	466,599	1.593	1.586	0.367	0.367

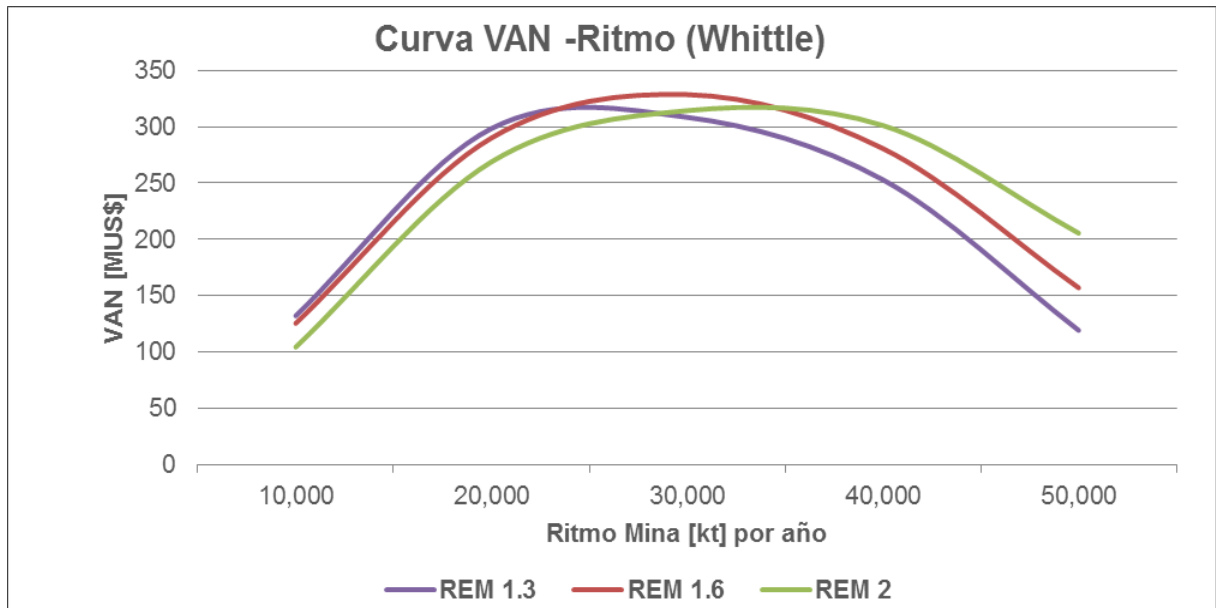


39	2.9	769,691	767,344	297,888	297,327	471,803	470,018	1.584	1.581	0.365	0.366
40	2.95	774,473	773,139	300,913	300,746	473,561	472,392	1.574	1.571	0.364	0.364
41	3	779,535	781,970	304,199	305,076	475,336	476,894	1.563	1.563	0.362	0.362
42	3.05	788,838	788,363	307,562	307,610	481,275	480,753	1.565	1.563	0.361	0.361
43	3.1	808,683	807,790	314,737	314,838	493,946	492,953	1.569	1.566	0.359	0.359
44	3.15	818,041	816,641	318,464	318,334	499,577	498,307	1.569	1.565	0.357	0.358
45	3.2	826,487	825,829	322,349	322,272	504,138	503,556	1.564	1.563	0.356	0.356
46	3.25	832,283	834,923	325,008	325,577	507,276	509,346	1.561	1.564	0.355	0.355
47	3.3	839,039	837,965	327,823	327,829	511,216	510,135	1.559	1.556	0.354	0.354
48	3.35	857,917	856,609	333,808	333,643	524,109	522,966	1.570	1.567	0.352	0.352
49	3.4	863,479	861,702	337,466	337,192	526,013	524,510	1.559	1.556	0.351	0.351
50	3.45	868,644	867,622	339,867	340,362	528,777	527,261	1.556	1.549	0.350	0.350
51	3.5	877,487	876,873	343,881	344,201	533,605	532,672	1.552	1.548	0.348	0.348

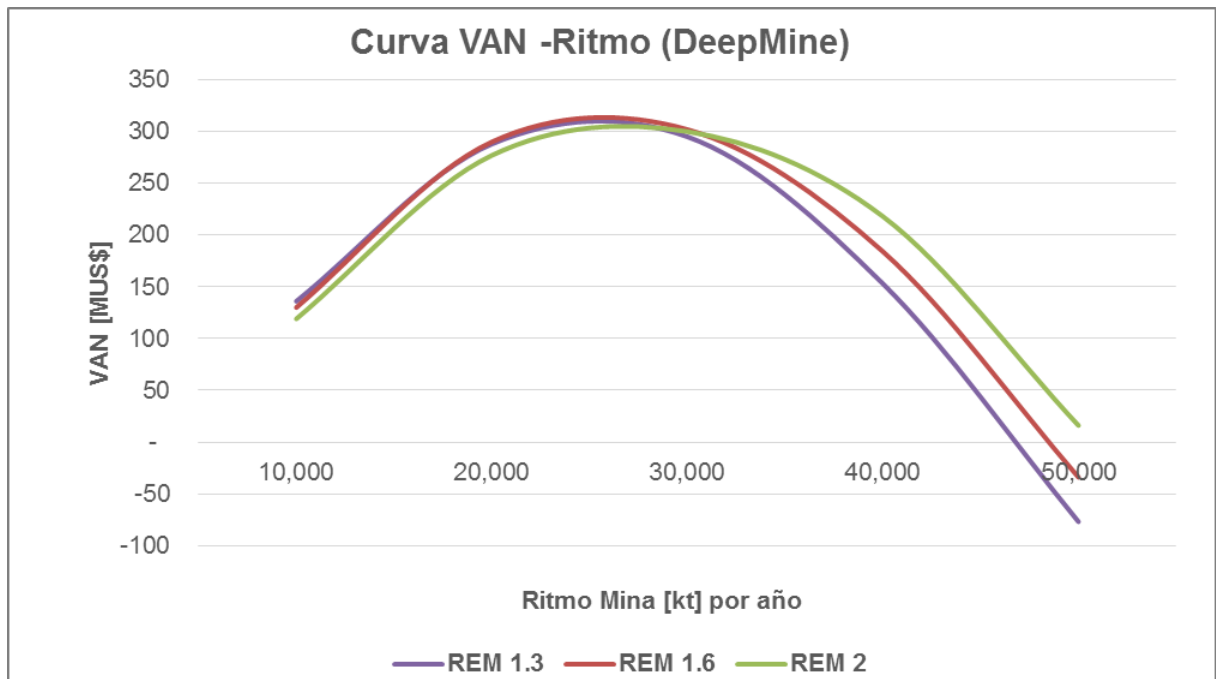
**Tabla 34. Resultados pits anidados *Whittle* y *DeepMine*.**

**ANEXO F**

**Curvas VAN-Ritmo**



**Gráfico 30. Curva VAN-Ritmo – Whittle.**



**Gráfico 31. Curva VAN-Ritmo – DeepMine.**

kta	VAN REM 1.3 [MUS\$]		VAN REM 1.6 [MUS\$]		VAN REM 2 [MUS\$]	
	DM	<i>Whittle</i>	DM	<i>Whittle</i>	DM	<i>Whittle</i>
<b>10,000</b>	136	132	130	125	119	104
<b>20,000</b>	288	298	290	290	277	269
<b>30,000</b>	295	308	302	328	300	314
<b>40,000</b>	153	253	184	281	218	301
<b>50,000</b>	-77	119	-34	157	16	205

**Tabla 35. Tabla datos VAN-Ritmo.**

## ANEXO G

Resumen de fases de caso de estudio (modelo 05).

	<b>Tonelaje</b>	<b>Mineral</b>	<b>Ley cobre</b>
	Kt	Kt	%
<b>F1</b>	112,121	40,819	0.53
<b>F2</b>	148,719	61,507	0.43
<b>F3</b>	430,348	167,115	0.32

Tabla 36. Resumen fases – *Whittle*.

	<b>Tonelaje</b>	<b>Mineral</b>	<b>Ley cobre</b>
	Kt	Kt	%
<b>F1</b>	77,210	22,086	0.55
<b>F2</b>	46,194	16,851	0.54
<b>F3</b>	37,671	16,805	0.39
<b>F4</b>	64,544	18,908	0.42
<b>F5</b>	20,089	7,279	0.42
<b>F6</b>	45,965	12,037	0.35
<b>F7</b>	47,824	19,426	0.31
<b>F8</b>	39,845	13,416	0.49
<b>F9</b>	34,527	12,726	0.38
<b>F10</b>	35,455	7,971	0.36
<b>F11</b>	35,618	16,564	0.28
<b>F12</b>	15,622	2,950	0.31
<b>F13</b>	19,636	7,740	0.27
<b>F14</b>	52,383	15,360	0.40
<b>F15</b>	30,157	6,609	0.32
<b>F16</b>	51,544	17,450	0.27

Tabla 37. Resumen fases – *DeepMine*.

ANEXO H

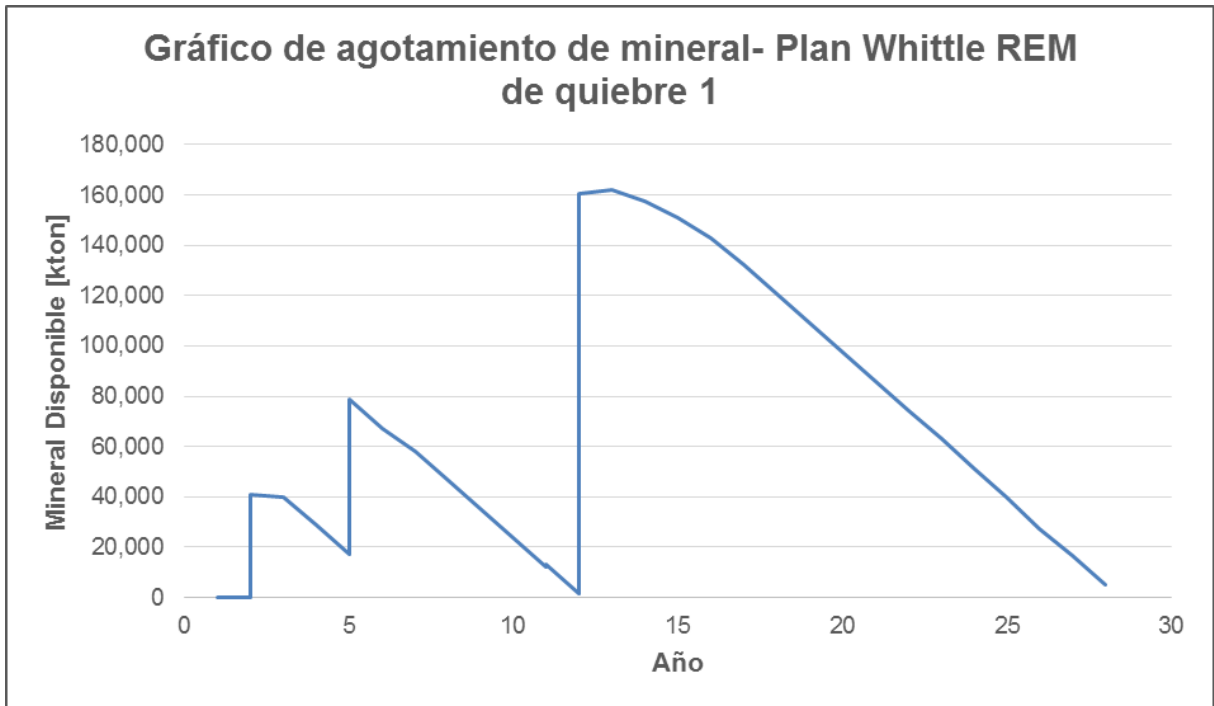


Gráfico 32. Agotamiento de mineral- *Whittle*.

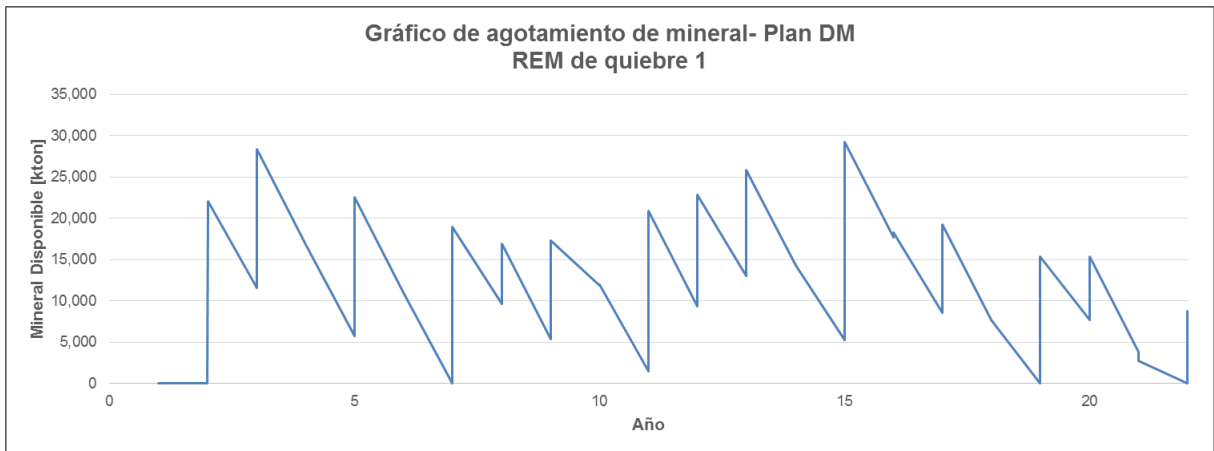


Gráfico 33. Agotamiento de mineral – *DeepMine*.

## ANEXO I

Gráfico de inversión en función del ritmo mina y planta.

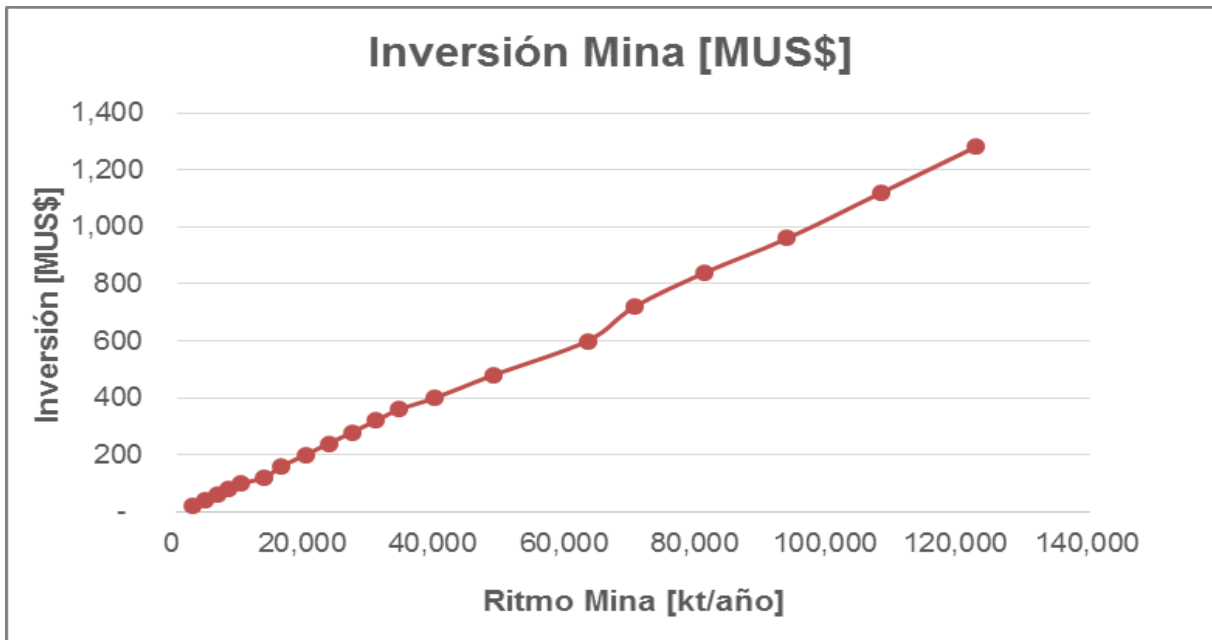


Gráfico 34. Inversión mina.

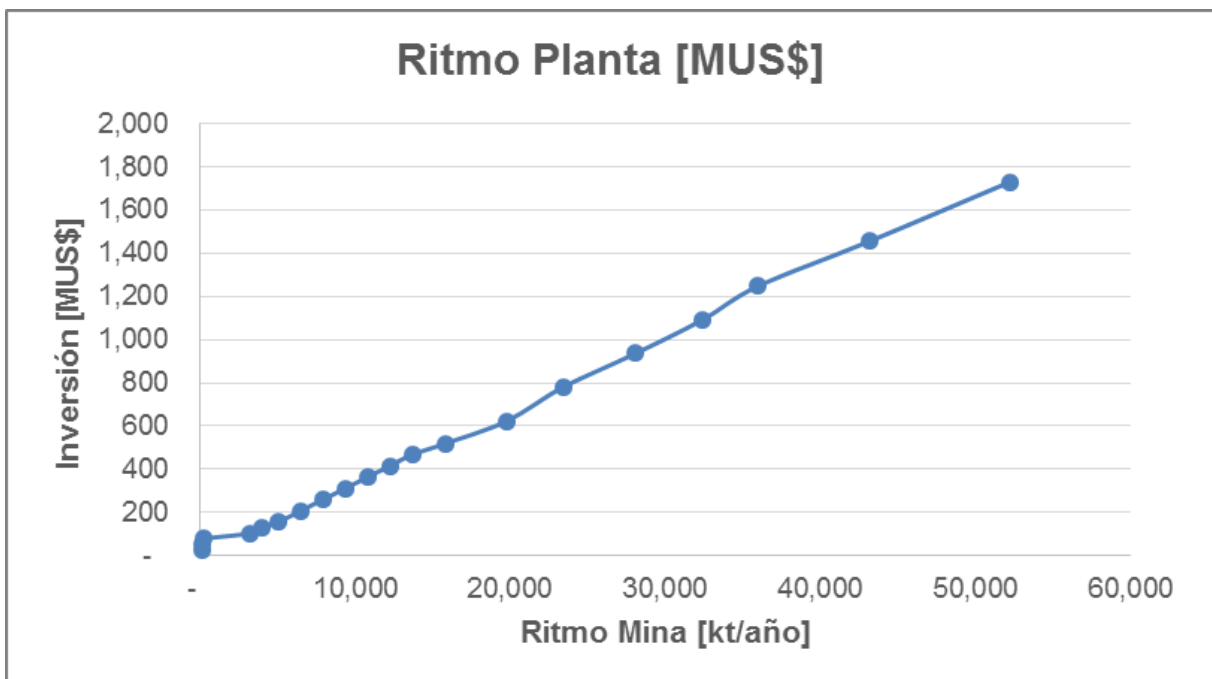


Gráfico 35. Inversión planta.