



# Metodología para encontrar un pit final y estrategia de fases adecuadas en función de atributos geológicos

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE  
ESCUELA DE INGENIERÍA  
**Benjamín del Solar**<sup>1</sup>, Titulado  
**Felipe Bernal**<sup>1</sup>, Profesor Instructor Adjunto  
<sup>1</sup>DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINERÍA

## INTRODUCCIÓN

**E**s sabido que durante los próximos cinco años habrá inversiones en proyectos mineros por más de US\$100.000 MM en Chile [1], dando cabida a un escenario de inversión sin precedentes en la historia de nuestro país. Por ser inversiones de tal magnitud, varios de estos proyectos pasan por etapas de estudio que duran entre dos y tres años. Durante estas etapas de estudio<sup>1</sup> se determinan con cierto nivel de certeza los ingresos y costos de dichos proyectos, tomando decisiones fundamentales sobre los criterios de diseño que serán integrados en cada programación.

<sup>1</sup> Las etapas de estudio corresponden a las etapas de perfil, prefactibilidad, factibilidad e ingeniería de detalles.

La planificación minera es la rama de la minería que optimiza la extracción de los **minerales** existentes en el yacimiento a explotar, procurando maximizar su valor económico en el tiempo. Sin una planificación minera sólida, ninguno de estos megaproyectos mostraría una rentabilidad probada y, por ende, montos como el anteriormente mencionado nunca serían invertidos.

La metodología para hacer planificación minera en rajo abierto más aceptada en la industria corresponde al algoritmo de pits anidados [2]. Este algoritmo se basa en una optimización que define una serie de pits anidados, los cuales dan una orientación del tamaño óptimo del rajo [3] y la secuencia de extracción asociada. Durante las etapas de estudio de estos proyectos, esta optimización es realizada y luego adaptada para ser viable en la práctica, generando una secuencia “operativizada” de extracción. Varias de las decisiones tomadas de aquí en adelante son arbitrarias e irán variando según el yacimiento en estudio y el experto encargado. Esto hace que la planificación minera sea más un arte que una ciencia.

El objetivo de esta investigación es contribuir a la estandarización del proceso de operativizar dicha optimización. Al respecto, se propone una metodología única que incorpora **atributos geológicos** de cada yacimiento —además de otros parámetros operativos— y luego se define una estrategia de **fases de extracción** apropiada.

## METODOLOGÍA

Se propone una metodología que actúe como complemento a lo utilizado hoy en la industria para la definición del **pit final** y estrategia de fases. Actualmente se trabaja con el algoritmo de Lerchs & Grossman, mejorado por Whittle [4]. La Figura 1 muestra esquemáticamente los pasos ocupados por esta metodología:

- i. Categorización de recursos, transformando el **modelo geológico** a un **modelo de bloques**.
- ii. Generación de pits anidados mediante la variación de un parámetro económico.
- iii. Análisis de **cubicaciones**.
- iv. Selección del pit final con base en criterios económicos y estratégicos.
- v. Diseño de fases con base en un modelo operativo del pit.

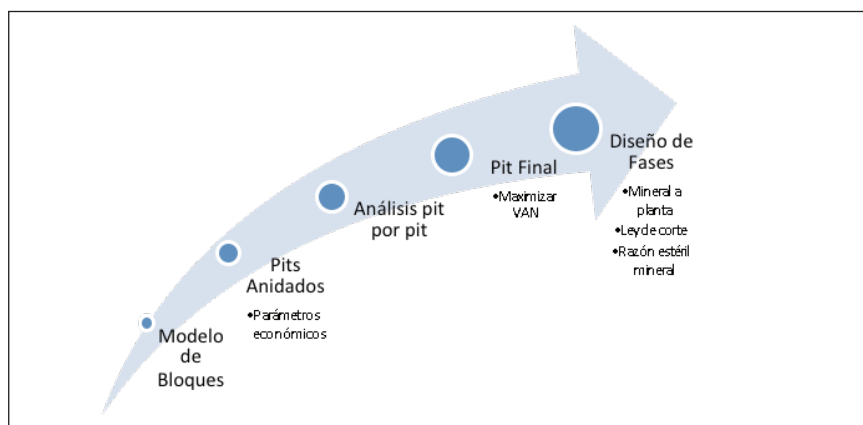


Figura 1. Metodología utilizada en la industria para definición del pit final y estrategia de fases. Fuente: Elaboración propia.

Se propondrá una metodología para encontrar una estrategia de fases y pit final<sup>2</sup> adecuados en función de atributos geológicos del yacimiento, evaluándola con distintas capacidades de procesamiento. Se analizarán 12 configuraciones distintas, que utilizarán un mismo modelo de bloques mediante la siguiente metodología:

1. Caracterización del cuerpo mineralizado
  - a. Dimensionamiento: evaluación del volumen mineralizado para una cierta **ley de corte**.
  - b. Distribución de ley en el espacio: determinación de **ley media**, posición y volúmenes de zonas de alta y baja ley.
  - c. **Unidades geometalúrgicas (UGM)**: identificación de su distribución en el espacio.
2. Determinación del pit final

Se definen dos pit finales: uno grande y uno pequeño. El pit final “grande” ocupará un **revenue factor** igual a 1,0 y el pit final “pequeño” ocupará un **revenue factor** igual a 2/3.

<sup>2</sup> El pit final y la estrategia de fases (puntos 2 y 4 de la metodología respectivamente) son definidos ocupando el algoritmo de Lerchs & Grossman presentado anteriormente.

### 3. Definición de capacidad de procesamiento

Se usarán dos capacidades de procesamiento: una baja y una alta.

### 4. Estrategia de fases

Tres estrategias distintas serán evaluadas para los tamaños de fases: (i) constante, (ii) creciente y (iii) decreciente.

### 5. Evaluación económica

Será hecha sobre la base de los siguientes *Key Performance Indicators* (KPI) económicos: Valor Actual Neto (**VAN**), desviación estándar de ley media, desviación estándar de **fin** producido, entre otros. Estos indicadores determinarán el real impacto de la metodología en el valor económico del plan minero.

Se evaluará la *performance* de tres estrategias de secuenciamiento de fases distintas: (i) constante, (ii) creciente y (iii) decreciente, cada una con dos alternativas de pit final (pequeño y grande) y dos alternativas de capacidades de procesamiento (alta y baja), totalizando 12 escenarios.

## Aplicación de la metodología

### 1. Caracterización del cuerpo mineralizado

a. Dimensionamiento: yacimiento de oro con formación tipo manto-vetillas con un tamaño de 400 m (E-W) · 5800 m (N-S) · 200 m (vertical), definido por una ley de corte de 0,2 g/t Au. La Figura 2 muestra las reservas del yacimiento mediante un sólido tridimensional, el cual fue construido con datos reales utilizando el software Vulcan.

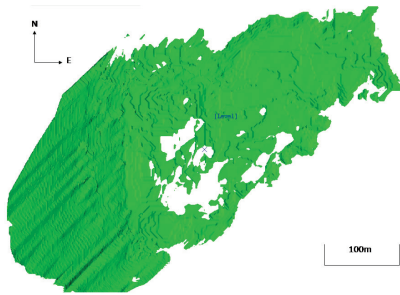


Figura 2. Cuerpo mineralizado sobre ley de corte de 0,2 g/t.

b. Distribución de ley en el espacio: ley media de 0,3 g/t con una distribución uniforme. Zonas de alta ley en el área comprendida por las coordenadas 2.000-5.000 E y 1.000-3.000 N presentadas en forma aislada pero que mantienen regularidad en el plano XY. La Figura 3 presenta la distribución de ley en el espacio, la cual fue construida con datos reales de un yacimiento utilizando el software Vulcan.

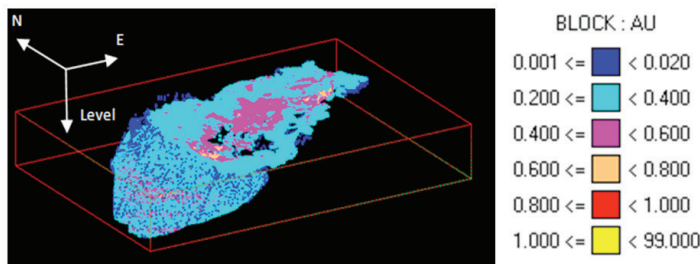


Figura 3. Distribución de ley en el espacio para el cuerpo mineralizado.

## 2. Determinación del pit final

Según las orientaciones comerciales de la industria, se consideró un precio del oro de largo plazo de US\$1200/oz. Por lo tanto los dos pit finales estarían definidos por los precios de US\$1200 y US\$800 la onza.

## 3. Definición de capacidad de procesamiento

Existen dos UGM con distintos tipos de procesamiento, siendo el proceso “A” el principal (posee el 90% de los recursos). La capacidad de procesamiento fue definida por:

- 41 ktpd (proceso A) y 20 ktpd (proceso B) denominado “41-20”.
- 20 ktpd (proceso A) y 20 ktpd (proceso B) denominado “20-20”.

## 4. Estrategia de fases (EF)

Se definieron tres estrategias de secuenciamiento de fases, las cuales son ilustradas en la Figura 4.

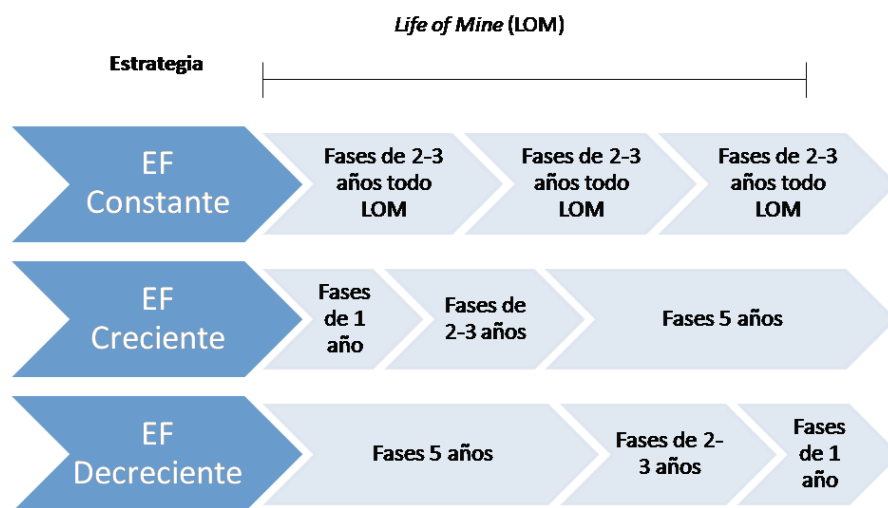


Figura 4. Tres alternativas de estrategias de fases.

## 5. Evaluación de resultados

Se realiza con los siguientes KPI (*key performance indicators*):

- Económicos: VAN operacional (valor de los ingresos menos costos del proyecto descontados, sin considerar inversión), VAN operacional 5 años (valor de los ingresos menos costos de los primeros cinco años del proyecto, sin considerar inversión)

- Operacionales: ley de cabeza (ley de oro promedio con la cual se alimenta la planta de procesamiento), desviación estándar ley de cabeza (porcentaje de desviación de la ley de cabeza), razón estéril mineral del pit final (volumen de **estéril** sobre volumen de mineral comprendido dentro de la envolvente del pit final).

- Mercado: Au fino anual (producción de oro fino anual), desviación estándar au fino anual (porcentaje de desviación en la producción de oro fino anual).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se obtuvieron resultados para 12 escenarios distintos, separando resultados según KPI de ámbito económico, operacional y de mercado. Los resultados son resumidos por la Tabla 1.

**Tabla 1.** Resultados para 12 corridas.

Caso N°	Parámetros de Diseño			Key Performance Indicators						
	Pit Final (Precio Au en US\$/Oz)	Estrategia de Fases	Cap. Planta	KPI Económicos		KPI Operacionales			KPI Mercado	
				VAN Operacio-nal (MMUS\$)	VAN Op. 5 años (MMUS\$)	Ley de Cabeza (g/t)	Dev Std Ley de Cabeza (% de Ley de Cabeza)	Razón Estéril Mineral del Pit Final	Au Fino Anual (Oz)	Dev Est Fino Anual (% de Fino Anual Promedio)
1	800	Constante	20-20	1.914	837	0,446	15%	0,19	274.702	24%
2	800	Constante	41-20	2.328	1.468	0,447	13%	0,19	547.576	26%
3	800	Creciente	20-20	1.926	905	0,445	16%	0,19	274.702	25%
4	800	Creciente	41-20	2.336	1.526	0,446	11%	0,19	547.576	25%
5	800	Decreciente	20-20	1.914	837	0,446	15%	0,19	274.702	24%
6	800	Decreciente	41-20	2.328	1.468	0,447	13%	0,19	549.404	26%
7	1200	Constante	20-20	2.232	838	0,407	21%	0,73	226.184	34%
8	1200	Constante	41-20	2.994	1.480	0,408	17%	0,73	364.296	58%
9	1200	Creciente	20-20	2.221	906	0,407	20%	0,73	223.278	38%
10	1200	Creciente	41-20	2.947	1.531	0,407	19%	0,73	354.956	60%
11	1200	Decreciente	20-20	2.201	775	0,407	20%	0,73	226.184	35%
12	1200	Decreciente	41-20	2.962	1.502	0,409	17%	0,73	363.084	57%

### a. KPI económicos

Analizando el VAN operacional total, en todos los casos este fue mayor que el VAN operacional de primeros cinco años (Figura 5). Esto implica que, dada una capacidad de procesamiento finita, la vida económica de la mina es siempre mayor a cinco años. Dentro del **VAN operacional** total, los casos 8, 10 y 12 fueron superiores, lo que implica que una mayor capacidad de procesamiento aumenta el valor presente de los ingresos. Esto sucede debido a que se puede procesar más mineral de manera más pronta y, por lo tanto, los ingresos son percibidos más cercanos al presente, aumentando el valor presente de la mina en evaluación.

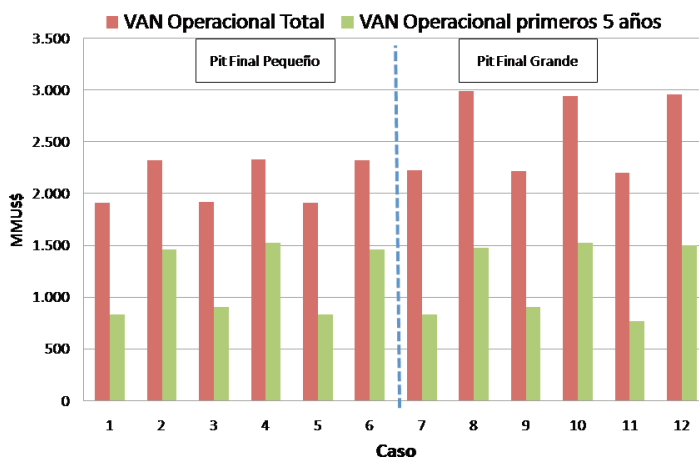
Analizando el caso con mayor VAN (8), este fue levemente superior al segundo y tercero (12 y 10), lo que sugiere que la mejor alternativa para toda la vida de la mina corresponde a una estrategia de fases constante con una capacidad de procesamiento lo más alta posible.

Respecto de la estrategia de fases:

- Para el VAN operacional de los primeros cinco años, la estrategia de fases crecientes generó un VAN más alto para todos los casos.
- Para el VAN operacional total, la estrategia de fases constantes generó un VAN más alto en el caso del pit final grande.

Respecto de la elección del pit final, al considerar el VAN operacional total (representa toda la vida de la mina), es evidente que el pit final más grande tiene más valor. Sin embargo, al considerar el VAN operacional de los primeros cinco años, no se logran ver diferencias relevantes en la elección del pit final. Esto significa que la elección del pit final no incide en el VAN de los primeros años de la operación, lo cual sucede debido a que durante los primeros años de explotación se consumirán las reservas de mayor ley, según la tendencia de explotación óptima (la que es idéntica, independiente del pit final)

### KPI Económicos por Caso



**Figura 5.** Resultados de KPI económicos por caso.



Es importante destacar que, dado el tipo de yacimiento, la estrategia de fases (constante, creciente o decreciente) no significó un impacto relevante. Considerando que una estrategia de fases crecientes (partir primero con fases pequeña) permitiría diferir la inversión (debido al menor uso de equipos e infraestructura al comienzo), se genera una primera conclusión: una estrategia de fases crecientes permitiría aumentar el VAN total (recordar que este análisis solo considera VAN operacional).

En segundo lugar, el pit pequeño tuvo mejores resultados operacionales y de mercado que el pit grande. Esto sugeriría que, en ciertas condiciones, es más favorable iniciar la explotación considerando un menor *revenue factor* para el pit final<sup>4</sup>. Esto tiene varias ventajas: atrasar la inversión en infraestructura, equipos y planta; y despejar la incertidumbre de ciertos parámetros críticos como el precio del *commodity* y el precio de la energía. Esto permitiría reevaluar la explotación de la mina al cabo de unos años y decidir con mayor certeza una posible expansión, con un pit final mayor y una estrategia de fases constantes. Esto resulta particularmente beneficioso para compañías pequeñas, con menor *expertise* en temas operacionales y de mercado, además de menores espaldas financieras para solventar situaciones imprevistas.

Finalmente, es importante mencionar que el presente estudio necesita de más casos para tener resultados más robustos. El análisis económico-operacional de un proyecto minero ocupa un modelo de bloques como *input*, información difícil de conseguir y escasa por su alto costo de elaboración. Yacimientos con distintas formaciones, envoltentes y distribuciones de mineral podrán cubrir varios casos diferentes y, en consecuencia, generar una metodología más refinada para la industria.

## PRINCIPIO CIENTÍFICO UTILIZADO

### Optimización de la secuencia de extracción en minería a cielo abierto

Se define un modelo económico que muestre la relación de todos los procesos productivos (Figura 8) y sus respectivos costos, para obtener un beneficio económico de la explotación minera. Este modelo se construye mediante una representación discreta (bloques) del yacimiento.

$$\pi = T_m * (g * y * (P * \alpha - C_v) - C_p) - T_t * C_m$$

Dónde:

$\pi$ : Beneficio [US\$]

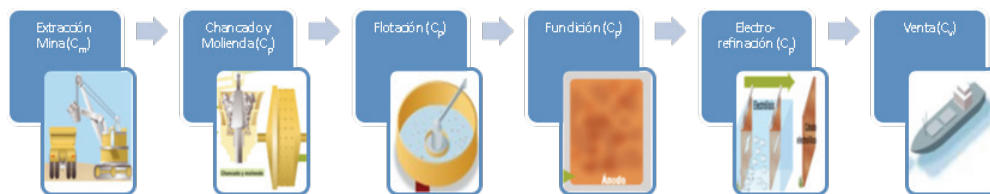
$T_m$ : Tonelaje de mineral [ton];  $T_t$ : Tonelaje total [ton]

$g$ : Ley media;  $y$ : recuperación

$P$ : Precio del commodity  $\left[\frac{\text{US\$}}{\text{lb}}\right]$

$\alpha$ : Factor de beneficio

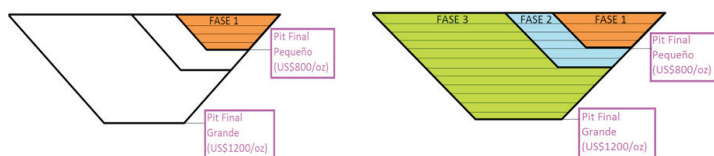
$C_v$ : Costo de venta  $\left[\frac{\text{US\$}}{\text{lb}}\right]$ ;  $C_p$ : Costo de procesamiento  $\left[\frac{\text{US\$}}{\text{ton}}\right]$ ;  $C_m$ : Costo mina  $\left[\frac{\text{US\$}}{\text{ton}}\right]$



**Figura 8.** Diagrama simplificado para mineral de sulfuro. Fuente: Codelco Educa.

De esta manera, es posible definir un límite de explotación óptimo, denominado pit final. El pit final demarcará la envoltente final que tendrá el rajo una vez que la mina haya terminado su explotación. Adicionalmente, al variar el factor de beneficio ( $\alpha$ ), se podrán construir varios pits finales (para distintos precios del commodity). Esta secuencia de pits finales indicaría la tendencia direccional óptima de explotación de la mina.

La Figura 9 resume dicho concepto:



**Figura 9.** Consumo de reservas en  $T=t_i$  (izquierda) y  $T=t_{i+1}$  (derecha). Fuente: Elaboración propia.

<sup>3</sup> Sigma corresponde a la desviación estándar.

<sup>4</sup> Es decir, un pit final más pequeño.

## GLOSARIO

**Atributos geológicos:** Atributos como ley de mineral, densidad, dureza, etc. que van contenidos en el modelo de bloques.

**Cubicaciones:** Representación física (tonelaje, metros cúbicos) obtenida a partir de un modelo.

**Estéril:** Porción de la tierra que no es rentable de extraer.

**Factor de beneficio (*revenue factor*):** Factor entre 0 y 1 que multiplica al precio del commodity.

**Fases de extracción:** Subdivisión del pit final que representa un volumen a extraer dentro de un horizonte de tiempo.

**Fino:** Cantidad de metal producido.

**Ley de corte:** Ley de mineral (por ejemplo, en porcentaje) que diferencia al estéril del mineral.

**Ley media:** Ley promedio de los minerales que abastecen a la planta de tratamiento.

**Mineral:** Porción de la tierra que puede ser económicamente explotable.

**Modelo de bloques:** Discretización por bloques del modelo geológico.

**Modelo geológico:** Modelo de estimación de la geología del yacimiento.

**Pit final:** Volumen de extracción que representa la envolvente de mayor valor económico de un yacimiento a ser explotado a rajo abierto, para una serie de parámetros definidos (precio, costos, ángulo de talud y recuperación). También denominado "rajo final".

**Unidad geo-metalúrgica (UGM):** Separación arbitraria del mineral según ley, litología y alteración mineralógica.

**VAN (Valor actual neto):** Flujos de caja anual futuros descontados al presente.

**VAN operacional:** Flujos de caja anual futuros descontados al presente sin considerar inversión del proyecto.

## REFERENCIAS

1. Castañeda, C.; Pédola, M. A. Generation and optimisation of phases. International Seminar of Mine Planning, 2011.
2. Comisión Chilena del Cobre. Inversión en la minería chilena. Cartera de Proyectos 2012.
3. Elkington, T.; Durham, R. Integrated open pit pushback selection and production capacity optimization. Journal of Mining Science 47 (2) [online]. 2011. [Acceso el 16 de octubre de 2012]. Disponible en: <http://www.springerlink.com/index/4825047563217024.pdf>.
4. Lane, K. F. The Economic Definition of Ore. Mining Journal Books, Londres, Inglaterra: 1997.
5. Whittle, G. Enterprise optimisation. Mine Planning and Equipment Selection (MPES) Conference: 1-3, 2010.

## EQUIPO DE INVESTIGADORES

- 1 Benjamín del Solar
- 2 Profesor Felipe Bernal

