

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCION**  
Facultad de Ingeniería  
Departamento Ingeniería Metalúrgica

**Profesor Patrocinante**  
Asieh Hekmat

# **CÁLCULO DE LA TASA DE PRODUCCIÓN ÓPTIMA EN MINERÍA A CIELO ABIERTO**



**FRANCISCA ANDREA MIGUEL ALBORNOZ**

Informe de Memoria de Título

para optar al Título de

Ingeniero Civil de Minas

Octubre, 2020



## Resumen

En la planificación de una mina, la selección de la tasa de producción es una de las decisiones más importantes que afecta directamente en la viabilidad de un proyecto minero. Esta tasa, generalmente no se reevalúa cuando se tiene nueva información disponible, por lo que es probable que la mina no esté alcanzando su máximo potencial de ganancias. Este estudio tiene como objetivo comparar distintos métodos usados para determinar la tasa de producción óptima (TPO), analizando el efecto de factores claves para diferentes tamaños de reserva.

Se realizó un análisis de sensibilidad para la tasa de descuento, el precio y la REM en tres tamaños de reserva, obteniendo como resultado que la tasa de descuento es el factor menos sensible, ya que al variarlo no hubo cambios significativos en la TPO. Para el análisis del precio, se obtuvo que al aumentar el precio en un 122%, la TPO, aumentó en un 100%, 66% y 45% para las reservas grande, mediana y pequeña respectivamente. Además, el análisis de la REM, mostró resultados similares al análisis del precio, puesto que al aumentar la REM en un 200%, la TPO de las reservas, grande, mediana y pequeña, aumentó en un 100%, 60% y 57%, por lo tanto, el precio y la REM son parámetros sensibles y afectan en similar medida a la TPO.

Con respecto a los resultados de la comparación entre métodos que estiman la TPO, se concluyó que, a pesar de su antigüedad, la fórmula empírica de Taylor sigue entregando resultados acertados que sirven para evaluar un proyecto minero en su primera etapa. Por otro lado, el criterio de Lawrence Smith que plantea que existe un rango de TPO entre el máximo de la curva que paga dos veces el capital y el máximo de la curva del VAN, es una buena forma para estimar la TPO, puesto que la curva del VAN por si sola, en ocasiones no entrega información significativa sobre la vida de la mina.

Finalmente se aplicó la metodología de *Hill of Value* a un caso real, donde se obtuvo que la ley de corte de 0.3% previamente seleccionada en la base de datos, no era óptima y que, para generar el máximo valor, se debe aumentar a 0.8% y seleccionar una tasa de producción de 44 [Mton/año], obteniéndose una diferencia de 321 MUSD (extras).



## Abstract:

In mine planning, the selection of the production rate is one of the most important decisions that directly affects the viability of a mining project. This rate is generally not reassessed when new information becomes available, so it is likely that the mine is not reaching its maximum profit potential. The objective of this study is to compare different methods used to determine the optimum production rate (OPR), where the effect of each factor will be analyzed for different reserve sizes.

In this study, a sensitivity analysis was carried out to evaluate the dependency of the OPR to discount rate, price and strip ratio in three reserve sizes. The results of this analysis showed that the discount rate is the least sensitive factor, since when it varied there were no significant changes in the OPR. For the price analysis, it was obtained that when the price increased by 122%, the OPR increased by 100%, 66% and 45% for the large, medium and small reserves respectively. Moreover, the analysis of the strip ratio, demonstrated similar results to the price analysis, since when the strip ratio was increased by 200%, the OPR of the large, medium and small reserves, increased by 100%, 60% and 57%. Therefore, price and strip ratio are sensitive parameters and affect the OPR to a similar extent.

Regarding the results of the comparison between OPR estimation methods, it was concluded that despite its antiquity, the Taylor empirical formula continues to provide accurate results that are useful to evaluate a mining project in its prefeasibility stage. On the other hand, the Lawrence Smith criterion, which states that there is a range of OPR between the maximum of the curve that pays twice the capital expenditure, and the maximum of the NPV curve, is a good way to estimate the OPR, since the NPV curve by itself sometimes does not provide meaningful information about the life of the mine.

Finally, the Hill of Value methodology was applied to a case study, where it turned out that the cutoff grade of 0.3 previously selected in the database was suboptimal and that, to generate the maximum value, it must be increased to 0.8, and select a production rate of 44 [Mton/year] must be selected, obtaining a difference of 321 MUSD (extra).



## Índice de Contenidos

Capítulo 1: Introducción.....	1
1.1 Objetivos .....	2
1.1.1 Objetivos Generales.....	2
1.1.2 Objetivos Específicos .....	2
1.2 Propuesta de Trabajo .....	2
1.2.1 Metodología.....	5
Capítulo 2: Antecedentes.....	6
2.1 Planificación en Minería a Cielo Abierto .....	6
2.2 Tasa de Producción .....	7
2.3 Factores que afectan el cálculo de la tasa de producción .....	8
2.3.1 Características del Depósito: .....	8
2.3.2 Factores Económicos: .....	9
2.3.3 Factores Financieros: .....	12
2.4 Factores que se ven afectados por la tasa de producción .....	13
2.5 Métodos para evaluar el rendimiento de un proyecto.....	14
2.5.1 Valor Actual Neto (VAN) .....	14
2.5.2 Tasa interna de retorno (TIR).....	15
2.5.3 Periodo de recuperación ( <i>Payback</i> ).....	16
2.5.4 Costo promedio ponderado de capital (WACC) .....	17
2.6 Métodos comunes para definir la tasa de producción .....	17
2.6.1 Regla de Taylor.....	18
2.6.2 Determinar la vida de la mina utilizando flujos de caja descontados .....	18
2.6.3 Determinar la vida de la mina utilizando técnicas de valoración de opciones ....	19



2.6.4	Modelos de riesgo estocástico .....	20
2.6.5	Diferentes Análisis Financieros .....	20
2.7	Metodología Hill of Value.....	21
Capítulo 3: Desarrollo del trabajo.....		24
3.1	Programación en Excel (macros).....	24
3.2	Determinación de costos .....	26
Capítulo 4: Análisis de Sensibilidad.....		30
4.1	Resultados y análisis de la variación del precio .....	30
4.1.1	Tamaño de reserva grande .....	30
4.1.2	Tamaño de reserva mediana .....	32
4.1.3	Tamaño de reserva pequeña .....	34
4.2	Resultado y análisis de la variación de la Tasa de Descuento.....	35
4.2.1	Tamaño reserva grande .....	36
4.2.2	Tamaño reserva mediana .....	38
4.2.3	Tamaño reserva pequeña .....	40
4.3	Resultado y análisis de la variación de la Razón Estéril-Mineral .....	41
4.3.1	Tamaño reserva grande .....	42
4.3.2	Tamaño reserva mediana .....	43
4.3.3	Tamaño reserva pequeña .....	45
4.4	Efecto del tamaño de la reserva .....	47
Capítulo 5: Comparación de los métodos.....		49
5.1	Comparación de resultados con Taylor y Smith.....	49
Capítulo 6: Aplicación DE metodología <i>Hill of Value</i> .....		52
Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones .....		57



Referencias.....	59
Anexos.....	61

## Índice de Tablas

Tabla 1: "Pequeña, Mediana y Gran Minería" [1].....	3
Tabla 2: "Costos y precisión de cada etapa de estudio" .....	4
Tabla 3: "Hoja Excel para datos de entrada" .....	24
Tabla 4: "Ejemplo Excel datos de entrada equipo carguío" .....	25
Tabla 5: "Ejemplo Excel datos de salida equipo carguío" .....	25
Tabla 6: "Ejemplo Flujo Caja Excel" .....	26
Tabla 7: "Resultados Macro Excel" .....	27
Tabla 8: "Características de la mina para análisis del precio".....	30
Tabla 9: "Características mina " .....	35
Tabla 10: "Datos para el cálculo del WACC" .....	37
Tabla 11: "Características de la mina para análisis de la REM" .....	42
Tabla 12: " Características de la mina" .....	47
Tabla 13: "Características utilizadas para Caso Real" .....	52

## Índice de figuras

Figura 1: "Fases de un proyecto minero" [2] .....	4
Figura 2: "Esquema Metodología" .....	5
Figura 3: "Objetivos de la Planificación Minera" .....	7
Figura 4 "Conceptos para determinar TPO" [10] .....	12
Figura 5: "Relaciones entre diferentes parámetros y la tasa de producción" .....	13
Figura 6: "Relación entre VAN y TIR" [5].....	16
Figura 7: "Buscando y escalando la Colina de Valor" [18] .....	23
Figura 10: "Funcionamiento Macro Excel" .....	28
Figura 11: "Evolución Precio del Cobre 2009 a 2020" [22] .....	29
Figura 12: "Efecto del cambio del precio Cu en VAN para reserva grande" .....	31
Figura 13: "Efecto del cambio del precio Cu en <i>Payback</i> para reserva grande" .....	32
Figura 14: "Efecto del cambio del precio Cu en VAN para reserva mediana" .....	33



Figura 15: "Efecto del cambio del precio Cu en <i>Payback</i> para reserva mediana" .....	33
Figura 16: "Efecto del cambio del precio Cu en VAN para reserva pequeña" .....	34
Figura 17: "Efecto del cambio del precio Cu en <i>Payback</i> para reserva pequeña" .....	35
Figura 18: "Efecto del cambio de la tasa de descuento en VAN para reserva grande" .....	36
Figura 19: "Efecto del cambio de la tasa de descuento en <i>Payback</i> para reserva grande" .....	37
Figura 20: Efecto del cambio de la tasa de descuento en VAN para reserva mediana" .....	39
Figura 21: Efecto del cambio de la tasa de descuento en <i>Payback</i> para reserva mediana" .....	39
Figura 22: "Efecto del cambio de la tasa de descuento en VAN para reserva pequeña" .....	40
Figura 23: Efecto del cambio de la tasa de descuento en el <i>Payback</i> para reserva pequeña".....	41
Figura 24: "Efecto del cambio de la REM en el VAN para reserva grande" .....	42
Figura 25: "Efecto del cambio de la REM en el <i>Payback</i> para reserva grande" .....	43
Figura 26: "Efecto del cambio de la REM sobre el VAN para reserva mediana" .....	44
Figura 27: "Efecto del cambio de la REM sobre el <i>Payback</i> para reserva mediana" .....	45
Figura 28: "Efecto del cambio de la REM sobre el VAN para reserva pequeña" .....	46
Figura 29: "Efecto del cambio de la REM sobre el <i>Payback</i> para reserva pequeña" .....	46
Figura 30: Efecto de tamaño de reserva en VAN" .....	47
Figura 31: Curvas de VAN y 2 veces el Capital vs Producción" .....	49
Figura 32: "Tasa de Producción vs Tamaño Reserva" .....	50
Figura 33: "Vida de la Mina vs Tamaño Reserva" .....	51
Figura 35: "Curva Tonelaje-Ley para yacimiento de Cu" .....	53
Figura 36: "VAN en función de la Ley de corte y Tasa de producción" .....	54
Figura 37: "VAN vs Ley de Corte para dos escenarios de precio" .....	55
Figura 38: "Riesgos y ganancias de las leyes corte óptimas" .....	56

## Índice de Anexos

Figura A1: "Efecto de la tasa de crecimiento esperada de los costos de extracción en la TPO" [6].....	61
Figura A2: "Relación entre la tasa de producción óptima y el costo capital" [6].....	61
Tabla B1: VAN máximos y mínimos frente a variación del precio en reserva grande".....	61
Tabla B2: "VAN máximos y mínimos frente a variaciones del precio en reserva mediana" .....	62
Tabla B3: VAN máximos y mínimos frente a variación del precio en reserva pequeña" .....	63
Tabla C1: "VAN máximos y mínimos frente a variación de la tasa de descuento en reserva grande" ..	63



Tabla C2: "VAN máximos y mínimos frente a variación de la tasa de descuento en reserva mediana"	64
Tabla C3: VAN máximos y mínimos frente a variación de la tasa de descuento en reserva pequeña"	65
Tabla D1: "VAN máximos y mínimos frente a variación de la REM en reserva grande" .....	65
Tabla D2: "VAN máximos y mínimos frente a variación de la REM en reserva mediana" .....	66
Tabla D3: "VAN máximos y mínimos frente a variación de la REM en reserva pequeña" .....	66







Universidad de Concepción  
Ingeniería Civil de Minas

### Nomenclatura

TPO: Tasa de producción óptima

IPC: Índice de precios al consumidor

LDC: Ley de corte

VAN: Valor actual neto

TPD: Toneladas por día

TPA: Toneladas por año

REM: Razón estéril – mineral

WACC: *Weighted average cost of capital* (costo promedio ponderado de capital)

M: Millones

ton: Tonelada

USD: Dólar estadounidense

min: Minuto

d: Día

TIR: Tasa interna de retorno

lb: Libra

Cu: Cobre

CC: Costo capital

CO: Costo operacional





## CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

Cuando se ha identificado que un recurso mineral tiene potencial para una explotación rentable, se seleccionan tentativamente varias opciones del proceso antes de que se pueda realizar un análisis económico adicional. Algunas opciones como los métodos adecuados de extracción o procesamiento pueden estar limitados por la naturaleza física y la ubicación del depósito. Las opciones restantes se eligen para maximizar el valor de cualquier inversión realizada en el proyecto. La vida útil de la mina o la tasa de producción generalmente se seleccionan sobre esta base.

La selección de la tasa de producción es una de las decisiones más cruciales que se toman en el desarrollo de un proyecto minero. Este único factor determinará los costos de capital, costos operacionales y la vida de la mina, lo que tendrá directa influencia en la economía y viabilidad del proyecto. No es raro que la tasa de producción se decida arbitrariamente, antes de que comience cualquier evaluación técnica y, a menudo, no se considera cuando hay mejores datos disponibles. Con frecuencia esto resulta en una mina y planta de procesamiento que no tienen el tamaño adecuado para el depósito. En la mayoría de los casos es demasiado grande generando costos que el depósito no puede soportar.

Existen varios métodos en la industria minera para determinar la tasa de producción y se observa un consenso colectivo en cuanto a la gran influencia del tamaño de la reserva de mineral en esta decisión. Sin embargo, hay muchos otros factores que afectan este cálculo y que se estudiarán más adelante.

En este proyecto se hará una revisión de diferentes métodos existentes tanto empíricos como matemáticos para calcular la tasa de producción de una mina y utilizarlos para diferentes tamaños de reserva. La comparación de resultados entre modelos empíricos y métodos matemáticos muestra hasta qué punto los primeros son confiables para definir la tasa de producción óptima de una mina.



## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivos Generales

El objetivo general de este estudio es definir el método más apropiado para el cálculo de la tasa de producción óptima en diferentes escalas de minería a cielo abierto, procurando hacerlo de manera integral, donde la clave será abarcar la mayor cantidad de escenarios en que se puede encontrar un proyecto minero para que los resultados sean lo más representativos posibles y se puedan ajustar a cualquier tipo de yacimiento con las condiciones propias de cada uno.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Hacer una revisión de los métodos comunes que existen para definir la tasa de producción.
- Realizar análisis de sensibilidad para definir el efecto que tienen la tasa de descuento, precio, REM y ley de corte, sobre la tasa de producción con diferentes tamaños de reserva.
- Comparación de diferentes métodos de cálculo de la tasa de producción con los resultados anteriores.
- Utilizar el método *Hill of Value* para definir la tasa de producción de un caso real.
- Analizar los riesgos o ganancias que implica elegir una ley de corte u otra y, por lo tanto, cuál es la tasa de producción más conveniente.

## 1.2 Propuesta de Trabajo

Antes de comprometerse con una inversión importante, los encargados de tomar decisiones deben abordar preguntas como: “¿Qué pasaría si...?”, por ejemplo, qué pasaría si algún factor varía (como el precio del mineral o los impuestos) o ¿Qué sucederá con el retorno de la inversión?, este tipo de interrogantes generalmente están acompañadas de un análisis de sensibilidad, los cuales estudian el comportamiento de una o más variables de entrada para determinar cuánto cambia el retorno de la inversión.



En este trabajo se pretende realizar un estudio de cómo la variación de diferentes parámetros afecta en el desempeño de 3 casos de un proyecto minero: de pequeña, mediana y gran escala, con el fin de analizar cómo conseguir la vida óptima de la mina, es decir, la que entregue el mayor retorno monetario. Los tamaños de las reservas de mineral pueden dividirse principalmente en 3: pequeña, mediana y gran minería. La sociedad nacional de minería (SONAMI) [1] hace una división de éstas en términos de las toneladas de mineral extraídas por año, resumidas en la Tabla 1.

**Tabla 1: "Pequeña, Mediana y Gran Minería" [1]**

Tamaño	Toneladas Extraídas por año
Pequeña Minería	Menor a 100 000
Mediana Minería	100 000 a 3 000 000
Gran Minería	Mayor a 3 000 000

Además, dentro de los métodos existentes para la selección de la vida de la mina se escogerán algunos de los más importantes para comparar los resultados que se obtengan y evaluar qué tan ciertos pueden llegar a ser.

Es importante mencionar las diferentes fases que existen en el desarrollo de un proyecto minero, dentro de las cuales, la de planificación es la relevante para este trabajo. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra cada una de ellas. La etapa de planificación consta de un estudio conceptual, uno de pre factibilidad y otro de factibilidad.

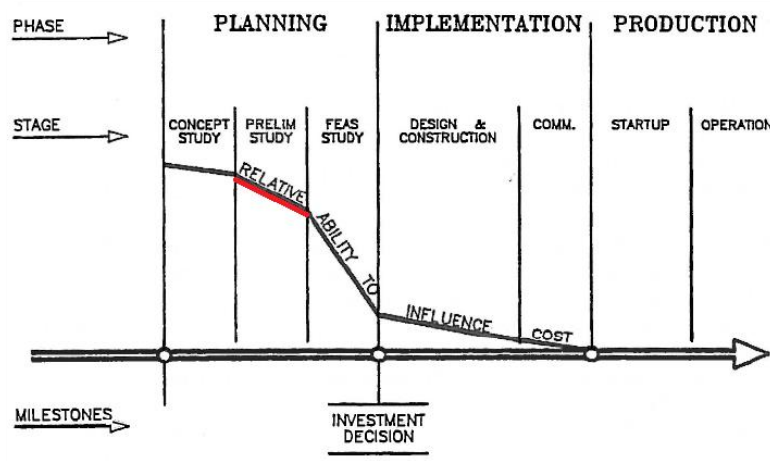


Figura 1: "Fases de un proyecto minero" [2]

Este trabajo estará enfocado en la etapa de pre factibilidad de un proyecto minero (se muestra en rojo en la Figura 1), es decir, la etapa intermedia (entre el estudio conceptual y el de factibilidad) que tiene por objetivo determinar si el proyecto justifica o no un análisis detallado mediante un estudio de factibilidad y si algún aspecto del proyecto es crítico para su viabilidad y requiere una investigación en profundidad a través de estudios funcionales o de apoyo [2]. Los costos de estos estudios van a depender del tamaño y naturaleza del proyecto y varios otros factores, pero, para dimensionar la relación entre ellos, se pueden expresar como un porcentaje del costo capital del proyecto como se observa a continuación. Por otro lado, la precisión de los costos de capital y de operación aumenta a medida que el proyecto avanza desde la etapa conceptual hasta la de factibilidad. En la Tabla 2 se muestra los costos de cada estudio en función del costo de capital junto con el rango de precisión aceptable para cada etapa.

Tabla 2: "Costos y precisión de cada etapa de estudio"

Etapa	% de Costo Capital	Rango de Precisión
Estudio Conceptual	0.1 a 0.3% del Costo Capital	±30%
Estudio de Pre Factibilidad	0.2 a 0.8% del Costo Capital	±20%
Estudio de Factibilidad	0.5 a 1.5% del Costo Capital	±10%



### 1.2.1 Metodología

En la Figura 2 se muestra un esquema que resume los conceptos principales de la metodología a utilizar. En primer lugar, se debe hacer una investigación de los métodos que existen para determinar la producción, cómo se evalúan, que información se necesita y qué resultados entregan. Con esto se debe hacer un estudio de los conceptos involucrados, ya sea del área económica o minera para comprender e interpretar de manera adecuada los resultados que se obtengan.

Posterior a esto se procederá a hacer un análisis de sensibilidad de las variables precio, tasa de descuento y razón estéril-mineral a 3 tamaños de reserva (grande, mediana y pequeña) para ver cómo varía la tasa de producción. También se desea analizar cómo afecta el tamaño de la reserva en la TPO. Todo lo anterior se hará con ayuda de un archivo Excel confeccionado para este proyecto, que permite cambiar las variables de entrada para cada mina en específico. Una vez realizado el análisis de sensibilidad y con los resultados obtenidos en base al VAN, se hará una comparación de diferentes métodos para determinar la tasa de producción óptima y analizar sus diferencias.

Finalmente se estudiará un yacimiento real al que se le aplicará la metodología de *Hill of Value* para encontrar la mejor combinación de variables que permitan obtener el mayor valor (VAN), evaluando qué pasaría en los diferentes escenarios a los que se puede enfrentar el proyecto minero.



Figura 2: "Esquema Metodología"



## CAPÍTULO 2: ANTECEDENTES

### 2.1 Planificación en Minería a Cielo Abierto

El diseño a cielo abierto se elabora en varias etapas que consisten en diseñar y planificar un esquema o conjunto de esquemas alternativos, seguidos por una evaluación y selección del más conveniente. El diseño final de la mina a cielo abierto depende de factores que no pueden ser controlados por el ingeniero en minas, tales como: la geometría de cuerpo mineralizado, la distribución de la ley dentro del yacimiento, la topografía, ángulo máximo de talud permitido, etc. Sin embargo, la economía del programa minero está relacionada con los factores que sí son determinados por el ingeniero en minas, como la elección de las tasas de producción, equipos, secuencia de extracción, entre otros.

El diseño y la planificación de minería a cielo abierto es un proceso largo de toma de decisiones que lleva a un plan realista y práctico para cosechar de manera rentable los recursos minerales, intentando predecir todos los riesgos que puedan existir. La planificación puede ser llevada a cabo para un amplio rango de plazos, desde muy corto, como por ejemplo el próximo turno de actividades mineras, a muy largo, como por ejemplo la extracción rentable a lo largo de la vida completa de la mina. Para lograr la excelencia en planificación minera a largo plazo se involucra una buena toma de decisiones en cuanto al diseño del pit, secuencia de extracción, tasa de producción, método de extracción, entre otros, las cuales deben ser tomadas de manera simultánea y en condiciones de alta incertidumbre [3].

La planificación es específica para cada mina, puesto que cada una tiene sus propias características topográficas o del tipo de reserva, tales como tamaño, leyes, inclinación, etc. No obstante, los objetivos de una planificación son iguales para todos, los que, en términos generales, serán conseguir la mejor rentabilidad del proyecto. En la Figura 3 se observa un resumen de ellos, clasificados en objetivos de la mina, de equipos y de la planta de procesamiento. Debido a que se espera obtener los menores costos posibles junto con las máximas ganancias, la planificación de una mina a cielo abierto está estrechamente relacionada con la economía, que a su vez es influenciada por varias condiciones mineras y geológicas.



Figura 3: "Objetivos de la Planificación Minera"

## 2.2 Tasa de Producción

La tasa de producción óptima (TPO) es uno de los parámetros más importantes en la evaluación de factibilidad de un depósito mineral y que influyen el diseño y el éxito económico de un proyecto [4-6]. La TPO también se puede expresar como la vida útil óptima de la mina en años, ya que la vida útil esperada se determina dividiendo la TPO por año en las reservas de mineral estimadas. Una vida útil determinada de manera incorrecta puede llevar a que se rechacen erróneamente proyectos o también a una explotación ineficiente [5].

La selección y dimensionamiento de los equipos de la mina y de la planta, así como también la estimación de los requerimientos de mano de obra, se basan principalmente en la producción de la mina. En consecuencia, los desembolsos iniciales de capital y los gastos operacionales anuales están directamente influenciados por la tasa de producción seleccionada [6].

La TPO se selecciona basándose en la maximización del valor presente neto de los flujos de caja. Sin embargo, la tasa de producción seleccionada para una mina en particular puede ser algo más alta o más baja que la teórica, debido a otras variables como, por ejemplo, la probabilidad de





que otras reservas sean descubiertas, la configuración del cuerpo del mineral, los valores residuales o de recuperación de la mina y/o planta.

A pesar de la importancia de la TPO, se le ha dedicado muy poco tiempo su determinación y, en su lugar, frecuentemente se han aplicado “reglas de oro” para seleccionar la vida de la mina, sin tomar en consideración las implicancias económicas de dicha selección. Una justificación para una tasa de producción en particular, a menudo se basa en un requisito arbitrario para una vida útil de, por ejemplo, 5, 10 o 15 años, demostrándose que para minas con alta ley y bajo tonelaje se llega a un resultado que no es el óptimo.

### 2.3 Factores que afectan el cálculo de la tasa de producción

Algunos factores que afectan la selección de una tasa de producción óptima no pueden ser influenciados por consideraciones del diseño técnico, mientras que otros pueden depender directamente de la elección de los parámetros de la mina. Por ejemplo, la concentración del mineral, el precio del producto, los costos básicos de mano de obra o servicios (generalmente), son parámetros no discrecionales. En cambio, el método y secuencia de extracción o el tamaño de la mina (toneladas por año) son parámetros discrecionales. Los factores relevantes en la TPO se pueden clasificar en 3 tipos como se describe a continuación [6].

- Factores relacionados con las características físicas del depósito
- Factores Económicos
- Factores Financieros

#### 2.3.1 Características del Depósito:

Un cuerpo mineralizado está definido como un depósito que contiene minerales metálicos de concentración suficientemente alta como para ser extraídos y se pueda recuperar el metal de una manera rentable. El beneficio, a su vez, es una función de los precios de mercado y los costos de producción. Como los precios y los costos van cambiando, también lo hace el tamaño de la reserva de mineral. Los precios más altos implican mayores reservas de mineral, ya que material con baja concentración de minerales valiosos se puede recuperar económicamente.



El tamaño de una reserva de mineral es una variable importante en el cálculo de la tasa de producción [5]. En cada proyecto se elige una ley de corte inicial para diferenciar los bloques de mineral de los bloques de estéril y se calcula el tamaño de la reserva. Este proceso se debe realizar de manera iterativa hasta encontrar la ley de corte que entregue los valores óptimos. Si la ley de corte aumenta, el tamaño de la reserva de mineral va a disminuir y, por lo tanto, habrá menos mineral disponible para extraer provocando que la tasa de producción disminuya [5] [7] [8] [6]. Cuando la ley del mineral incrementa, la riqueza de la mina por tonelada de mineral aumenta. Según el estudio realizado por Sabour [6] hay una relación directa entre la ley del mineral y el tamaño óptimo de la mina, lo que contradice lo propuesto por Wells [8], quien concluyó que el tamaño óptimo de la mina es independiente de la riqueza de la mina en términos de beneficio por tonelada. Esta diferencia en los resultados se puede atribuir a los distintos criterios de optimización aplicados.

### 2.3.2 Factores Económicos:

Los factores económicos que más afectan la tasa de producción óptima son: el precio del material que se produce, la tasa de cambio esperada del precio del mineral y la tasa de cambio esperada de los costos debido a la inflación u otros factores.

El precio del mineral que se produce afecta directamente la ganancia por tonelada de mineral extraído. A medida que el precio del mineral aumenta, las ganancias por toneladas aumentan y, por lo tanto, la tasa de producción óptima aumenta. El efecto que tiene el precio del mineral es similar al que tiene la ley del mineral, ya que ambos tienen efectos parecidos en las ganancias por tonelada de mineral producidas. El precio del mineral a lo largo de la vida de la mina no es constante, varía año a año, por lo tanto, es importante tomar en cuenta la tasa de cambio esperada del precio del mineral y discutir su efecto en la tasa de producción óptima. Según Sabour, existe una relación inversa entre la tasa de crecimiento esperada del precio del mineral y la tasa de producción óptima [6].

Tasas de producción altas generan mayores ganancias anuales netas, pero para un corto periodo de tiempo, en cambio, tasas de producción menores generan ganancias anuales netas más bajas, pero para un periodo de tiempo más prolongado. Además del capital de inversión adicional que se requiere existe un costo de oportunidad de aumentar la tasa de producción. Este costo de



oportunidad son las ganancias futuras que se pierden cuando el mineral se agota en un corto periodo de tiempo en lugar de uno largo. El proceso de seleccionar una tasa de producción óptima es una comparación implícita entre el valor adicional que se podría generar por aumentar la tasa de producción y el costo de oportunidad asociado. El valor del costo de oportunidad depende de la tasa de descuento a la que los ingresos anuales se traen al presente. A medida que la tasa de descuento aumenta, el valor presente de las ganancias generadas en periodos lejanos al actual disminuye. La tasa de descuento efectiva aplicada a las ganancias anuales equivale al costo capital de la compañía menos la tasa de crecimiento esperada del precio del mineral. A medida que la tasa de crecimiento esperada aumenta, la tasa de descuento efectiva disminuye y, por ende, el valor presente de las ganancias lejanas a la actualidad aumenta. En consecuencia, al aumentar la producción el costo de oportunidad también lo hace, dándole una ventaja a tasas de producción más bajas. En el estudio realizado por Smith [7] se muestra que la tasa de producción óptima aumenta a medida que la tasa de descuento lo hace, sin embargo, esto se nota hasta un valor de 10% para la tasa de descuento, ya que para valores superiores no cambia de manera apreciable, coincidiendo con Glanville [9] que llegó a resultados similares. En relación a los impuestos, Smith [7] comenta que no influye de manera significativa a la tasa de producción, lo que implica que las evaluaciones preliminares pueden llevarse a cabo antes de impuestos.

Para hacer todos los cálculos financieros es importante determinar los costos de capital y costos de operación. Los costos de capital son aquellos gastos necesarios para adquirir o mejorar bienes de capital que son bienes a largo plazo que normalmente no se compran o venden en el transcurso de la operación. En otras palabras, los costos de capital son los gastos necesarios para llevar a la mina al punto en que puede financiarse por sí sola mediante la venta de sus productos. Wells [8] indica que se puede considerar que los costos de capital tienen una porción fija y una variable. Estos son únicos para cada operación y aumentan de manera escalonada con el tamaño de la mina. Los gastos operacionales, por otro lado, son los que se efectúan en el curso de las operaciones de producción y también se pueden dividir en porciones fijas y variables, donde los costos fijos no varían con el volumen de producción. Los costos de administración, seguros, y el costo del personal de ingeniería son costos operacionales fijos. Los costos operacionales variables cambian



de manera directa con la cantidad de producción. Ejemplos de ellos pueden ser costos de mano de obra, combustible y reactivos. [5]

Los costos de operación suelen aumentar de un año a otro. El tamaño óptimo de una mina se ve muy afectado por la tasa esperada del aumento de los costos de operación. Una tasa de crecimiento más elevada indica que los costos de operación son cada vez mayores de un año a otro, lo que hace que los tiempos de vida más cortos sean más económicos y viceversa. Sabour [6] llegó a la conclusión que la tasa de producción óptima aumentará cuando la tasa de crecimiento de los costos de operación lo haga y como consecuencia el tiempo de vida del proyecto va a disminuir, esto se puede observar en la Figura A1 del Anexo A.

En resumen, en la Figura 4, se observan las relaciones entre los diferentes parámetros económicos y la tasa de producción. De aquí se obtiene que, a menores tasas de producción, los costos totales (costos operacionales + costos de capital) son mayores, los cuales van disminuyendo a medida que la tasa de producción aumenta hasta una cierta tasa, después de la cual comienzan a aumentar nuevamente. Vidas muy cortas (tasas de producción altas) requieren de costos totales mayores debido a que se debe hacer una inversión considerablemente superior, mientras que vidas de la mina más largas tienen costos operacionales mayores debido a las bajas tasas de producción. Los costos operacionales totales son inversamente proporcionales a la tasa de producción, ya que la parte fija de estos se distribuye entre mayores tonelajes a tasas de producción más altas. Por lo tanto, el enfoque debería ser operar en un rango de TPO donde los costos de extracción por unidad sean más bajos [10].

También se muestra la relación entre la tasa de producción y el VAN del proyecto que toma en cuenta el valor del dinero en el tiempo y, por lo tanto, se debe considerar a la hora de tomar una decisión. Esto en particular será abordado de manera específica más adelante.

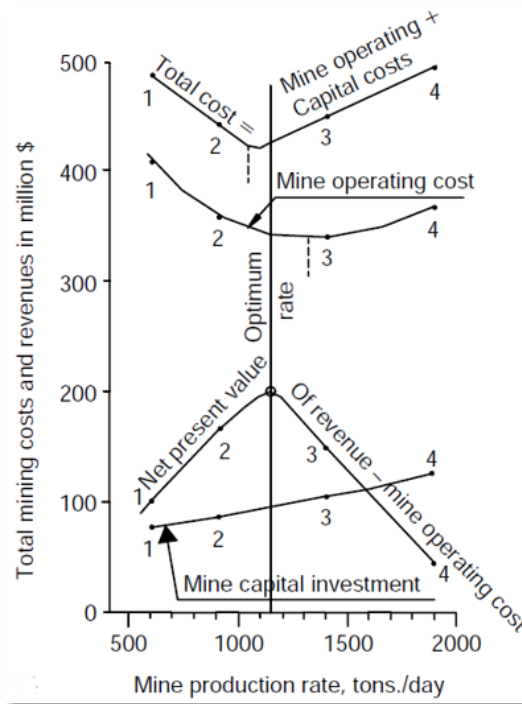


Figura 4 "Conceptos para determinar TPO" [10]

### 2.3.3 Factores Financieros:

Las empresas suelen recaudar fondos para financiar proyectos de diferentes maneras que incluyen deudas, acciones y la financiación interna. El flujo de caja de un proyecto debería ser suficiente para pagar el capital prestado, pagar el interés y producir una ganancia neta. La decisión financiera de una empresa determina su estructura de capital que, a su vez, determina el costo de capital de la empresa. Dicho costo es el que se debe usar para descontar los flujos de caja futuros al presente y, por lo tanto, afecta la decisión de inversión, así como la política de planificación en la empresa. Sabour afirma que existe una relación cóncava entre el costo de capital y la tasa de producción óptima como se puede apreciar en la Figura A2 del Anexo A [6]. La diferencia en el cambio relativo entre el valor presente de los costos totales de extracción y el valor presente de las ganancias futuras esperadas, debido al incremento del costo de capital, tiene como resultado la concavidad en la relación entre el costo de capital y el tamaño de la mina.



## 2.4 Factores que se ven afectados por la tasa de producción

En el ítem anterior se detallaron los factores que afectan el resultado del cálculo de la tasa de producción. Por otra parte, se encuentran los factores que se ven afectados por la tasa de producción definida. En la Figura 5, se muestra un diagrama de las relaciones entre los diversos factores y la tasa de producción.



Figura 5: "Relaciones entre diferentes parámetros y la tasa de producción"

Los parámetros geométricos de la mina como son la altura de banco, ancho de rampa, pendientes, etc., pueden ser afectados por la tasa de producción, puesto que si, por ejemplo, aumenta la producción se requerirán equipos de mayor capacidad cuyas especificaciones a su vez determinarán la altura y pendiente de banco y el ancho y pendiente de caminos y rampas. Sin embargo, estos parámetros pueden no verse alterados al considerar la opción de aumentar el número de equipos en lugar de cambiar las especificaciones, cuyo análisis económico deberá ser contrastado con la primera opción para determinar el mejor escenario.



La capacidad de la planta de procesamiento será calculada de acuerdo a las toneladas de mineral que se extraigan diariamente, por lo tanto, también depende directamente de la tasa de producción. Si ésta es baja, se necesitará una planta de procesamiento acorde a esa cantidad de mineral, puesto que más chica no daría abasto y más grande no se justificaría.

En relación a la ley de corte, ésta depende de parámetros económicos. Si los costos de extracción disminuyen o el precio del mineral aumenta, se provoca una disminución en la ley de corte, eso significa que el tamaño de la reserva crece y puede existir un aumento de la tasa de producción. A su vez, la tasa de producción determina el nivel de costos de capital y de operación. Altas tasas requieren mayores gastos de capital para un desarrollo minero más extenso y plantas de procesamiento más grandes, pero gozan de menores gastos operacionales. Estos costos afectan la rentabilidad de la operación, lo que lleva directamente de vuelta al tamaño de la reserva de mineral, por lo tanto, si los costos se ven afectados, la ley de corte también lo hará y se redefinirá el tamaño del yacimiento. Junto con lo anterior y la cantidad de mineral extraída a diario, se tendrá un impacto en el cálculo del Valor Presente Neto y, dependiendo de las condiciones, podrá ser positivo o negativo.

## 2.5 Métodos para evaluar el rendimiento de un proyecto

En cada etapa de un proyecto minero, antes de tomar una decisión se debe hacer una evaluación económica y para esto se ocupan diferentes criterios que se detallan a continuación.

### 2.5.1 Valor Actual Neto (VAN)

Es una de las principales mediciones que se utiliza para evaluar un proyecto y que se basa en la información entregada por los flujos de caja descontados.

El valor presente neto mide la rentabilidad de un proyecto en términos de su efecto incremental estimado sobre el valor de mercado de la empresa. En otras palabras, el valor presente neto describe las ganancias o pérdidas financieras con lo que la empresa puede decidir si procede o no con el proyecto. La ecuación ( 1 ) muestra cómo calcular este criterio.



$$VAN = -I + \sum_{t=1}^n \frac{Ft}{(1+k)^t} \quad (1)$$

Donde,  $I$ : es la inversión inicial (\$),  $Ft$ : son los flujos de caja en cada año (\$),  $k$ : es la tasa de descuento (%),  $t$ : es el año en el que se está calculando (adimensional) y  $n$ : es la vida de la operación (adimensional).

La tasa de descuento refleja el riesgo asociado a una inversión propuesta, ya que se define como la tasa de interés utilizada en el análisis del flujo de caja descontado para determinar el valor presente de los flujos de caja futuros. Al examinar los flujos de caja descontados, se observa que una tasa del 15% es común en la industria minera [11].

### 2.5.2 Tasa interna de retorno (TIR)

La TIR establece la tasa de retorno de un proyecto que se puede comparar con la tasa de retorno de las inversiones con riesgo similar en el mercado financiero. Es la tasa de descuento en la que el valor actual neto es igual a cero y el proyecto alcanza el punto de equilibrio. Si bien la TIR se interpreta como la tasa de rendimiento que gana el proyecto, en realidad significa que si la tasa de rendimiento requerida del mercado financiero fuera de este valor, el proyecto simplemente alcanzaría el punto de equilibrio. [5]

Cavender [5] muestra en su estudio, la relación entre el valor actual neto y la tasa interna de retorno que se puede ver en la Figura 6. Como se explicó anteriormente la TIR está dada por el punto en el cual el VAN es igual a cero.



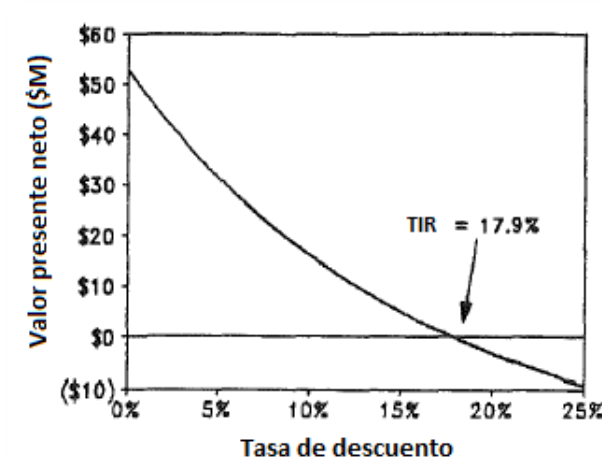


Figura 6: "Relación entre VAN y TIR" [5]

El uso de la TIR puede llevar a ciertas complicaciones y ocurren generalmente cuando se hacen comparaciones directas entre proyectos competidores, cuando el capital está racionado por restricciones presupuestarias y actúan como señales ambiguas o incorrectas sobre cuál de los proyectos es más rentable. El ranking de diferentes proyectos según la TIR puede no ser el mismo que si se hace en base al VAN. La tasa interna de retorno sólo describe el margen de la inversión sobre el costo de los fondos en porcentaje. Sin embargo, el valor actual neto presenta el margen en dólares descontado a su valor presente. Maximizar el VAN proporciona los mayores retornos actuales en dólares, mientras que maximizar la TIR puede no hacerlo. A pesar de estas dificultades, la TIR es el criterio financiero más utilizado, aunque rara vez se usa solo. [5]

### 2.5.3 Periodo de recuperación (*Payback*)

Además de estos dos criterios principales existe un tercer criterio de apoyo que se usa para la toma de decisiones de un proyecto minero que es el periodo de recuperación (*Payback*). Este periodo es el tiempo que tarda un proyecto en devolver al inversor el dinero que se pone en la empresa. Cuanto más rápido sea el reembolso, el tiempo que estará en riesgo la inversión del propietario será menor. El cálculo del periodo de recuperación de la inversión es bastante sencillo una vez que se tiene el flujo de caja descontado. Los flujos de caja simplemente se grafican en forma acumulativa a partir de cero gastos antes del compromiso del proyecto. Los flujos de caja iniciales son invariablemente salidas de efectivo, es decir, flujos de caja negativos. El periodo de recuperación



es el tiempo que tarda el flujo de caja acumulado en volver a ser positivo. El periodo de *Payback* no siempre entrega resultados confiables y esto es porque se podría decir que tiene dos desventajas, la primera, que no considera el valor del dinero en el tiempo, y la segunda, que no toma en cuenta los flujos de efectivo que se producen después del período de recuperación. Para solucionar la primera desventaja es que algunos analistas descuentan los flujos de efectivo antes de calcular el periodo de recuperación y de esa manera se obtiene el *Payback* descontado [12]. El periodo de *Payback* descontado resultante es una medida mucho más precisa de los flujos de caja iniciales, pero aun así no mide los beneficios del proyecto más allá de ese periodo [13].

#### 2.5.4 Costo promedio ponderado de capital (WACC)

Otro método de valoración de inversiones es el Costo Promedio Ponderado de Capital (WACC en inglés), el cual consiste en el cálculo del costo de capital de una empresa en el que cada categoría se pondera proporcionalmente. Para entender de qué se trata este concepto es necesario saber que un proyecto puede ser financiado por dos fuentes: deuda (bancos) y acciones y el porcentaje en el que se elija cada uno está debidamente considerado en el WACC. Este valor se puede interpretar de 3 maneras, la primera, como un activo de la compañía: es la tasa que se debe usar para descontar el flujo de caja esperado; la segunda, como un pasivo: es el costo económico para la compañía de atraer capital al sector; y la tercera, como inversores: es el retorno mínimo que estos esperan al invertir en deuda o patrimonio neto de la compañía. Para calcular el WACC se debe multiplicar el costo de cada componente de capital por su peso proporcional y su ecuación se presenta a continuación.

$$WACC = \frac{E}{V} * Re + \frac{D}{V} * Rd * (1 - Tc) \quad (2)$$

Donde,  $E$ = Cantidad financiada por acciones,  $D$ = Deuda financiera,  $V=E+D$ ,  $Re$ = Costo de las acciones,  $Rd$ = Costo de la deuda financiera,  $T$ = Tasa de impuestos [14].

#### 2.6 Métodos comunes para definir la tasa de producción

La tasa de producción y la vida de la mina pueden ser entendidos como sinónimos puesto que están directamente relacionados, tal como se observa en la ecuación ( 3 ).



$$\text{Vida de la mina} = \frac{\text{Toneladas de material a extraer}}{\text{producción diaria} * \text{días de trabajo al año}} \quad (3)$$

### 2.6.1 Regla de Taylor

Una de las “reglas de oro” más reconocidas y que tiene que ver con las características físicas del depósito es la regla de Taylor, quien estudió muchos proyectos existentes (algunos operando y otros sólo planeados de manera conceptual), incluyendo un amplio rango de tamaños del cuerpo mineralizado, así como también de diferentes formas (sin incluir los depósitos delgados y de gran extensión lateral), de los que se conocían bien las reservas totales de mineral antes de realizar el diseño principal. Taylor encontró que las tasas de extracción parecían proporcionales a la potencia de 3/4 del tonelaje de mineral en lugar de la potencia de 2/3. El diseño de las vidas de las minas era proporcional a la raíz cuarta del tonelaje de mineral, lo que lleva a la conocida fórmula de Taylor que se aprecia a continuación [2].

$$\text{Vida de la Mina} = 0.2 * \sqrt[4]{\text{Tonelaje de Mineral}} \quad (4)$$

En esta ecuación es irrelevante si se usan toneladas cortas o métricas. Es más conveniente utilizar cantidades expresadas en millones y, excepto en condiciones especiales, el rango práctico de variación parece estar dentro de un factor de 1.2 arriba y abajo. De esta manera la regla de Taylor puede re expresarse como sigue:

$$\text{Vida de la Mina} = (1 \pm 0.2) * 6.5 * \sqrt[4]{\text{Tonelaje de Mineral en millones}} \quad (5)$$

### 2.6.2 Determinar la vida de la mina utilizando flujos de caja descontados

Para llegar a la vida óptima de la mina se debe buscar el periodo que entregue el valor presente neto máximo. Para esto se estiman costos e ingresos con diferentes tasas de producción para el proyecto, los que después son descontados para encontrar el VAN o la TIR. El proceso continúa de manera iterativa hasta que se determine el mayor VAN. La rentabilidad de un proyecto va a depender de la ley de corte, del tonelaje de reservas, de los precios de mercado del mineral que se va a producir, de los costos de capital y operacionales y, finalmente, de la tasa de producción. Estas relaciones ya fueron explicadas en secciones anteriores.



### 2.6.3 Determinar la vida de la mina utilizando técnicas de valoración de opciones

Varios factores que inciden en los cálculos de la valoración de las minas y, por lo tanto, en la selección de la tasa de producción óptima, no se reflejan en la técnica del flujo de caja descontado. Este método, a diferencia del anterior, sí considera la capacidad de la administración de cambiar las leyes de corte o las tasas de producción o, simplemente, de cerrar temporalmente las operaciones, en respuesta a los cambios en el precio del mineral. La técnica de valoración de opciones permite al analista calcular un valor para la opción de cambiar las tasas de producción o las leyes y examinar las compensaciones entre los costos fijos y variables.

El valor de la opción de abrir y cerrar una mina (pero no abandonar) en respuesta a cambios en el precio del mineral, depende de los costos de producción, precios actuales y la volatilidad de esos precios. Si se detienen las operaciones cuando los precios caen considerablemente por debajo de los costos, el proyecto evitará las grandes pérdidas que ocurren durante los periodos de precios bajos. El valor de cada opción, los dólares ahorrados o perdidos durante los periodos de precios bajos, se calcula fácilmente considerando los últimos años de operaciones ya existentes.

El valor de una mina va a estar dado por la solución de dos ecuaciones diferenciales parciales, sujetas a condiciones límite específicas para cada proyecto. Aparece en la ecuación la variable “tasa de producción” que describe el valor del proyecto cuando está abierto. Al igual que con la técnica de flujo de caja descontado, las ecuaciones se resuelven utilizando valores de la tasa de producción del rango de interés, y la tasa óptima es el nivel en el que se maximiza el valor del proyecto. El método empírico propuesto por McKnight [16] puede manejar situaciones más sofisticadas que la técnica analítica y es más fácil de aplicar. La distribución de los precios posibles está determinada por el precio actual y su volatilidad históricamente observada. Luego se usa una regla de decisión para relacionar el precio con el estado operativo del proyecto: si el precio promedio durante un periodo es suficientemente inferior al costo de producción para ese periodo, la mina cerrará al comienzo del siguiente periodo. Cuando la mina cierra, se incurre en un costo de cierre, la mina permanecerá cerrada hasta que el precio exceda el costo de producción por algún margen, momento en el cual se volverá a abrir y se incurrirá en algún gasto inicial. El proyecto continuará de esta



manera y la producción se llevará a cabo según lo permitan los precios, hasta que se agote el depósito.

#### 2.6.4 Modelos de riesgo estocástico

El objetivo del modelamiento de riesgo estocástico es cuantificar la distribución de probabilidad de posibles resultados. Tal modelamiento revelará la probabilidad de un resultado particular además de la magnitud de la medida de rentabilidad dado ese conjunto de eventos. Para construir dicho modelo, se grafican distribuciones de posibles valores para algunas o todas las variables que sean consideradas con mayor probabilidad de variación en el análisis de flujo de caja. Luego se utiliza una técnica de Monte Carlo [5]: se emplea un número aleatorio para seleccionar un valor para cada variable de esa distribución de variables y luego se calculan los flujos de caja, el VAN y/o la TIR. Estos datos se almacenan y el proceso se repite, generalmente varios cientos de veces, creando una distribución de valores para el VAN o la TIR. Esto continúa hasta que las iteraciones adicionales ya no cambien significativamente la forma o las estadísticas de la distribución. Posteriormente, se traza la distribución, lo que se traduce en un histograma de VAN o TIR y el posible rango de resultados.

#### 2.6.5 Diferentes Análisis Financieros

Dentro de los estudios que se encuentran disponibles sobre el cálculo de la producción, algunos autores usaron diferentes técnicas que se resumen a continuación.

Wells [8] describió un método en el cual la selección de la tasa de producción óptima se hacía utilizando un radio del valor presente PVR como criterio de optimización. Este radio se define como la razón entre el valor presente neto de flujos de caja positivos PVOOUT y el valor presente neto de flujos de caja negativos PVIN. Un  $PVR < 1$  indica un retorno de la inversión insatisfactorio, un  $PVR = 1$  indica un retorno de la inversión aceptable y un  $PVR > 1$  indica un retorno superior al requisito mínimo. En este caso, la tasa de producción óptima será la que entregue el mayor PVR.

Por otro lado, Smith [7] llegó a la conclusión que la tasa de producción óptima se encuentra dentro de un rango óptimo de tasas de producción. El límite superior de este rango está determinado por el valor máximo del VAN. El límite inferior está determinado por el punto en el cual el flujo de



caja es más eficiente para pagar el costo de capital dos veces. Los dos puntos de valor indican un rango de tasas de producción entre el punto de máxima capacidad para reembolsar capital y el punto de máxima capacidad para proporcionar un retorno de la inversión. Bajo este rango, el proyecto puede no estar funcionando a su máximo potencial y sobre este rango, es probable que la tasa de producción sea demasiado alta.

Sabour [6] utilizó un análisis marginal para llegar a la tasa óptima de producción asumiendo que la TPO será la que resulte cuando el valor presente de los costos marginales sea igual al valor presente de los ingresos marginales. El modelo se enfoca en los efectos incrementales de un aumento en la tasa de producción, tanto en el valor presente de los costos totales de extracción PVMC, como en el valor presente de los ingresos futuros esperados PVMR. Si PVMR es menor que el PVMC, quiere decir que la mina está sobredimensionada y la tasa de producción óptima debe ser menor a la tasa dada. Si el PVMR es mayor que el PVMC, entonces la mina está subvalorada y la tasa de producción óptima debe ser mayor a la utilizada. Finalmente, el modelo busca la tasa de producción en la que PVMR sea igual a PVMC, lo que, siguiendo la teoría de microeconomía básica, será la tasa de producción que maximizará el VAN de una inversión minera.

Neingo, Tholana y Nhleko [17] dividieron su trabajo para determinar la TPO en tres categorías, estas son renta económica, vida mínima de la mina y formula empírica. Ellos definen la renta económica como la cantidad extra de dinero que gana un inversionista por el uso actual de un recurso natural como la tierra. En esta categoría la tasa de producción se basa en la noción de obtener un rendimiento por el uso presente y/o futuro de los recursos naturales, en particular, los minerales. En cuanto a las fórmulas empíricas, o también conocidas como “reglas de oro”, se utilizaron dos, una fórmula basada en el tamaño de la reserva y la otra basada en la geometría. La conclusión de su trabajo fue que las reglas de oro no son aplicables a las operaciones mineras ya que encontraron variaciones de hasta un 218% entre ellas.

## 2.7 Metodología Hill of Value

Esta metodología se introduce en un documento llamado “*How Mining Companies Improve Share Price by Destroying Shareholder Value*” [18] en el que el autor menciona que, de acuerdo a su investigación, está claro que existe una falta general de comprensión entre los tomadores de



decisiones y aquellos que juzgan sus acciones, en cuanto a lo que crea y destruye el valor de una operación minera.

En un mundo ideal, las toneladas y onzas reportadas como reservas agregarían valor. Si esto fuera así, entonces “más es mejor y menos es peor” sería la conclusión válida. Sin embargo, las “reservas” para muchas operaciones contienen onzas destructoras de valor, situación en la que “más es peor y menos es mejor” sería la conclusión correcta pero no intuitiva.

Por otro lado, Hall afirma en su documento que cuando se hacen estudios de factibilidad, si el proyecto es aparentemente saludable y robusto, generalmente, no habrá ningún intento de encontrar un conjunto de opciones que proporcione un resultado significativamente mejor. Es común escuchar que un proyecto que se desarrolla después de un estudio de factibilidad favorable está siendo “optimizado”. Por lo general, esto significa encontrar formas mejores o más baratas de implementar la estrategia identificada por el estudio y raramente es buscar una estrategia diferente y mejor.

Para un depósito mineral dado, los principales parámetros sobre los que una empresa minera puede tomar decisiones independientes son, por lo general, los métodos de extracción, la tasa de producción y la ley de corte. Dado que el tamaño y la forma del yacimiento mineral y, por lo tanto, los posibles métodos de extracción y el rango de tasas de producción factibles pueden variar significativamente con la ley de corte, es este último el concepto clave de la operación.

La metodología de “Hill of Value” (“Colina de Valor” en español) utiliza el modelado avanzado y los gráficos tridimensionales de Microsoft Excel™ para derivar superficies de valor que muestran la relación general entre el valor (que puede ser el VAN, o cualquier otra medida de interés) y dos variables independientes que, generalmente, serán la ley de corte y otro factor clave como la tasa de producción. En la Figura 7 se observa una “Colina de Valor” de un estudio real de hace muchos años que demuestra claramente los conceptos de esta técnica. Cuando la rentabilidad en una mina es baja, las respuestas típicas son embarcarse en un ejercicio de reducción de costos y aumento de la tasa de producción para distribuir los costos fijos en base a un mayor tonelaje y, por lo tanto, reducir el costo unitario promedio. Pero lo que a menudo se necesita a corto plazo para lograr este aumento en la producción, es una reducción de la ley de corte para hacer que haya más mineral



disponible. Si la LDC utilizada en la mina es un punto de equilibrio de costos, entonces la reducción en la LDC puede parecer justificada por la reducción en los costos unitarios que surgen tanto del recorte de costos como del aumento de la tasa de producción. El nuevo plan de la mina generalmente continúa usando esta LDC inferior en el futuro previsible. Típicamente en estos estudios de expansión se establecen una o dos tasas de producción mayores para evaluarlas junto con la opción “cambiar nada”. Aumentar la tasa de producción incluso con una reducción de la LDC podrían resultar en un aumento del valor, pero con frecuencia no lo hará y, aun cuando lo haga, el aumento del VAN puede ser muy pequeño como para justificar el riesgo de gastar capital del proyecto para una expansión. El problema real es que a menos que se genere una “Colina de Valor” no hay manera de saber cuál combinación de las variables de decisión claves entregarán como resultado el máximo potencial de creación de valor para la operación. Claramente, en igualdad de condiciones, la estrategia óptima es la combinación de LDC y TPO que definen la cima de la “Colina de Valor” de la Figura 7.

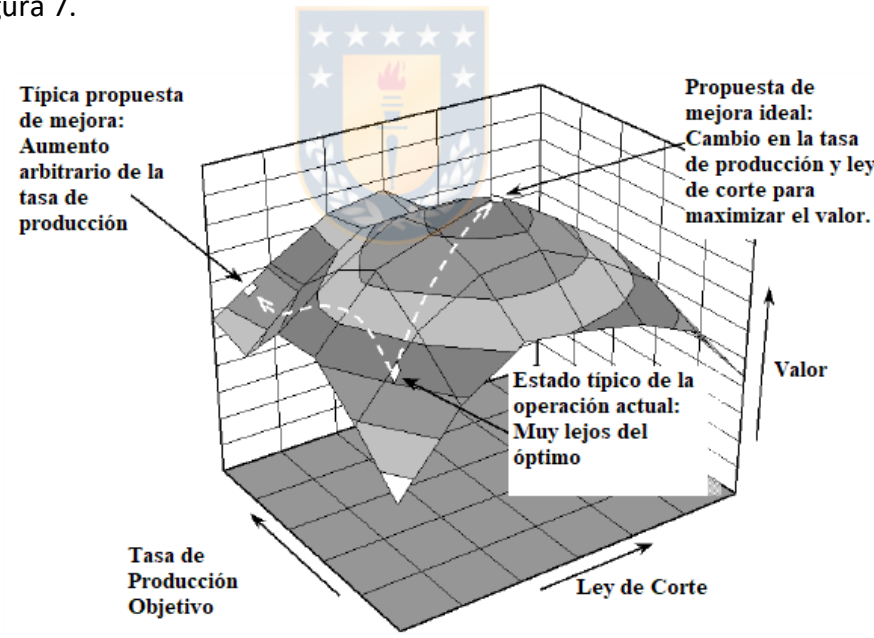


Figura 7: "Buscando y escalando la Colina de Valor" [18]





## CAPÍTULO 3: DESARROLLO DEL TRABAJO

### 3.1 Programación en Excel (macros)

El primer paso de este trabajo fue la construcción de un archivo Excel, el cual, en palabras simples, permite ingresar como datos de entrada las características del yacimiento que se quiere estudiar (de esta manera es apto para cualquier tipo de proyecto minero) y entrega la vida de la mina en donde se obtenga el mayor VAN para el proyecto. En la Tabla 3 **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra un extracto de los datos de entrada de la mina que se deben ingresar, donde se incluyen características de la reserva mineral, del sistema de trabajo, costos, precio del mineral, entre otros.

Tabla 3: "Hoja Excel para datos de entrada"

Parámetro	Valor	Unidad de medidas
Reserva	3 000 000	ton de mineral
Razón Estéril/Mineral	1	ton estéril/ton mineral
Ley promedio	0.65	%
Recuperación total	85	%
Días que se trabajan	350	Días/año
Densidad roca	2.4	ton/m <sup>3</sup>
N° turnos por día	3	Turno/día
Horas por turno	8	hr/turno
Eficiencia de trabajo	80	%
Precio del cobre	2.68	\$/lb
Impuesto	10	%
Tasa de descuento	15	%
Conversión ton a lb	2 204.62	lb/ton
Costo mina	1.66	\$/ton
Costo procesamiento	5.81	\$/ton mineral
Inflación promedio	3	%
Inversión planta	12 000	\$/tpd



De acuerdo a los datos ingresados, se calcula la capacidad y la cantidad de equipos principales que se necesitan para cumplir con los requerimientos del tamaño de la mina, el equipo de carguío, el de transporte y la perforadora. También se hace un cálculo estimado de equipos auxiliares como camionetas, camiones aljibes y dozer. Para estos cálculos se considera el tiempo de ciclo del equipo, su precio, su costo operacional y las horas que trabaja. Basado en un estudio sobre la relación entre la capacidad de los equipos y costos, se estableció una tabla de base de datos dentro del archivo Excel, la cual será utilizada para el cálculo de la capacidad del equipo según la tasa de producción y para definir los valores de parámetros de costos y tiempos. En las Tabla 4 y

Tabla 5 se muestra un ejemplo para el equipo de carguío con los datos de entrada y de salida respectivamente.

**Tabla 4: "Ejemplo Excel datos de entrada equipo carguío"**

Inputs Pala	Valor	Unidad de medidas
Densidad roca	2.4	ton/m3
Factor de llenado	0.9	-
Esponjamiento	0.55	-
Eficiencia laboral	0.83	-
Duración turno	8	hr/turno
N° turnos por día	3	Turnos/día
Tiempo de ciclo	0.7	Min

**Tabla 5: "Ejemplo Excel datos de salida equipo carguío"**

Inputs Pala	Valor	Unidad de medidas
Capacidad pala	18.3	m3
Capacidad nominal	43.92	ton
Capacidad efectiva	25.5	ton
Ciclos requeridos por día	960.31	Ciclos/día
Tiempo total requerido por día	672.22	Min/día
N° de operadores	2	-



N° de palas	2	-
Costo inversión total	10.02	\$MUSD
Costo operacional anual	2.15	%MUSD/año

### 3.2 Determinación de costos

Una vez que se tiene toda esta información, se calculan los costos operacionales y de capital totales para finalmente hacer los flujos de cajas correspondientes que permitirán obtener el VAN. Estos costos fueron obtenidos del documento *"Mine and Mill Equipment Costs: An estimator's guide"* [19] y como son del año 2008 fueron traídos a valor presente con los valores del IPC de los años 2020 y 2008 [20]. Cabe señalar que para los costos de procesamiento se utilizaron diferentes guías de estimación de costos como la de O'hara [2] o Camm [21], sin embargo, como fueron confeccionadas hace muchos años sólo se usaron las relaciones entre los costos (de la mina y los costos de la planta) y no los costos en específico.

Junto con el cálculo de los costos capitales totales, se utiliza una función de Excel para obtener la depreciación de los activos para el periodo que se haya ingresado, así como también el valor de rescate, los que, a su vez, serán agregados a los flujos de caja. En la Tabla 6 se observa un ejemplo de cómo está conformado el flujo de caja utilizado para una vida de la mina de 5 años. Los valores están expresados en millones de dólares, excepto por la producción anual que está en millones de toneladas y se refiere exclusivamente a toneladas de mineral.

Tabla 6: "Ejemplo Flujo Caja Excel"

Año	0	1	2	3	4	5
Producción anual		6	6	6	6	6
+ Ingresos		\$170.3	\$170.3	\$170.3	\$170.3	\$170.3
-Costos de Operación		-\$54.8	-\$54.8	-\$54.8	-\$54.8	-\$54.8
- Depreciación		-\$8.6	-\$5.4	-\$3.4	-\$2.2	-\$1.4
= Sujeto a Impuesto		\$107.0	\$110.2	\$112.2	\$113.4	\$114.2
- Impuesto de 10%		\$10.7	\$11.0	\$11.2	\$11.3	\$11.4
= Ingresos Netos		\$96.3	\$99.1	\$100.9	\$102.1	\$102.8
+ Depreciación		\$8.6	\$5.4	\$3.4	\$2.2	\$1.4
+ Valor de Rescate		\$0.0	\$0.0	\$0.0	\$0.0	\$2.3
- Costos Capitales	-\$229.0					



Flujo de Caja	-\$229.0	\$104.9	\$104.6	\$104.4	\$104.2	\$106.5
---------------	----------	---------	---------	---------	---------	---------

En este archivo Excel la vida de la mina también es un dato de entrada, por lo que se variará este input de acuerdo a los requerimientos de cada mina y así se va a comparar cual es el que entrega el VAN más alto.

Una vez construido el flujo de caja, el Excel tiene una Macro programada que tiene como función entregar VAN, TIR y *Payback* para un conjunto de escenarios (diferentes vidas). En la Tabla 7 se observa un ejemplo de la tabla que entrega la macro con los resultados para las diferentes vidas de la mina marcando con rojo la que entrega el valor presente neto más alto. Dependiendo del tamaño de la reserva que se está estudiando, la macro permite aumentar o disminuir los años de vida que se van a estudiar.

Tabla 7: "Resultados Macro Excel"

Vida Mina	VAN	TIR	Payback
1	\$ -510 352 192	-38%	0
2	\$ -25 912 931	11%	0
3	\$ 116 968 626	33%	2.47
4	\$ 173 704 093	43%	2.50
5	\$ 200 028 852	48%	2.51
6	\$ 210 087 453	50%	2.55
7	\$ 210 677 807	51%	2.58
8	<b>\$ 213 669 051</b>	52%	2.58
9	\$ 202 395 772	52%	2.61
10	\$ 212 290 747	55%	2.51
11	\$ 202 630 009	54%	2.54
12	\$ 197 084 504	56%	2.49
13	\$ 188 760 516	56%	2.50
14	\$ 180 735 211	55%	2.52
15	\$ 175 327 007	<b>56%</b>	2.49
16	\$ 167 956 916	56%	2.50



17	\$ 160 968 815	56%	2.51
18	\$ 154 361 953	55%	2.53
19	\$ 148 128 198	55%	2.54
20	\$ 139 272 637	55%	2.53

A modo de resumen, para tener una mejor comprensión de cómo se llevaron a cabo los análisis de sensibilidad para cada parámetro, el esquema de la Figura 8 muestra el procedimiento que sigue el archivo Excel confeccionado y la macro programada para obtener los resultados.

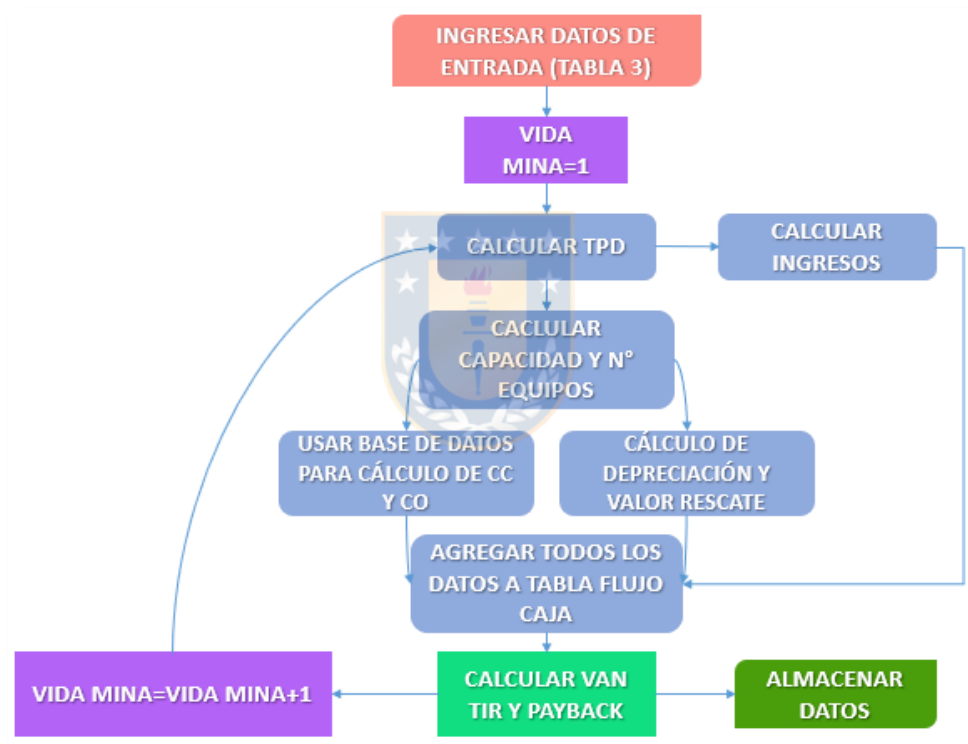


Figura 8: "Funcionamiento Macro Excel"

Dentro de los cálculos realizados, es importante profundizar en algunos que son más relevantes dentro del estudio económico, como por ejemplo los ingresos. En este cálculo, están considerados el precio del mineral, una ley promedio, las toneladas de mineral extraídas por año y la recuperación total. Cabe destacar que en este trabajo se estudiarán yacimientos de cobre, que es uno de los minerales más relevantes para el país, por lo que se hizo una búsqueda del precio de éste a lo largo de los últimos años, disponibles en la Figura 9.

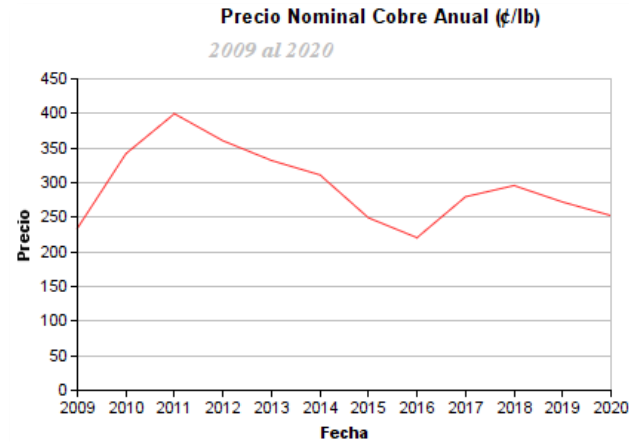


Figura 9: "Evolución Precio del Cobre 2009 a 2020" [22]

Con los datos de la Figura 9 y la ecuación para el cálculo del ingreso anual se puede hacer un breve análisis de cómo afecta el precio del mineral (Cobre) en el ingreso total, dejando los otros parámetros fijos. A continuación, se presenta la ecuación para el cálculo mencionado.

$$Ingreso = \frac{\text{precio } [$/ton] * \text{ley promedio}[\%] * \text{recuperación total} * \text{ton de mineral extraídas}[\text{ton}]}{100} \quad (6)$$

Para los cálculos se utilizaron los siguientes datos: una ley promedio de 0.65%, una recuperación total de 85% y las toneladas de mineral extraídas por año de 7.5 [Mton]. Al ver la ecuación del ingreso se puede notar que el precio es directamente proporcional con éste, es decir, el porcentaje de variación del precio coincidirá con el porcentaje de variación del ingreso, siempre que se mantengan los otros factores fijos. Por lo tanto, pareciera que el precio no fuera tan relevante al hacer el análisis económico, sin embargo, cuando se hace el estudio en base al VAN, los valores cambian drásticamente, pero manteniéndose la proporcionalidad. Con los datos anteriores, una variación de un 81% en el precio (variación que se tiene en la Figura 9), provocó un aumento del 179% del VAN.



## CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Luego de la confección del archivo Excel, se realizó un estudio detallado de cómo influyen diferentes factores en la rentabilidad de un proyecto minero. Para este análisis se utilizó una mina teórica con el fin de simplificar los cálculos, puesto que para casos reales existen muchos factores en juego y, por lo tanto, es complejo ver exactamente qué factores cambiaron; de esta manera, se puede tener un control de los parámetros que quedan fijos y de los que varían. La sensibilidad de las medidas de rentabilidad a los cambios en las variables subyacentes, tomadas una a una, da una indicación del grado de riesgo asociado con esa variable. Manteniendo constantes otros parámetros y cambiando el valor de la variable de interés, se mide la sensibilidad de los resultados financieros de ese factor. Es importante mencionar que cuando se hable de tasa de producción se considera mineral y estéril.

### 4.1 Resultados y análisis de la variación del precio

En este análisis, se buscó cuál es la vida óptima de la mina para diferentes precios (es decir, la que entregó la mejor opción según el método de valoración de inversiones utilizado), variando entre 1.8 a 4 [USD/lb]. Para esto, se consideró una mina con las características de la Tabla 8, las cuales permanecieron constantes.

**Tabla 8: "Características de la mina para análisis del precio"**

Características	
Ley promedio	0.6%
Recuperación total	85%
Tasa de descuento	15%
REM	1:1

#### 4.1.1 Tamaño de reserva grande

El primer tamaño de reserva estudiado es de 30 [Mton] correspondiente a la categoría de gran minería. En la Tabla B1 del Anexo B se muestran los valores de VAN máximos y mínimos para cada precio, junto con la tasa de producción anual correspondiente a ese VAN. De ahí se concluye que con una variación de un 122% en el precio, el VAN máximo aumentó un 831%.



Queda claro que a medida que el precio aumenta, el VAN también lo hace, aumentando así la rentabilidad del proyecto. Por otro lado, a medida que aumentó el precio, de acuerdo con el VAN máximo, la tasa de producción anual óptima aumentó y por lo tanto la vida de la mina disminuyó.

En la Figura 10 se presenta la relación del VAN con la tasa de producción por año para diferentes precios, mostrando que para cualquier precio una tasa de producción menor a 6 [Mton/año] no sería óptima, y que además, a medida que aumenta el precio la TPO también lo hace pero hasta un límite de 12 [Mton/año], posterior a eso el VAN comienza a disminuir. También se puede concluir que, para cualquier precio, el proyecto minero debe tener una tasa de producción entre 6 [Mton/año] y 12 [Mton/año], ya que en ese rango se encontraron los VAN máximos de cada curva. Finalmente se puede decir que, valores muy pequeños o muy grandes de la tasa de producción, no entregarían los resultados óptimos.

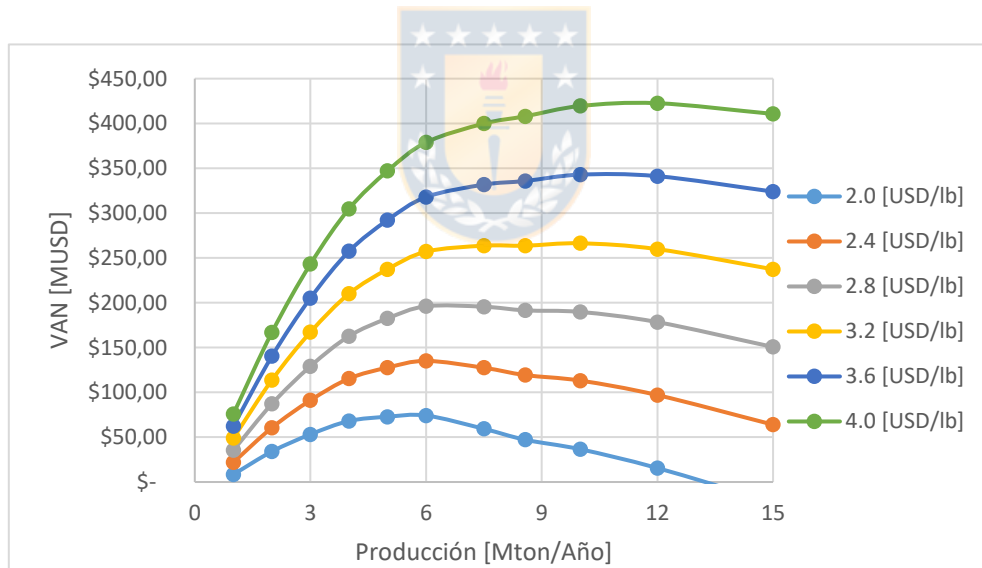


Figura 10: "Efecto del cambio del precio Cu en VAN para reserva grande"

En la Figura 11, se muestran los datos del *Payback* descontado en relación a la tasa de producción para diferentes precios del mineral. En este gráfico se puede ver que el *Payback* óptimo varió entre 1.5 a 4.8 años, siendo más favorable (menor) a medida que aumentó el precio, entonces la variación del precio afecta el *Payback* en aproximadamente 3.3 años. Además, según el *Payback* descontado se obtuvo que, para cualquier precio, la tasa de producción debería estar entre 3 y 12 [Mton/año]. En específico para un precio de 2 [USD/lb], una tasa de producción de





15 [Mton/año] significa una vida muy corta lo que requiere una gran inversión de equipos para cumplir con esa tasa, por lo tanto, para un precio bajo como éste simplemente no se logra recuperar la inversión, por lo que el *Payback* es igual a cero.

Una de las características del *Payback* es que no toma en cuenta la vida total de la inversión ni el momento o el tamaño de los flujos de caja más allá de la recuperación de la inversión inicial [13]. Esto se puede ver claramente en la Figura 11 donde, para todos los precios, una tasa de producción mayor a 3 [Mton/año] no afecta los valores del *Payback* lo que significa que esa debe ser la tasa mínima que se debe elegir ya que antes de esa tasa, el *Payback* es muy alto. Por otro lado, dependiendo del precio del mineral, el *Payback* puede disminuir hasta un poco más de 3 años. También se observa que cuando el precio es muy alto, la tasa de producción no afectaría el valor del *Payback*.

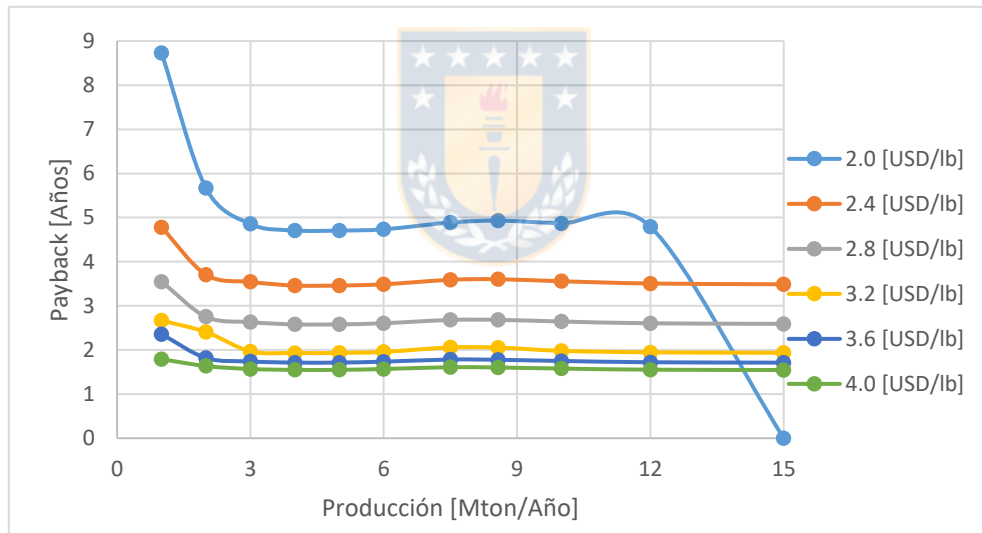


Figura 11: "Efecto del cambio del precio Cu en *Payback* para reserva grande"

#### 4.1.2 Tamaño de reserva mediana

Se consideró un tamaño de reserva de 15 [Mton] para esta categoría. En este caso, al observar la Tabla B2 del Anexo B, con una variación de un 122% en el precio, la variación del VAN máximo fue de un 1132%, lo que se alejó un poco del resultado de la reserva grande.

Al igual que en el caso de la reserva anterior, se puede concluir de la Figura 12, que la tasa de producción óptima, para cualquier precio, se encontró en un rango entre 3 y 6 años. Con tasas



de producción muy bajas, en ningún caso se alcanzó el óptimo, lo que entrega como conclusión que para obtener mejores VAN no se deben considerar vidas de la mina muy largas.

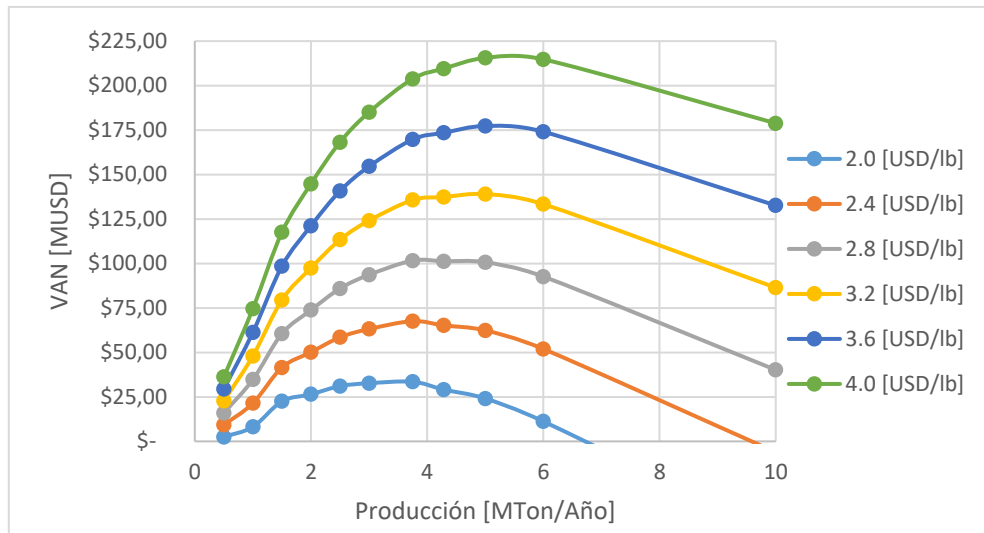


Figura 12: "Efecto del cambio del precio Cu en VAN para reserva mediana"

Según el análisis del *Payback* en la Figura 13, para los casos donde el proyecto es rentable, el retorno de la inversión se lograría en un rango de 1.5 y 9 [Mton/año]. También se puede observar que después de una tasa de producción igual a 1.5 [Mton/año], los valores del *Payback* se estabilizan por lo que esa es la tasa mínima que se debería elegir para obtener un retorno de la inversión en un tiempo menor.

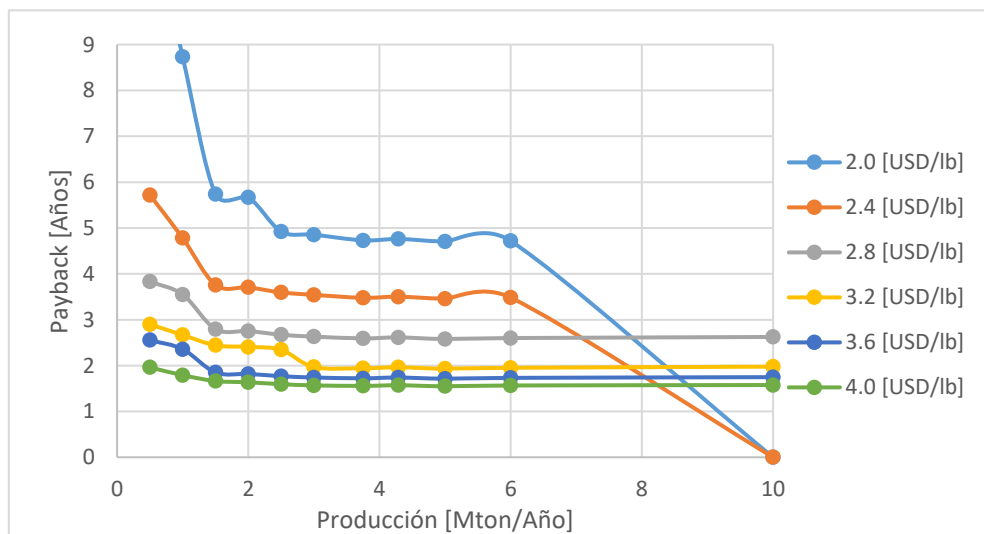


Figura 13: "Efecto del cambio del precio Cu en Payback para reserva mediana"



### 4.1.3 Tamaño de reserva pequeña

Para este tamaño de reserva se consideró 5 [Mton] que corresponde a pequeña minería. A medida que disminuye el tamaño de la reserva, también lo hace el orden de magnitud del VAN y, en este caso, con una variación del 122% del precio del cobre, se obtuvo una variación de un 4393% del valor presente neto (valor considerablemente más alto que los otros 2 tamaños de reserva anteriores), lo que se puede observar en la Tabla B3 del Anexo B.

Respecto a la Figura 14 es importante mencionar que el rango en el que se encontró la tasa de producción óptima para la mina se acortó con respecto a las dos reservas anteriores, en este caso se posiciona entre 1 y 2 [Mton/año]. También se puede decir que, para tasas sobre 5 [Mton] por año, el proyecto no es rentable para ningún precio. Se obtuvo del gráfico también que, a medida que el precio del mineral aumentó, el rango de la tasa de producción en la cual el proyecto es rentable también lo hizo.

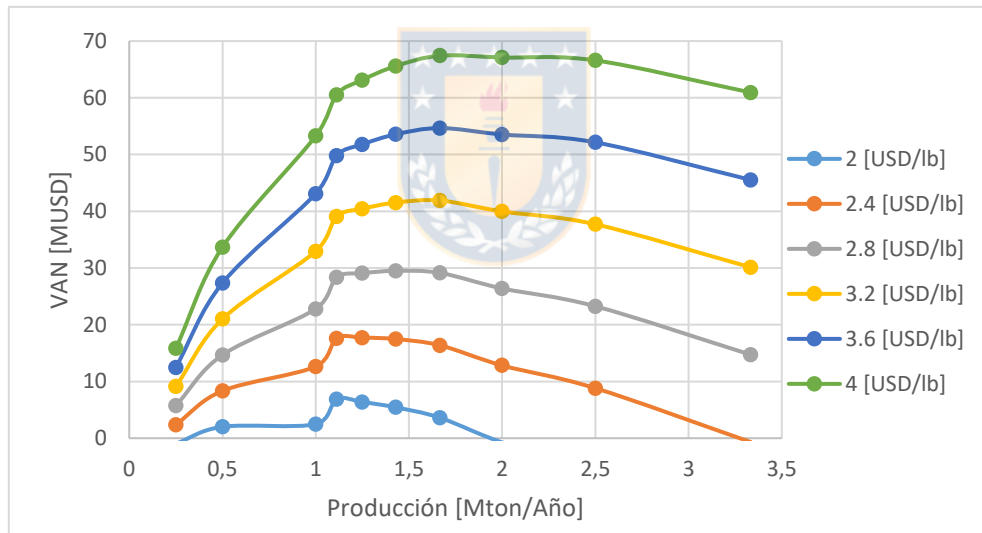


Figura 14: "Efecto del cambio del precio Cu en VAN para reserva pequeña"

El gráfico del *Payback* de la Figura 15, muestra que, para cualquier precio la tasa de producción no debe ser menor a 500.000 [ton/año] ya que antes de eso, el *Payback* es muy alto. En particular, para un precio de 2 [USD/lb] el rango en el que se tienen los mejores valores del *Payback* es sólo entre 1.1 y 1.6 [Mton/año], ya que como es de esperar, cuando se tiene un precio bajo, los escenarios en el que el proyecto es rentable son menores. En general, si se hace el análisis del proyecto en base al *Payback*, se debe elegir una tasa de producción anual que esté entre 1.1 y 3 [Mton].

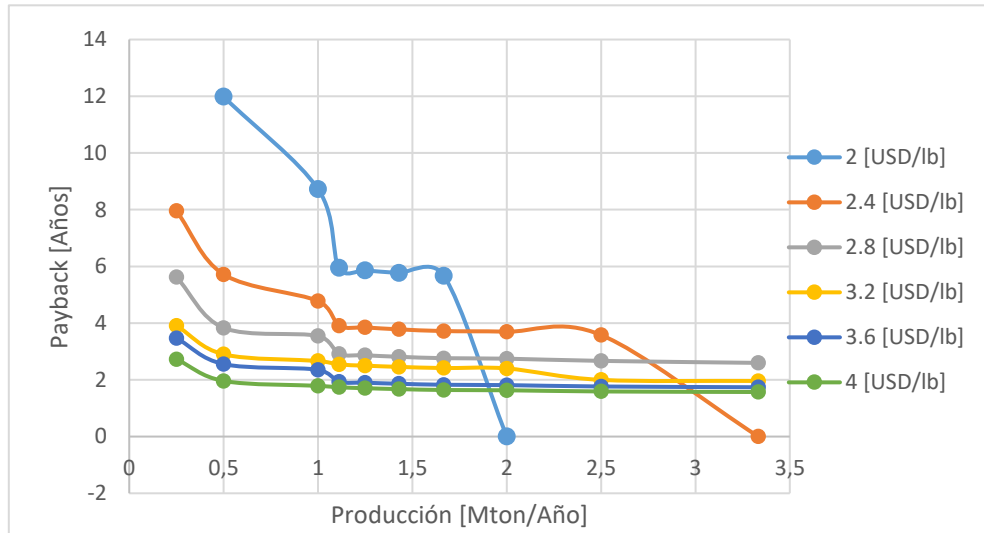


Figura 15: "Efecto del cambio del precio Cu en *Payback* para reserva pequeña"

Cuando la decisión de la inversión se hace en base al *Payback* se debe elegir la tasa de producción que entregue el retorno de la inversión primero, sin embargo, esto no siempre es lo óptimo. Para comprobar esto se tomó de ejemplo la curva del precio 2.8. La tasa de producción que entregó el retorno en menor tiempo (*Payback*= 2.59) es de 3.33 [Mton/año], lo que equivale a un VAN de 14.7 MUSD. Sin embargo, si se elige una tasa de 1.4 [Mton/año], el VAN aumenta a 29.5 MUSD y el *Payback* solo aumenta a 2.81 años.

#### 4.2 Resultado y análisis de la variación de la Tasa de Descuento

En este análisis de sensibilidad se buscó la vida óptima de la mina para diferentes tasas de descuento, las cuales variaron desde un 8% hasta un 20%. En la Tabla 9 se muestran las características principales de la mina que fueron usadas en este estudio.

Tabla 9: "Características mina "

Características	
Ley promedio	0.6%
Recuperación total	85%
Precio	2.68
REM	1:1



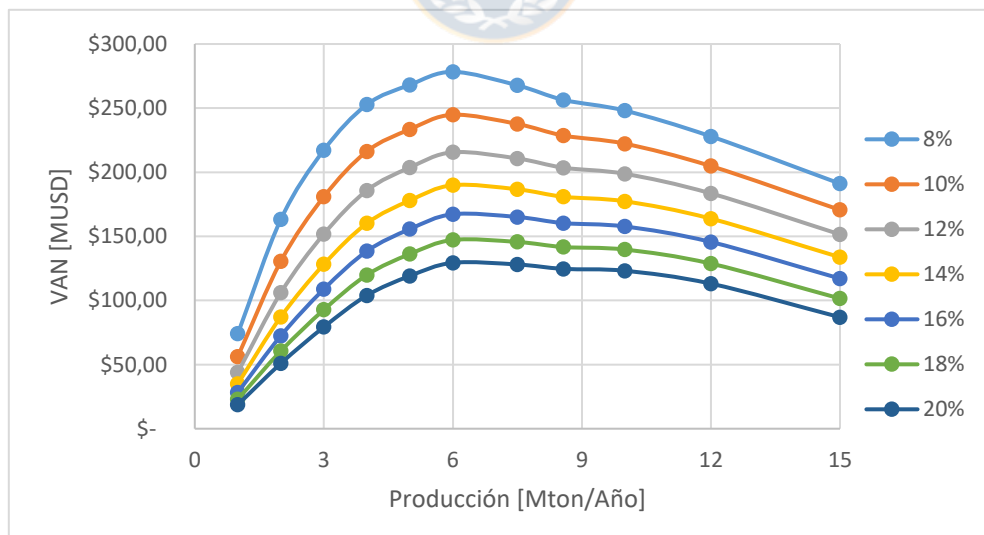
**Nota.** Se utilizó el precio del cobre promedio de los últimos 12 meses [23].

#### 4.2.1 Tamaño reserva grande

Al igual que para el análisis del precio, en la categoría de reserva grande se consideraron 30 [Mton].

Con el cambio de la tasa de descuento se pudo observar que es inversamente proporcional al VAN, es decir, a medida que aumentó la tasa de descuento, el valor actual neto disminuyó y la vida óptima de la mina también. En este caso, con un aumento de un 150% en la tasa de descuento, el VAN máximo disminuyó en un 54%, valores que se pueden comprobar observando la Tabla C1 del Anexo C.

En cuanto a la tasa de producción óptima, se concluye de la Figura 16 que se encuentra en un rango entre 5 y 7 [Mton/año]. En dicha figura se ve que, para cualquier tasa de descuento, el proyecto siempre es rentable y que, al comienzo, con tasas de producción bajas, el VAN tuvo un crecimiento más rápido versus la velocidad con la que decreció para tasas de producción más altas.



**Figura 16: "Efecto del cambio de la tasa de descuento en VAN para reserva grande"**

Los valores del *Payback* que se pueden ver en la Figura 17, no entregan tanta información puesto que la mayoría de sus valores se encontraron en el mismo rango para las diferentes tasas de descuento, es decir, a excepción de las dos tasas de producción más bajas, el retorno de la



inversión se alcanzaría entre 2.4 y 3 años. En palabras simples, para cualquier tasa de descuento y cualquier tasa de producción, la inversión se recuperaría antes de los 4 años. Esto significa que no existió una variación considerable entre las diferentes curvas de las tasas de descuento.

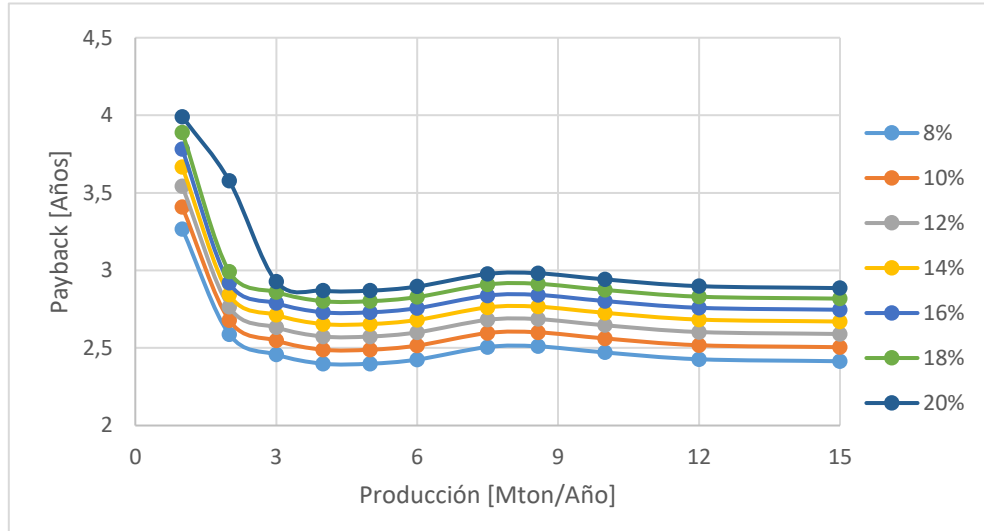


Figura 17: "Efecto del cambio de la tasa de descuento en Payback para reserva grande"

Al hablar de la tasa de descuento se hace necesario hacer el cálculo del WACC para incluirlo en el análisis. Para esto se utilizaron valores extraídos de un ejemplo típico del libro Surface Mining [13] contenidos en la Tabla 10 que entregan una aproximación de los resultados de este proyecto minero.

Tabla 10: "Datos para el cálculo del WACC"

Datos para el WACC	
Costo de la deuda	7%
Costo de acciones	14%
Deuda	50%
Acciones	50%
Tasa de impuestos	10%

Con estos valores, el resultado del WACC es de un 10.15% lo que indica que esa es la tasa de descuento mínima que se debería ocupar con los datos ingresados. Valores sobre éste, son para un escenario conservador y, por lo tanto, más confiables o seguros. Con esta tasa de



descuento se obtuvo un valor actual neto máximo de 243 MUSD con una TPO de 6 [Mton/año]. Además, en este caso, la TIR (que se define como la tasa de descuento más alta que un inversionista podría pagar sin perder dinero) tuvo un valor de un 49%, lo que hace el proyecto económicamente rentable, ya que para cumplirse esto la TIR debe ser mayor a la tasa de descuento y mientras más diferencia haya entre las dos, más rentable es la inversión. El WACC también puede interpretarse como la tasa de rendimiento mínima que debe tener el proyecto minero para crear valor.

#### 4.2.2 Tamaño reserva mediana

Para este tamaño de reserva de 15 [Mton], se muestran los valores de los VAN obtenidos en la Tabla C2 del Anexo C. De los resultados obtenidos es posible inferir que un aumento de un 150% en el valor de la tasa de descuento, generó una disminución de un 51% del VAN, parecido a como ocurrió con la reserva grande.

Nuevamente, al igual que para la reserva grande, la tasa de descuento no hizo variar la tasa de producción con mayor VAN. En la Figura 18, se observa que tasas de producción mayores a 6 [Mton] por año entregaron VAN lejos del óptimo, puesto que todas las curvas tendieron a disminuir rápidamente después de este valor. En esta figura también se observa que la TPO de la mina se encuentra en un rango de entre 2 y 5 [Mton/año].

Considerando el WACC calculado anteriormente para la reserva mediana se tuvo un VAN máximo de 122 [MUSD] correspondiente a una tasa de producción de 3.75 [Mton/año] y con una TIR de 48%, lo que haría el proyecto viable de realizar si se hiciera el análisis en base a este criterio de decisión.

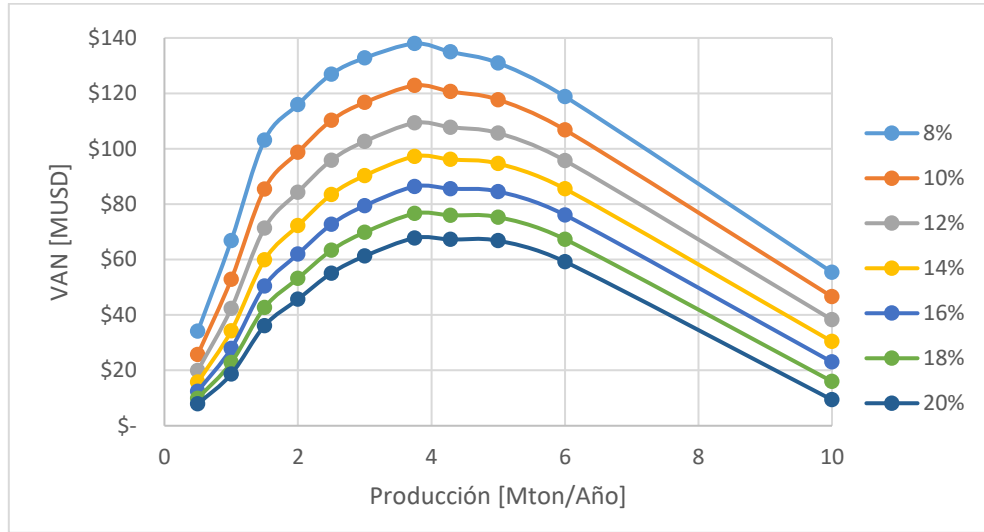


Figura 18: Efecto del cambio de la tasa de descuento en VAN para reserva mediana"

Analizando los resultados en base al periodo de recuperación de la inversión, se puede notar en la Figura 19 que, después de una tasa de producción de 1.5 [Mton] por año, la curva del *Payback* permaneció constante, es decir, se recuperaría la inversión en la misma cantidad de años. Por lo tanto, como no se muestra una variación significativa entre los diferentes casos, no se podría tomar la decisión (elegir la TPO) en base al *Payback*, pero sí indica que la tasa de producción no debe ser menor a 2[Mton/año]. De todas formas, el comportamiento de las curvas ayuda para dar confianza a los inversionistas en cuanto a la recuperación de su dinero.

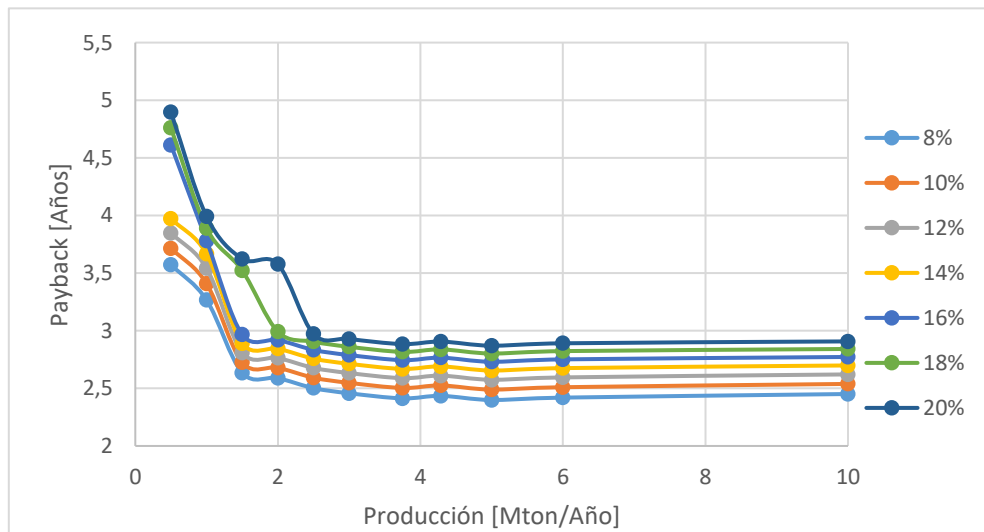


Figura 19: Efecto del cambio de la tasa de descuento en *Payback* para reserva mediana"





### 4.2.3 Tamaño reserva pequeña

Al disminuir el tamaño de reserva a 5 [Mton], se tiene que con una variación de un 150% en la tasa de descuento, el VAN máximo disminuyó un 54% lo que concuerda con los resultados de los otros tamaños de reservas. Estos valores se muestran en la Tabla C3 del Anexo C.

A diferencia de los resultados para las reservas mediana y grande, donde el proyecto siempre era rentable para cualquier tasa de producción, en este caso desde una tasa de producción de 4.5 [Mton] por año, como se puede ver en la Figura 20, el proyecto obtuvo un VAN negativo para cualquier tasa de descuento y dejó de ser económicamente rentable. En otras palabras, vidas muy largas no son óptimas para una reserva tan pequeña y menos aún, si la tasa de descuento es muy alta, ya que años muy lejanos se verán considerablemente afectados por la tasa de descuento y no aportarán significativamente al VAN. Del gráfico se obtiene también que, el rango de la tasa de producción óptimo es entre 1.1 y 1.8 [Mton] por año.

Se puede notar que en este tamaño de reserva las tasas de producción que predominan con mayor VAN, fueron las más pequeñas, es decir, vidas de la mina más largas y esto se puede explicar debido a que se debería realizar una inversión muy grande para cumplir con una tasa de producción alta y que, finalmente, no se lograría compensar con las ganancias en tan pocos años.

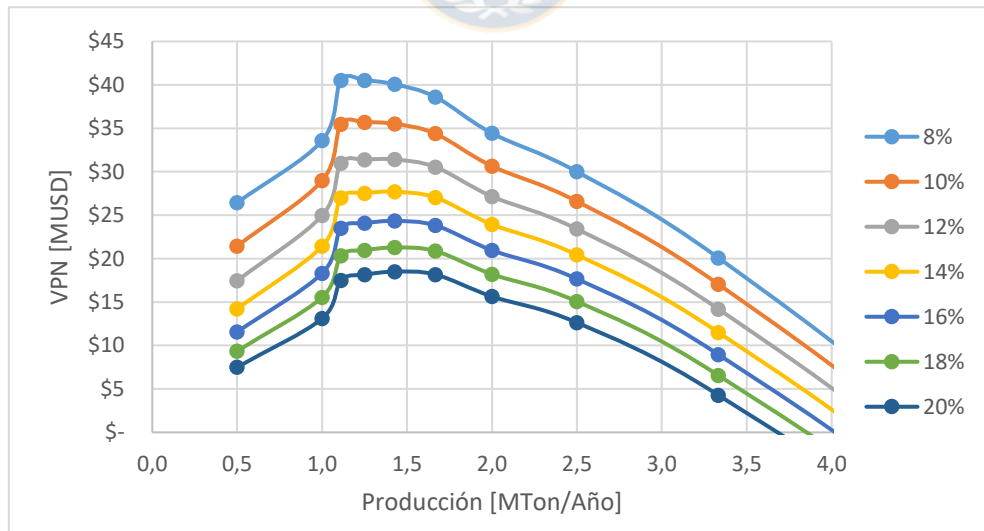


Figura 20: "Efecto del cambio de la tasa de descuento en VAN para reserva pequeña"

La Figura 21 que muestra la relación entre el *Payback* y la tasa de producción anual, indica que no se podría recuperar la inversión sobre 3.3 [Mton/año] sin importar cuál sea la tasa de descuento. En un gráfico con estas características es difícil encontrar un rango de TPO que



abarque las diferentes tasas de descuento, de todas formas, se ve que el tiempo en recuperar la inversión puede variar entre 2.5 y 4 años. Para que el periodo de recuperación no sea tan alto, la tasa de producción elegida debería ser mayor a 1 [Mton/año].

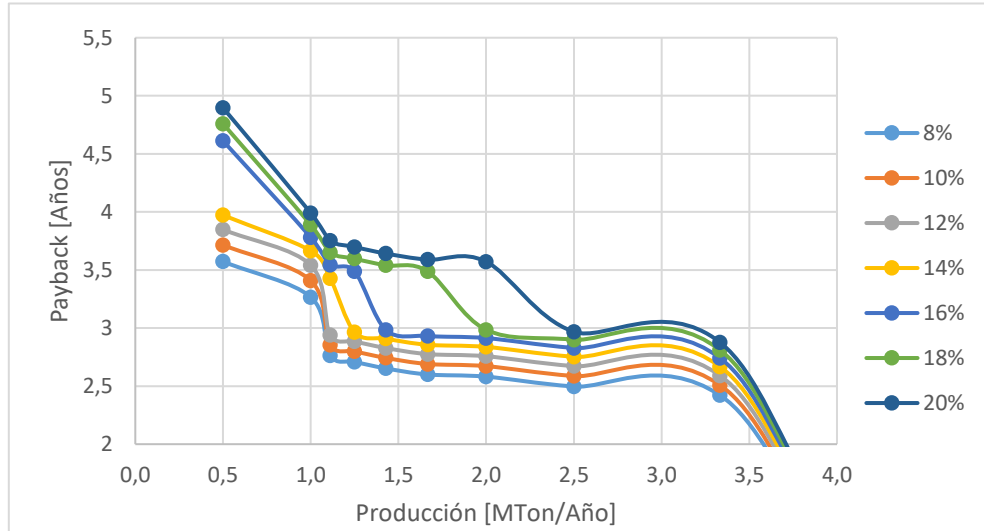


Figura 21: Efecto del cambio de la tasa de descuento en el Payback para reserva pequeña"

Utilizando una tasa de descuento igual al WACC (10.15%), se tuvo como resultado un VAN máximo de 35.4 MUSD, correspondiente a una tasa de producción de 1.25 [Mton/año], con una TIR de un 41%, valor un poco menor que los de las reservas anteriores, pero de todas formas tiene una diferencia considerable con la tasa de descuento usada (WACC), lo que indica una mayor seguridad para los inversionistas.

#### 4.3 Resultado y análisis de la variación de la Razón Estéril-Mineral

En este análisis se varió la REM entre las razones 1:1 a 3:1. El aumento de la REM no va a cambiar la cantidad de ingresos (reserva de mineral seguirá siendo la misma), pero sí va a provocar un aumento de los costos, por lo tanto, el objetivo de este análisis de sensibilidad es ver cómo cambian los costos y el VAN con la variación de la REM. Las características de la mina utilizadas en este análisis se muestran en la Tabla 11.



Tabla 11: "Características de la mina para análisis de la REM"

Características	
Ley promedio	0.6%
Recuperación total	85%
Precio	2.68
Tasa de descuento	15%

#### 4.3.1 Tamaño reserva grande

En la Tabla D1 del Anexo D se observa que a medida que aumentó la REM, el VAN disminuyó y la TPO aumentó. En particular, con una variación de un 200% de la REM, el VAN disminuyó en un 39%.

El rango de TPO considerando las diferentes razones estéril-mineral, se encontró entre 5 y 13 [Mton/año], valores que pueden comprobarse al observar la Figura 22. Para cualquier REM, no es lo más favorable elegir tasas de producción muy altas, ya que el VAN tendió a disminuir en esa dirección, sin embargo, tasas de producción muy pequeñas tampoco entregaron un VAN óptimo. A pesar de lo anterior, con cualquier tasa de producción se obtendría un proyecto rentable, independiente de la REM existente.

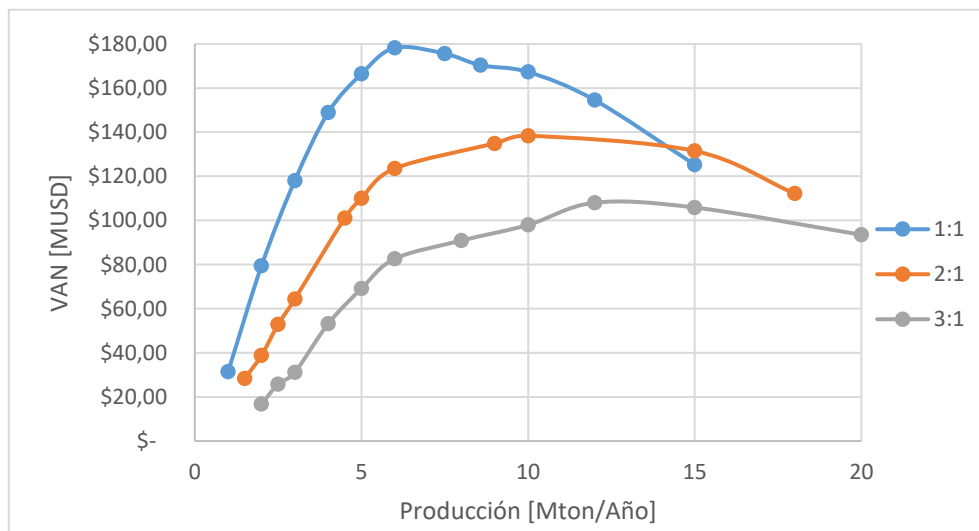


Figura 22: "Efecto del cambio de la REM en el VAN para reserva grande"



Debido a que en los escenarios estudiados se obtuvieron sólo valores positivos del VAN y considerando que el *Payback* no toma en cuenta las ganancias o pérdidas que puedan haber después de recuperar la inversión, se obtuvieron gráficos con curvas casi horizontales como se observa en la Figura 23. Se puede afirmar que el retorno de la inversión sería alcanzado en un rango de 2.7 y 6 años. De la figura se tiene que la tasa de producción en la que comienza a estabilizarse la curva del *Payback* es 2, 3 y 4 [Mton/año] para las curvas 1:1, 2:1 y 3:1 respectivamente. De esos valores, significa que se extraerían 1 [Mton/año] de mineral en los 3 casos, por lo que, al variar la REM la cantidad de mineral que se extraería sería la misma. Dicho lo anterior, se puede concluir que, según el *Payback* la tasa de producción mínima que se debería elegir considera la misma cantidad de mineral a extraer para las tres REM.

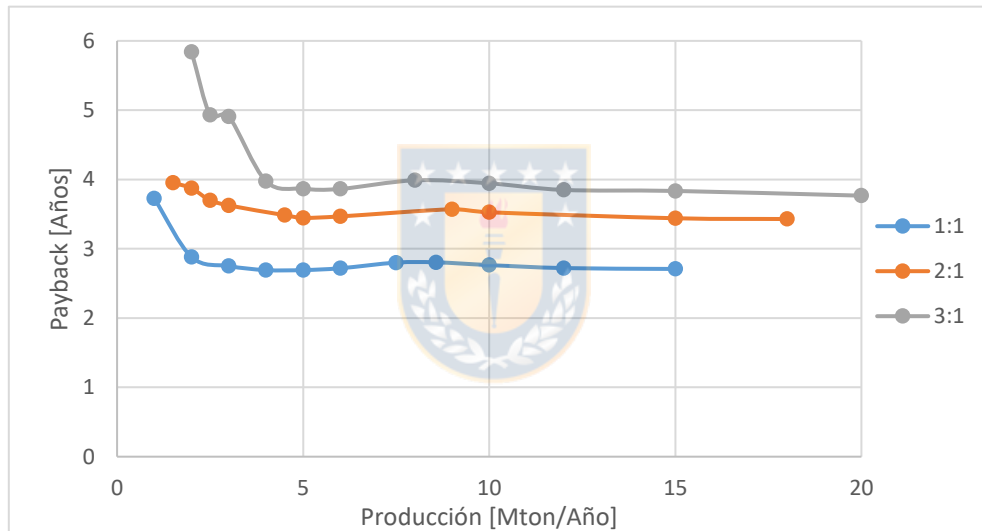


Figura 23: "Efecto del cambio de la REM en el *Payback* para reserva grande"

#### 4.3.2 Tamaño reserva mediana

Para el caso de un tamaño de reserva de mineral de 15 millones de toneladas, cuando la REM varió de 1:1 a 3:1, el VAN disminuyó en un 38%. Los VAN máximos y mínimos, junto con la tasa de producción correspondiente, se muestran en la Tabla D2 del Anexo D.

En la Figura 24 se muestra el VAN vs la tasa de producción para las diferentes REM estudiadas. De ésta se puede concluir que la tasa de producción óptima se encontró entre un rango de 3 a 9 [Mton/año], para cualquier REM. Por otro lado, sólo la curva de REM = 2:1, consiguió obtener un VAN positivo para todos los escenarios estudiados; para la curva de REM = 1:1, donde se extrae menos cantidad de material, tasas de producción muy altas no serían



convenientes puesto que se necesitaría una mayor inversión difícil de compensar y, finalmente, la curva de REM = 3:1, que pertenece al caso donde se debe extraer mayor cantidad de material, mostró que tasas de producción muy pequeñas no lograrían ser rentables puesto que se obtendrían VAN menores a cero.

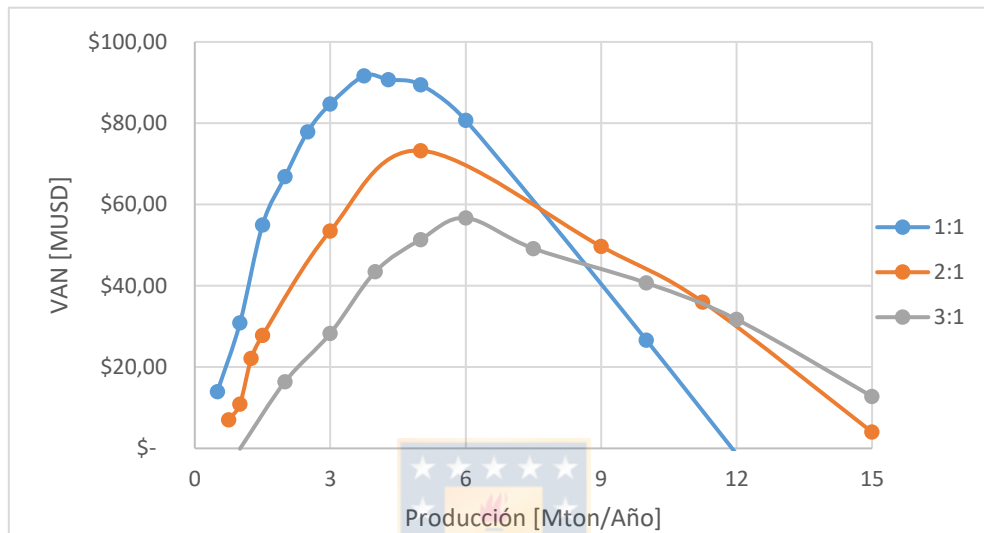


Figura 24: "Efecto del cambio de la REM sobre el VAN para reserva mediana"

En la Figura 25 se muestra que, para cuando el proyecto es rentable, se lograría recuperar la inversión entre los 2.7 y 7 años, independiente de las tasas de producción y REM utilizadas. Si la decisión se tuviera que tomar en base al *Payback*, la tasa de producción anual no debería ser menor a 3 [Mton] ni mayor a 10 [Mton] aproximadamente. Cuando la REM tomó un valor de 1:1, la tasa de producción igual a 15 [Mton/año] es muy alta para la cantidad de material que se debe extraer, y eso provoca que el proyecto no sea rentable y por lo tanto se explica que el *Payback* haya tomado un valor igual a cero. Finalmente, la tasa de producción mínima que se debería seleccionar es 2, 3 y 4 [Mton/año] para las curvas 1:1, 2:1 y 3:1 respectivamente.

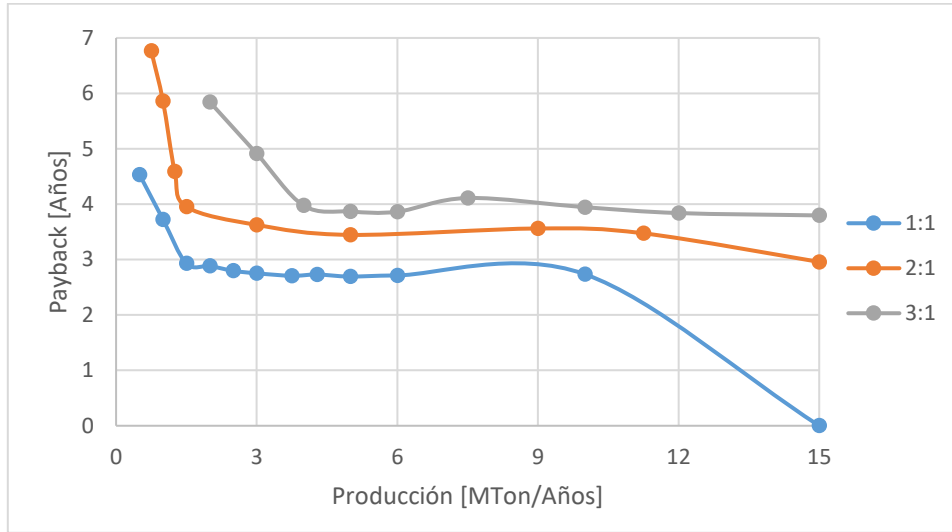


Figura 25: "Efecto del cambio de la REM sobre el Payback para reserva mediana"

#### 4.3.3 Tamaño reserva pequeña

Para la reserva de categoría pequeña en la que se consideró 5 [Mton] de mineral disponibles para extraer, al aumentar la REM en un 200%, el VAN máximo disminuyó en un 55%, valor levemente más alto que para los casos anteriores, lo que quiere decir que las reservas pequeñas son más sensibles a cambios en los factores estudiados. También se concluye que, con esa variación de REM, la TPO varió solo en 0.8 [Mton/año]. Todos estos valores pueden ser verificados observando la Tabla D3 del Anexo D.

Como se indicó anteriormente, la reserva pequeña mostró una mayor sensibilidad al cambio de los factores y esto se puede apreciar visualmente en la Figura 26, donde el rango de tasas de producción en que el proyecto alcanzó los VAN óptimos, es bastante pequeño. En términos generales, se observa que, para cualquier REM, la tasa de producción anual debería estar sobre 1 Mton y bajo 4 Mton.

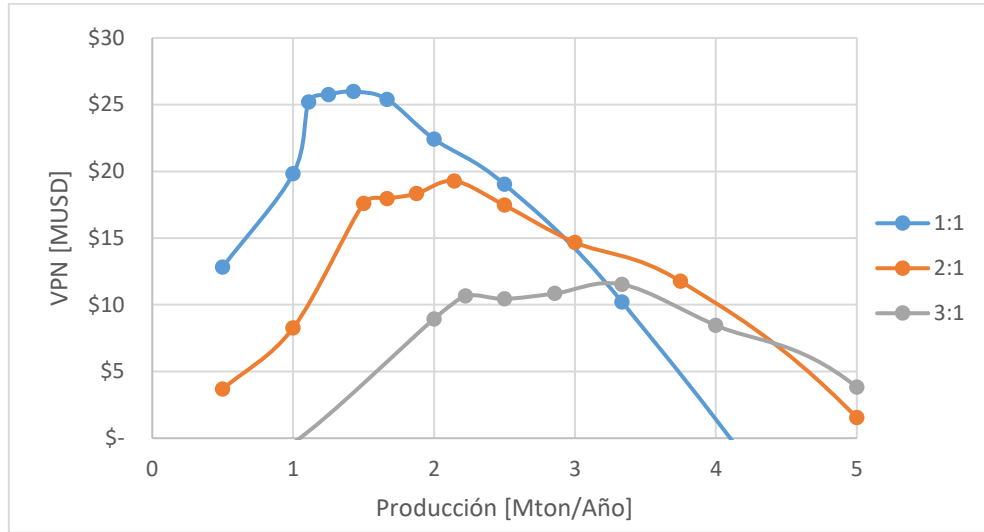


Figura 26: "Efecto del cambio de la REM sobre el VAN para reserva pequeña"

La relación entre el *Payback* y la tasa de producción se puede apreciar la Figura 27. De aquí se concluye que cuando el proyecto es rentable, es decir, cuando tiene un *Payback* mayor a 0, las curvas tienen una pendiente negativa, lo que significa que a medida que se seleccione una tasa de producción mayor, la inversión tardaría menos en ser recuperada. El retorno de la inversión varía entre 2.8 y 6 años. La tasa de producción mínima que se debería seleccionar puesto que antes de eso el *Payback* toma valores muy altos, es 1.4, 1.5 y 2.2 [Mton/año] para las curvas 1:1, 2:1 y 3:1 respectivamente.

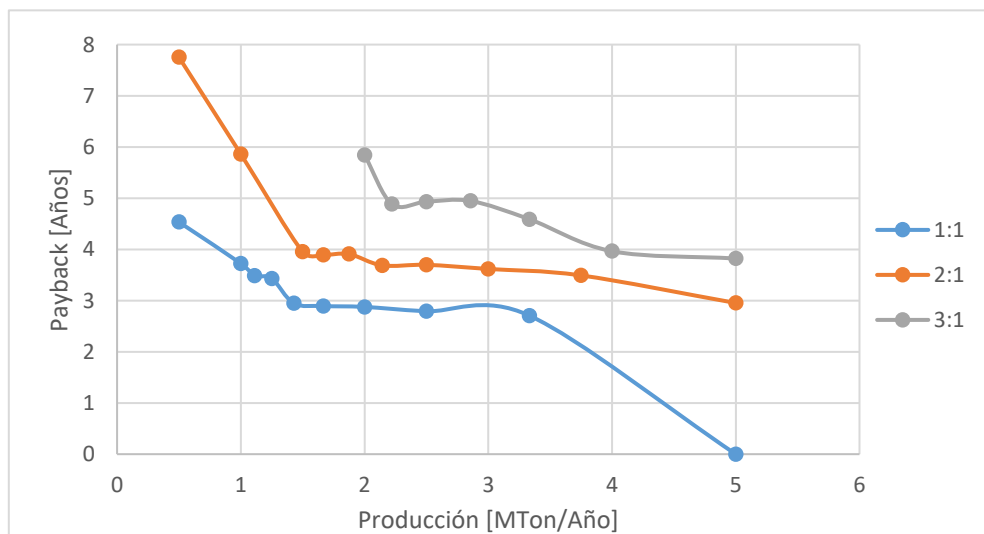


Figura 27: "Efecto del cambio de la REM sobre el Payback para reserva pequeña"



#### 4.4 Efecto del tamaño de la reserva

Finalmente se puede revisar y comparar los resultados que entregan los diferentes tamaños de reserva, utilizando las características contenidas en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Tabla 12:" Características de la mina"

Características	
Ley promedio	0.6%
Recuperación total	85%
Precio	2.68
Tasa de descuento	15%
REM	1:1

A pesar de que, por razones obvias, los órdenes de magnitud de los VAN fueron muy diferentes (debido a que existiría más o menos mineral que se pudiera vender), se puede notar que todas las curvas siguieron un patrón de similar comportamiento.

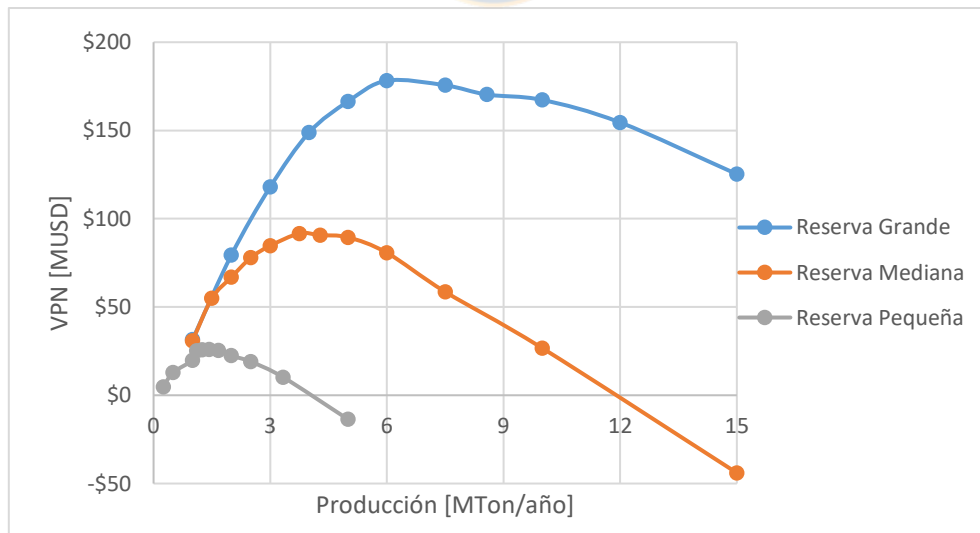


Figura 28: Efecto de tamaño de reserva en VAN"

Observando la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** es posible concluir que, para todos los tamaños de reserva se podría alcanzar un proyecto rentable si se eligieran tasas de





producción bajas, independientemente de que no sea el valor óptimo, ya que para TPA altas, el VAN tiende a ser negativo, al menos para las reservas mediana y pequeña. La curva de la reserva grande presentó una caída bastante más lenta que las otras dos, a medida que se aumentó la tasa de producción por año. Se puede concluir que el tamaño de la reserva sí afecta la selección de la tasa de producción óptima del proyecto.





## CAPÍTULO 5: COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS

### 5.1 Comparación de resultados con Taylor y Smith

Con los datos de la mina contenidos en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se tiene que para la reserva grande de 30 [Mton], la tasa de producción óptima debería ser de 6 [Mton] por año, esto porque el VAN máximo se alcanzó en ese valor.

A continuación, se desea hacer un análisis entre los resultados obtenidos anteriormente y los que entregan lo propuesto por estos dos autores.

En primer lugar, se utilizó la ecuación ( 5 ) de Taylor para obtener cual debería ser la vida de la mina para esta reserva y reemplazando los valores se obtuvo lo siguiente.

$$\text{Vida de la Mina} = (1 \pm 0.2) * 6.5 * \sqrt[4]{30000000}$$

Según lo anterior, la vida de la mina debería estar entre 12 y 18 años, lo que se traduce en 5 [Mton/año] y 3.33 [Mton/año].

El rango en el que se encuentra la TPO según Smith [7] se muestra en la Figura 29, donde se observa la curva que paga dos veces el capital invertido y la curva del valor actual neto. De acuerdo con lo que indica este autor, la tasa de producción óptima para esta mina debe estar dentro del rango marcado con línea segmentada en el gráfico. Eso significa que la TPO debería ser mayor a 2 [Mton/año] que indica el punto de máxima capacidad para reembolsar el capital y menor a 6 [Mton/año] que es el punto de máxima capacidad para proporcionar un retorno de la inversión.

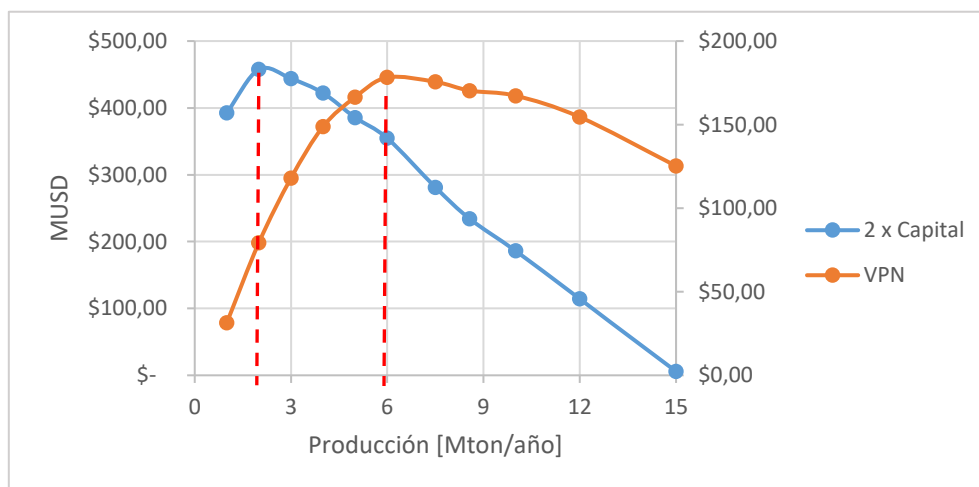


Figura 29: Curvas de VAN y 2 veces el Capital vs Producción"



Finalmente, en la Figura 30 se tiene una comparación que engloba 3 tipos de análisis, la regla de Taylor, la curva de máximo valor para el VAN y la curva de máximo valor que paga dos veces el capital. Éstas muestran la relación entre el tamaño de la reserva y la tasa de producción anual. Se puede observar que los valores que entregó la regla de Taylor se encontraron entre las otras dos curvas por lo que serían resultados razonables para utilizar como una primera aproximación. Además, para reservas pequeñas las curvas entregan valores similares, y a medida que el tamaño de la reserva aumenta, la diferencia entre las curvas también lo hace.

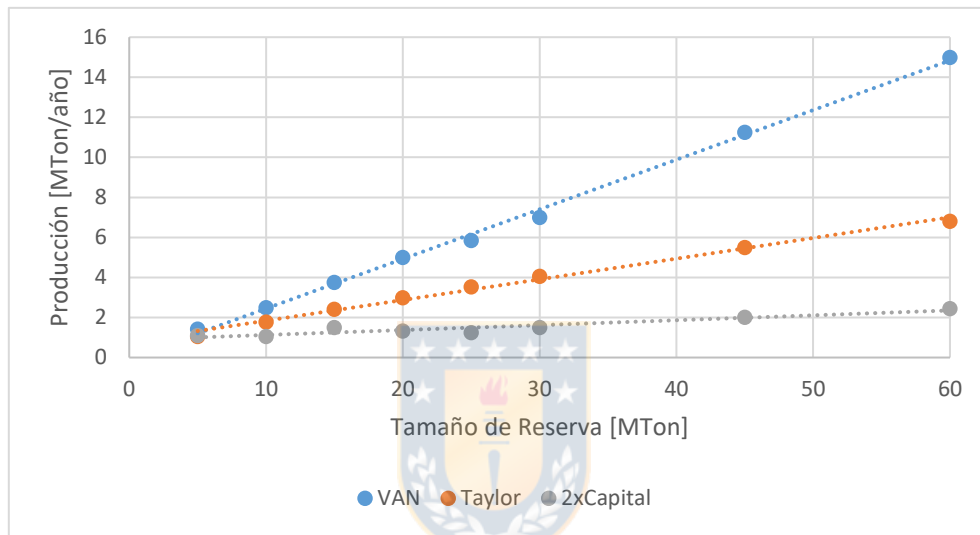


Figura 30: "Tasa de Producción vs Tamaño Reserva"

Luego de hacer la comparación en cuanto a las tasas de producción, se procedió a hacer lo mismo, pero con la vida de la mina, lo que se puede ver en la Figura 31. De ahí se puede observar que la curva del VAN dio vidas bastante cortas y además pareciera no cambiar significativamente a lo largo de un amplio rango de tamaños de reserva. Por lo tanto, se confirma lo que propone Smith en cuanto a que la curva del VAN por sí sola no podría responder a la pregunta de cuál será la TPO [7]. Por otra parte, la curva "2 x Capital" indicó que se deben utilizar tasas de producción menores, lo que implicaría un menor retorno.

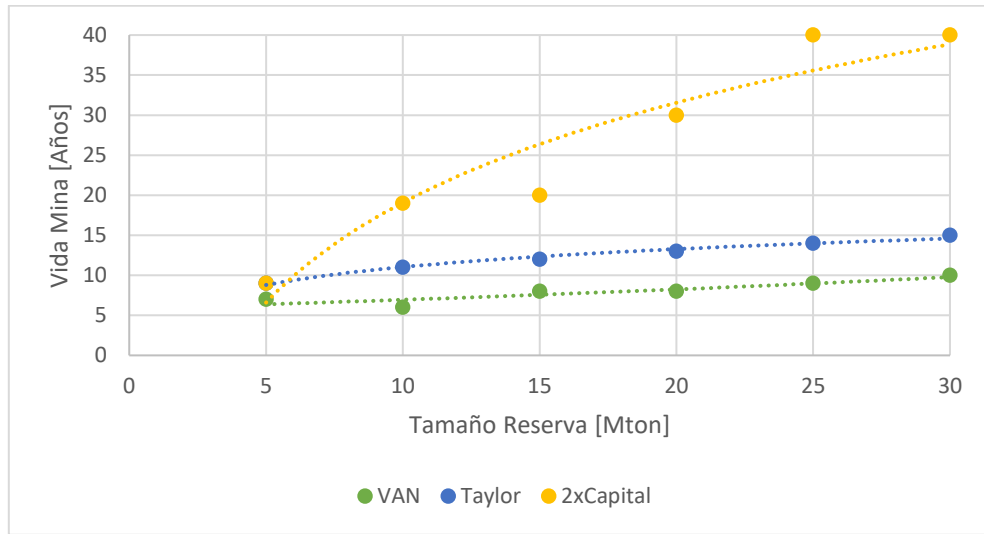


Figura 31: "Vida de la Mina vs Tamaño Reserva"





## CAPÍTULO 6: APLICACIÓN DE METODOLOGÍA *HILL OF VALUE*

En esta sección se utilizó una base de datos disponible en una biblioteca de modelos de bloques organizado por DELPHOS de la Universidad de Chile [24], que contiene datos sobre un yacimiento de cobre en Arizona. De dicha base se obtuvo que la reserva es de 99 [Mton] con una ley promedio de 0.82% y una densidad de la roca de aproximadamente 2.4 [ton/m<sup>3</sup>]. Para los análisis financieros que se hicieron con estos datos se utilizaron las mismas características de la mina utilizado en los casos teóricos que se detallan en la Tabla 13.

Tabla 13: "Características utilizadas para Caso Real"

Parámetro	Valor	Unidad de medidas
Días que se trabajan	350	Días/año
Densidad roca	2.4	ton/m <sup>3</sup>
N° turnos por día	3	Turno/día
Horas por turno	8	hr/turno
Eficiencia de trabajo	80	%
Precio del cobre	2.68	\$/lb
Impuesto	10	%
Tasa de descuento	15	%
Conversión ton a lb	2 204.62	lb/ton
Costo mina	1.5	\$/ton
Costo procesamiento	5.2	\$/ton mineral
Inflación promedio	3	%
Inversión planta	12 000	\$/tpd

En la Figura 32 se puede entender de manera visual qué ocurre cuando se aumenta la ley de cobre. En particular, este yacimiento posee leyes bastante altas puesto que la ley media comienza desde un 0.82% y, además, a medida que aumenta la ley de corte, el tonelaje de la reserva no presenta variaciones significativas hasta una ley de corte de 0.6%.

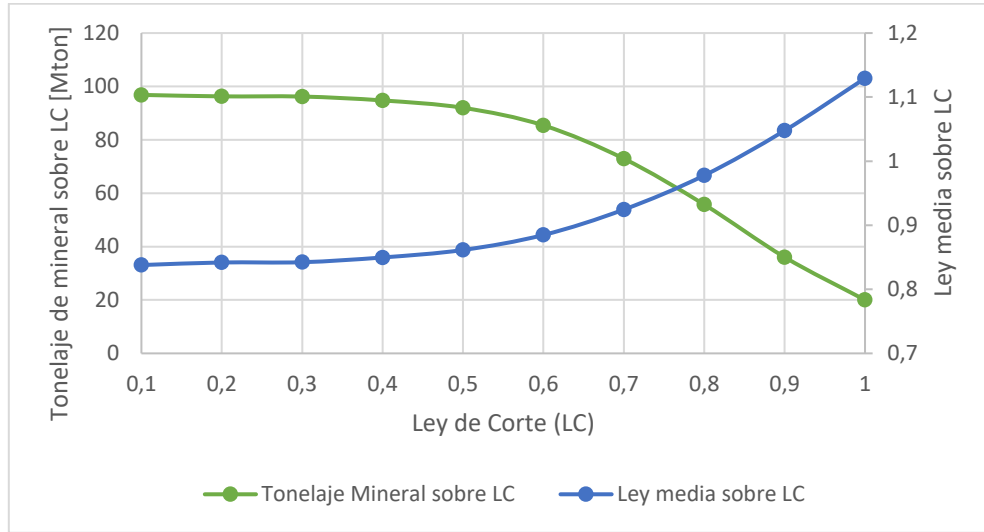


Figura 32: "Curva Tonelaje-Ley para yacimiento de Cu"

El objetivo de este análisis es aplicar la metodología de *Hill of Value* a este yacimiento, en la cual se hizo uso de los gráficos tridimensionales de Excel para evaluar la relación entre el valor (VAN en este caso) y la combinación de otras dos variables de interés que en esta oportunidad serán la tasa de producción y la ley de corte, esta última fue seleccionada puesto que se quiso considerar los parámetros que resultaron más sensibles en los análisis del ítem anterior, que fueron precio y REM, los cuales están incluidos dentro del cálculo de la LDC. Se buscó encontrar la combinación que entregue el mayor VAN. Luego de trabajar con la base de datos se obtuvo el "*Hill of Value*" para este yacimiento que se muestra en la Figura 33.

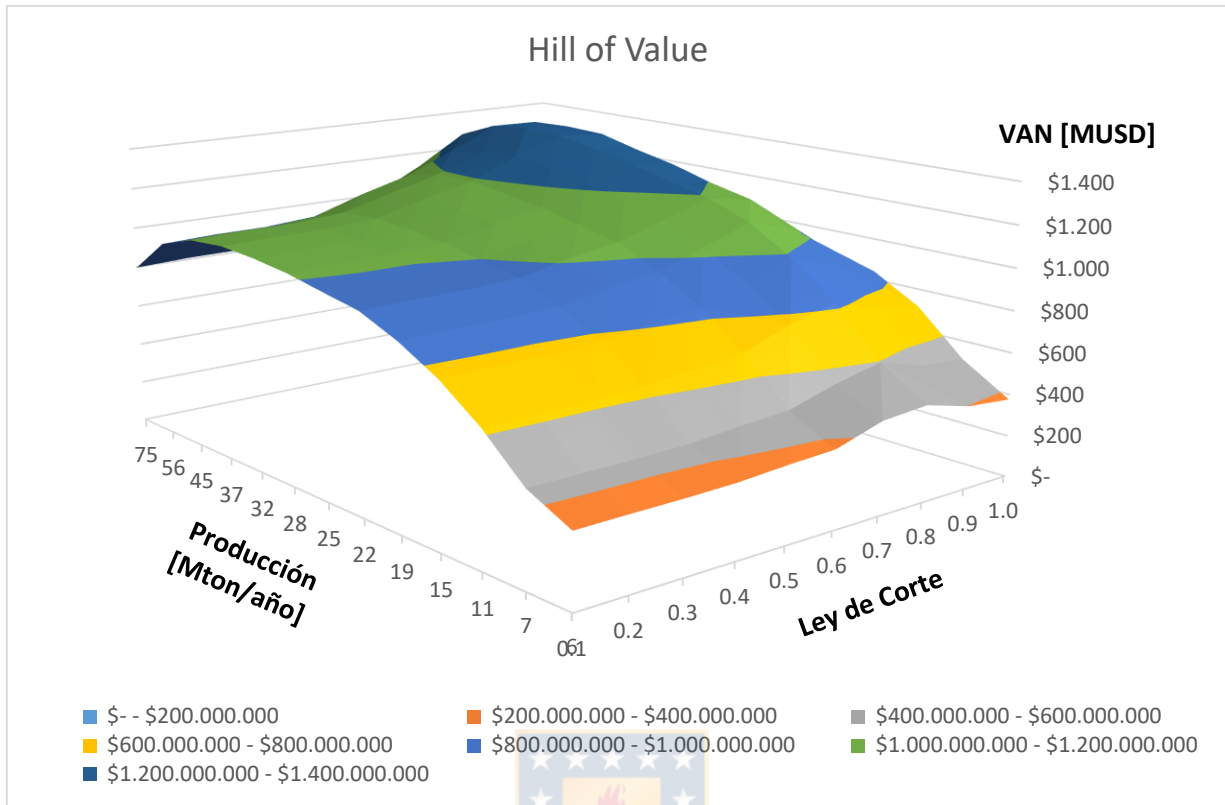


Figura 33: "VAN en función de la Ley de corte y Tasa de producción"

De este gráfico se puede apreciar que no solo un aumento en la tasa de producción hace que aumente el VAN, sino que, combinándolo con un aumento en la ley de corte, se obtuvieron resultados aún mejores. En la base de datos se vio que traía una ley de corte seleccionada igual a 0.3%, lo que significa que el máximo VAN que se podría alcanzar es de 1053 [MUSD] aproximadamente, lo que equivale a una tasa de producción de 37 [Mton/año]. Para esa misma tasa de producción, con una ley de corte igual a 0.8%, se alcanzaría un VAN de 1366 [MUSD], es decir, 313 millones de dólares extras. El punto máximo de esta colina se alcanza cuando se tiene una ley de corte de 0.8% y una tasa de producción anual de 44 [Mton], alcanzando un VAN de 1374 MUSD.

En la Figura 34 se muestra el VAN en relación a la ley de corte para dos escenarios diferentes del precio del mineral. En el caso de un precio alto, el peak de la curva se alcanzó con una ley de corte de 0.5%, por otro lado, cuando el precio es bajo, una ley de corte de 0.7%, sería la opción más rentable. Una alternativa sería seleccionar la ley de corte que maximice el VAN a un precio más alto, ya que esto claramente maximiza el valor en general.

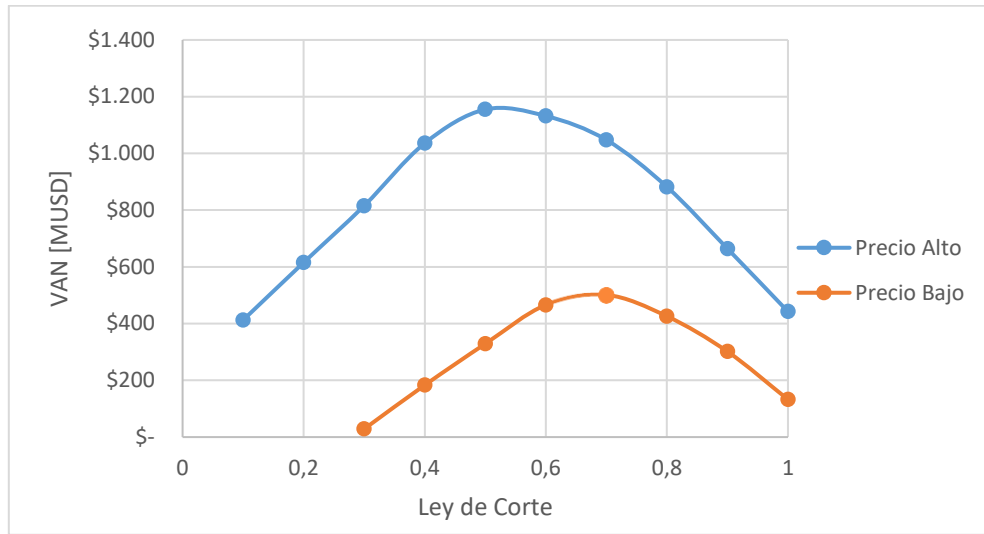


Figura 34: "VAN vs Ley de Corte para dos escenarios de precio"

Sin embargo, en la Figura 35 se muestra que, en el caso de que se seleccione la ley de corte que maximiza el escenario del precio menor y luego este escenario cambiara al de un precio más alto, la mayor parte del aumento potencial del VAN se obtendría de todos modos (Flecha número 2: Retorno garantizado al optimizar para un precio bajo). La ganancia real de elegir la ley de corte menor, es decir, la que maximiza el escenario del precio mayor, es bastante pequeña (Flecha número 1: Ventaja real de optimizar para un precio alto, que en este caso son 107 MUSD). Ahora, si es elegida la ley de corte menor y luego el escenario del precio del mineral disminuye al precio bajo, las pérdidas son considerables (Flecha número 3: Riesgo de optimizar para un precio alto, pero recibir un precio bajo, 172 MUSD). Por lo tanto, es necesario tomar la decisión de qué ley de corte utilizar con mucha precaución y esta comparación entre ganancias y pérdidas podría ser una buena alternativa para resolverlo.



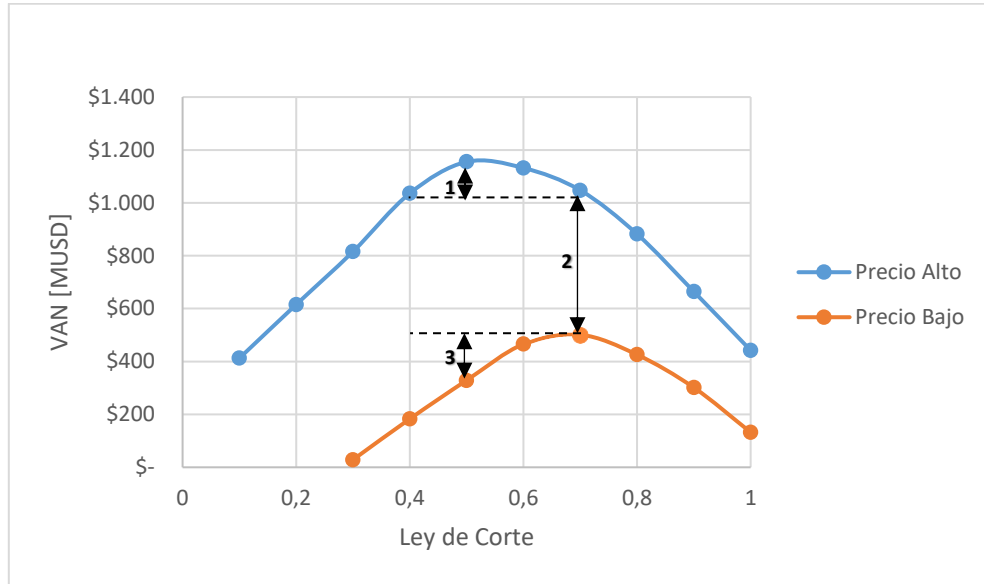


Figura 35: "Riesgos y ganancias de las leyes corte óptimas"

Esta metodología permitió hacer una combinación de la variación de 2 parámetros, entregando una matriz de resultados que representa los diferentes escenarios posibles. A menudo las mineras eligen una ley de corte que tiene que ver con un equilibrio en base a los costos y capacidades de la mina y procesamiento, sin embargo, se comprobó que en ocasiones una ley de corte más alta que esa, entrega mejores resultados, por lo que si el único objetivo de la mina fuera crear valor, lo correcto sería aumentar la ley de corte y la tasa de producción (en el caso particular estudiado). Sin embargo, esto significa una disminución de las reservas, lo que para muchos inversionistas hoy en día sigue siendo visto como algo "malo" y, además, esto también provoca que la vida de la mina disminuya, entregando menor seguridad laboral para trabajadores, aumentando los disturbios ambientales y disminuyendo las ventajas sociales locales. Entonces, en términos matemáticos esta metodología entregará la combinación de factores que otorgue los mejores números, no obstante, se deben evaluar los factores que no tienen que ver con lo matemático para tener un resultado integral.



## CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los estudios de prefactibilidad son relativamente baratos comparados con los estudios de etapas posteriores y ayudan a reducir el rango de tasas de producción probables a pesar de las incertidumbres y poca información que se tiene en esa etapa. Por lo tanto, estos estudios sirven como una guía, pero de todos modos se recomienda reconsiderar la tasa de producción óptima a medida que avanza el proyecto y se tienen más datos disponibles.

En cuanto a los análisis de sensibilidad, éstos entregan una indicación del grado de riesgo que tienen las diferentes variables a estudiar. El parámetro menos sensible resultó ser la tasa de descuento, puesto que, a medida que aumentaba, la tasa de producción más eficiente se mantuvo constante para las reservas mediana y grande y para la reserva pequeña, sólo aumentó un 28.6%. Lo que sí cambia es el rango del VAN óptimo, a medida que la tasa de descuento aumenta, éste disminuye. Las variables precio y REM, presentaron resultados muy parecidos, por lo tanto, se concluye que afectan en igual medida al cálculo de la tasa de producción óptima.

Por otro lado, se obtuvo que al aumentar el precio en un 122%, el VAN máximo aumentó un 831%, un 1132% y 4393% para las reservas grande, mediana y pequeña respectivamente, por lo que se puede decir que la reserva pequeña es la que se vio afectada en mayor medida por un cambio en el precio. A su vez, cuando se varió la razón estéril-mineral en un 200%, el tamaño de reserva que presentó la mayor disminución del VAN (54%) fue la reserva pequeña. También se pudo concluir que la tasa de descuento afecta el VAN máximo en igual medida para las 3 reservas.

En cuanto al *Payback* se pudo obtener una relación entre la tasa de producción mínima que se debería elegir, y el tamaño de la reserva, la cual para los 3 casos resultó ser aproximadamente un décimo de la reserva total. Si se eligiera una tasa menor, el *Payback* es muy alto lo que significa que la inversión se demoraría en recuperar. También se concluyó que cuando se varió la REM, la tasa de producción mínima que se debía elegir según el *Payback*, considera la misma cantidad de mineral para cualquier caso, lo que sí varía es la cantidad de estéril.

Desde otro punto de vista, los valores del *Payback* en la mayoría de los casos coincidió con el criterio del VAN, esto porque se utilizó el valor descontado de los flujos de caja para calcularlo. Por lo tanto, el *Payback* descontado podría ser un criterio confiable para la toma de decisiones, cuando



se requiere entregar seguridad a los inversionistas. Sin embargo, a pesar de haber utilizado un *Payback* “corregido”, sigue teniendo una deficiencia y es que no considera los valores de los flujos de caja posteriores a la recuperación de la inversión, por lo que no muestra diferencias en un aumento de la tasa de producción después de ese punto. En consecuencia, este criterio no debe utilizarse como el principal y debe ser complementado con otro.

Además, se concluyó que, a medida que aumenta el tamaño de la reserva, la curva del VAN por si sola entrega datos de la vida de la mina que no varían significativamente, por lo que el criterio de Smith resultaría más conveniente, ya que entrega un rango en el que se obtendrían los mejores resultados para el proyecto, ampliando las opciones para el planificador.

La comparación de los métodos para seleccionar la tasa de producción óptima, muestran que la fórmula de Taylor entrega resultados que están dentro del rango que propone el criterio de Smith, es decir, entre el máximo de la curva “2xCapital” y el máximo de la curva del VAN. Luego, a pesar de su antigüedad, la fórmula de Taylor entrega valores confiables para tener una primera aproximación sobre la tasa de producción óptima de una mina, para comenzar con los estudios del proyecto.

En el estudio del caso real se concluyó que, para esta reserva en particular, tasas de producción y leyes de corte altas, generan en la mayoría de los casos un mayor VAN. Por lo tanto, la ley de corte que traía la base de datos (0.3%) es muy baja y se recomienda aumentarla a 0.8%, que es donde se alcanza el mayor valor. Sin embargo, elegir la tasa de producción que entregue el VAN máximo puede no ser la mejor opción debido a motivos de seguridad u operativos. Se recomienda analizar valores cercanos a la tasa de producción óptima en donde se satisfagan factores operacionales que no generen una variación significativa del VAN.

En el caso particular estudiado, las ganancias reales que se obtendrían al optimizar para un precio alto, son un 60% menor a las pérdidas que se tendrían si se optimiza para un precio alto y luego este disminuyera. Por lo tanto, para este yacimiento particular, se recomienda optimizar para un precio bajo.



## Referencias

- [1] Sociedad Nacional de Minería, “Caracterización de la pequeña y mediana minería en Chile.” Sociedad Nacional de Minería, p. 18, 2014.
- [2] W. Hustrulid, *Open Pit Mine Planning & Design*. 2013.
- [3] J. Rostami, “Mechanical Rock Breaking”, *SME Min. Eng. Handbook, Third Ed.*, p. 388, 2011.
- [4] R. Glanville, “Optimum production rate for high-grade/low tonnage mines”, *Am. Inst. Mining, Metall. Pet. Eng.*, 1985.
- [5] B. Cavender, “Determination of the optimum lifetime of a mining project using discounted cashflow and option pricing techniques”, *SME Annu. Meet.*, vol. 44, pp. 1262–1268, 1992.
- [6] S. A. Abdel Sabour, “Mine size optimization using marginal analysis”, *Resour. Policy*, vol. 28, n° 3–4, pp. 145–151, 2002, doi: 10.1016/j.resourpol.2004.01.001.
- [7] L. D. Smith, “A critical examination of the methods and factors affecting the selection of an optimum production rate”, *CIM Bull.*, vol. 90, n° 1007, pp. 48–54, 1997.
- [8] H. M. Wells, “Optimization of Mining Engineering Design in Mineral Valuation.”, *Min Eng (New York)*, vol. 30, n° 12, pp. 1676–1684, 1978.
- [9] R. Glanville, “The valuation of mining properties (with a case study of a computer-assisted application of the discounted cash flow (DCF) valuation method)”. United Nations Interregional Seminar on the Applications of Electronic Data Processing Methods in Mineral Exploration and Development, Sudbury, 1987.
- [10] R. R. Tatiya, *Surface and Underground Excavations*. A.A. Balkema Publishers, 2005.
- [11] E. K. Cork, “Financial Objectives of a Mining Company”, *Financ. Miner. Ind.*, pp. 42–45, 1985.
- [12] I. C. Runge, *Mining Economics and Strategy*. Society for mining, metallurgy and exploration, inc., 1998.
- [13] A. Kennedy, *Surface Mining, Second Edition*. Society for mining, metallurgy and exploration, inc., 1990.
- [14] M. Hargrave y D. Kindness, “Weighted Average Cost of Capital – WACC Definition”, abr-2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.investopedia.com/terms/w/wacc.asp>. [Accedido: 19-ago-2020].
- [15] J. E. Dowis, “Detailed cost estimating for a mining venture”, en *Mining Industry Costs*, Spokane: Northwest Mining Association, 1982, pp. 193–212.



- [16] R. T. McKnight, "Empirical methodology for the valuation of risky gold cashflows", en *Gold Mining 88*, C. . Brawner, Ed. Baltimore: Society of Mining Engineers Inc., 1988.
- [17] P. N. Neingo, T. Tholana, y A. S. Nhleko, "A comparison of three production rate estimation methods on South African platinum mines", *Resour. Policy*, vol. 56, n° November 2017, pp. 118–124, 2018, doi: 10.1016/j.resourpol.2017.11.006.
- [18] B. B. E. Hall, "How Mining Companies Improve Share Price by Destroying Shareholder Value", en *CIM Mining Conference and Exhibition*, 2003, pp. 1–17.
- [19] Cost Mine, "Mine and mill equipment costs: An estimator's guide.", InfoMine USA Inc, Aventurine Engineering Inc, 2008.
- [20] Dinero en el tiempo, "Valor actual del dólar de 2008 - Variación IPC". [En línea]. Disponible en: <https://www.dineroeneltiempo.com/dolar/de-2008-a-valor-presente>. [Accedido: 26-jul-2020].
- [21] T. W. Camm, "Simplified cost models for prefeasibility mineral evaluations". United States Department of the Interior- Bureau of Mines, 1991.
- [22] Comisión Chilena del Cobre, "Precio de los Metales e Inventarios". [En línea]. Disponible en: [https://boletin.cochilco.cl/estadisticas/grafico.asp?tipo\\_metal=1](https://boletin.cochilco.cl/estadisticas/grafico.asp?tipo_metal=1). [Accedido: 16-jul-2020].
- [23] "Histórico del precio de Cobre - Investing.com". [En línea]. Disponible en: <https://es.investing.com/commodities/copper-historical-data>. [Accedido: 12-ago-2020].
- [24] Management Science y UAI, "Datasets". [En línea]. Disponible en: <http://mansci-web.uai.cl/minelib/Datasets.xhtml>. [Accedido: 06-sep-2020].



## ANEXOS

### A. Factores que afectan el cálculo de la TPO

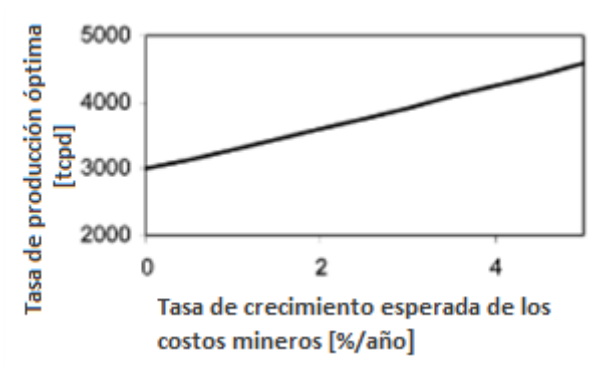


Figura A1: "Efecto de la tasa de crecimiento esperada de los costos de extracción en la TPO" [6]

En la Figura A2, desde el punto a al b la tasa de producción óptima aumenta a medida que el costo de capital aumenta. Después del punto b, la tasa de producción óptima disminuye con el aumento del costo de capital.

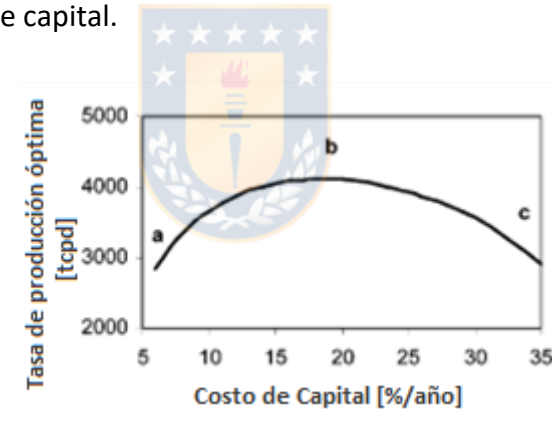


Figura A2: "Relación entre la tasa de producción óptima y el costo capital" [6]

### B. Análisis de sensibilidad del precio

Tabla B1: VAN máximos y mínimos frente a variación del precio en reserva grande"

Precio	VAN	Mton	VAN	Mton
[USD/lb]	Máximo	por año	Mínimo	por año



1.8	45.4	5	1.7	1
2.0	74.2	6	8.5	1
2.2	104.7	6	15.2	1
2.4	135.1	6	21.9	1
2.6	165.6	6	28.7	1
2.8	196.1	6	35.4	1
3.0	229.6	7.5	42.2	1
3.2	266.3	10	48.9	1
3.4	304.6	10	55.7	1
3.6	342.9	10	62.4	1
3.8	381.9	12	69.1	1
4.0	422.6	12	75.9	1

Tabla B2: "VAN máximos y mínimos frente a variaciones del precio en reserva mediana"

Precio [USD/lb]	VAN Máximo	Mton por año	VAN Mínimo	Mton por año
1.8	17.5	3	1.5	1
2.0	33.5	3.75	2.5	0.5
2.2	50.5	3.75	5.8	0.5
2.4	67.6	3.75	9.2	0.5
2.6	84.6	3.75	12.6	0.5
2.8	101.6	3.75	16.0	0.5
3.0	119.8	5	19.3	0.5
3.2	139.0	5	22.7	0.5
3.4	158.1	5	26.1	0.5
3.6	177.3	5	29.5	0.5
3.8	196.4	5	32.8	0.5
4.0	215.6	5	36.2	0.5



**Tabla B3: VAN máximos y mínimos frente a variación del precio en reserva pequeña"**

Precio [USD/lb]	VAN Máximo	Mton por año	VAN Mínimo	Mton por año
1.8	1.5	1.1	0.7	1.3
2.0	6.9	1.1	2.5	1
2.2	12.2	1.1	1.6	2.5
2.4	17.7	1.3	8.8	2.5
2.6	23.5	1.4	7.0	3.3
2.8	29.5	1.4	14.7	3.3
3.0	35.5	1.6	22.4	3.3
3.2	41.9	1.6	7.6	5
3.4	48.3	1.6	15.9	5
3.6	54.7	1.6	24.1	5
3.8	61.0	1.6	32.3	5
4.0	67.4	1.6	40.6	5

### C. Análisis de sensibilidad de Tasa de descuento

**Tabla C1: "VAN máximos y mínimos frente a variación de la tasa de descuento en reserva grande"**

Tasa de descuento	VAN Máximo	Mton por año	VAN Mínimo	Mton por año
8%	278.3	6	74.1	1
9%	261.0	6	64.3	1
10%	244.8	6	56.3	1
11%	229.7	6	49.6	1
12%	215.6	6	44.0	1
13%	202.3	6	39.2	1





14%	189.9	6	35.1	1
15%	178.2	6	31.5	1
16%	167.3	6	28.3	1
17%	156.9	6	25.5	1
18%	147.2	6	23.0	1
19%	138.0	6	20.8	1
20%	129.4	6	18.7	1

Tabla C2: "VAN máximos y mínimos frente a variación de la tasa de descuento en reserva mediana"

Tasa de descuento	VAN Máximo	Mton por año	VAN Mínimo	Mton por año
8%	137.9	3.75	34.1	0.5
9%	130.2	3.75	29.5	0.5
10%	122.8	3.75	25.8	0.5
11%	115.9	3.75	22.6	0.5
12%	109.3	3.75	20.0	0.5
13%	103.1	3.75	17.7	0.5
14%	97.2	3.75	15.7	0.5
15%	91.7	3.75	14.0	0.5
16%	86.4	3.75	12.5	0.5
17%	81.4	3.75	11.1	0.5
18%	76.6	3.75	9.9	0.5
19%	72.1	3.75	8.8	0.5
20%	67.8	3.75	7.9	0.5



**Tabla C3: VAN máximos y mínimos frente a variación de la tasa de descuento en reserva pequeña"**

Tasa de descuento	VAN Máximo	Mton por año	VAN Mínimo	Mton por año
8%	40.5	1.1	20.1	3.3
9%	38.0	1.25	18.5	3.3
10%	35.7	1.25	17.1	3.3
11%	33.5	1.25	15.6	3.3
12%	31.4	1.4	14.2	3.3
13%	29.5	1.4	12.8	3.3
14%	27.7	1.4	11.5	3.3
15%	26.0	1.4	10.2	3.3
16%	24.3	1.4	9.0	3.3
17%	22.8	1.4	7.7	3.3
18%	21.3	1.4	6.6	3.3
19%	19.9	1.4	5.4	3.3
20%	18.5	1.4	4.3	3.3

#### D. Análisis de sensibilidad de la REM

**Tabla D1: "VAN máximos y mínimos frente a variación de la REM en reserva grande"**

REM	VAN máx.	Mton/año	VAN mín.	Mton /año
1:1	178.2	6	31.5	1
2:1	138.4	10	28.3	1.5
3:1	108.0	12	16.8	2



**Tabla D2: "VAN máximos y mínimos frente a variación de la REM en reserva mediana"**

REM	VAN máx.	Mton/año	VAN mín.	Mton/año
1:1	91.7	3.75	14.0	0.5
2:1	73.3	5	4.0	15
3:1	56.7	6	16.4	2





**Tabla D3: "VAN máximos y mínimos frente a variación de la REM en reserva pequeña"**

REM	VAN máx.	Mton/año	VAN mín.	Mton/año
1:1	26.0	1.4	10.2	3.3
2:1	19.3	2.1	1.5	5
3:1	11.7	2.2	3.8	5





UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN - FACULTAD DE INGENIERÍA  
Departamento de Ingeniería Metalúrgica  
Hoja Resumen Memoria de Título

Título: "Cálculo de la tasa de producción óptima en minería a cielo abierto".		
Nombre Memorista: Francisca Andrea Miguel Albornoz		
Modalidad	Investigación	Profesor (es) Patrocinante (s)
Concepto	Muy Bueno	 Prof <sup>a</sup> . Asieh Hekmat
Calificación	6.5	
Fecha	30-10-2020	
 Prof. FERNANDO PARADA		
		Institución:
Comisión (Nombre y Firma)		
 Prof. René Gómez P.		 Prof. Roberto Fustos T.
Resumen		
<p>En la planificación de una mina, la selección de la tasa de producción es una de las decisiones más importantes que afecta directamente en la viabilidad de un proyecto minero. Esta tasa, generalmente no se reevalúa cuando se tiene nueva información disponible, por lo que es probable que la mina no esté alcanzando su máximo potencial de ganancias. Este estudio tiene como objetivo comparar distintos métodos usados para determinar la tasa de producción óptima (TPO), analizando el efecto de factores claves para diferentes tamaños de reserva.</p> <p>Se realizó un análisis de sensibilidad para la tasa de descuento, el precio y la REM en tres tamaños de reserva, obteniendo como resultado que la tasa de descuento es el factor menos sensible, ya que al variarlo no hubo cambios significativos en la TPO. Para el análisis del precio, se obtuvo que al aumentar el precio en un 122%, la TPO, aumentó en un 100%, 66% y 45% para las reservas grande, mediana y pequeña respectivamente. Además, el análisis de la REM, mostró resultados similares al análisis del precio, puesto que al aumentar la REM en un 200%, la TPO de las reservas grande mediana y pequeña, aumentó en un 100%, 60% y 57%. Por lo tanto, el precio y la REM son parámetros sensibles y afectan en similar medida a la TPO.</p> <p>Con respecto a los resultados de la comparación entre métodos que estiman la TPO, se concluyó que, a pesar de su antigüedad, la fórmula empírica de Taylor sigue entregando resultados acertados que sirven para evaluar un proyecto minero en su primera etapa. Por otro lado, el criterio de Lawrence Smith que plantea que existe un rango de TPO entre el máximo de la curva que paga dos veces el capital y el máximo de la curva del VAN, es una buena forma para estimar la TPO, puesto que la curva del VAN por si sola, en ocasiones no entrega información significativa sobre la vida de la mina.</p> <p>Finalmente se aplicó la metodología de <i>Hill of Value</i> a un caso real, donde se obtuvo que la ley de corte de 0.3 previamente seleccionada en la base de datos, no era óptima y que, para generar el máximo valor, se debe aumentar a 0.8 y seleccionar una tasa de producción de 44 [Mton/año], obteniéndose una diferencia de 321 MUSD extras.</p>		