



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

IMPLEMENTACIÓN DE ORE VALUE RANKING EN MINERA ESCONDIDA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL DE MINAS

ISADORA PAZ RAMÍREZ CASTILLO

PROFESOR GUÍA:

FELIPE KREMER AEDO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

JUAN LUIS YARMUCH GUZMÁN

NELSON MORALES VARELA

SANTIAGO DE CHILE

2017

RESUMEN

El descenso en las leyes de los materiales en las distintas minas y el aumento de los costos, generan un escenario actual en la minería en que es necesario implementar innovaciones y tecnología para aprovechar de la mejor manera los recursos y aumentar el valor del negocio minero, esto es posible a través de la planificación minera, la cual define la secuencia de extracción y la asignación de los materiales explotados a los distintos destinos. La secuencia de extracción determina para cada periodo de tiempo la cantidad de material que se extraerá y desde que lugar de la mina se explotarán. En cambio la asignación de material define hacia dónde se destinarán los materiales ya explotados, ya sea a destinos de procesamiento (planta concentradora, pilas de lixiviación, etc) o a stocks para su posterior proceso o a botaderos. Actualmente la metodología tradicional de planificación hace que tanto la secuencia de extracción como la asignación de materiales se basen en usar la ley como criterio de decisión, en cambio Ore Value Ranking cuestiona este procedimiento y propone incorporar más información que solo la ley para así tomar decisiones más informadas.

El objetivo de la presente memoria es generar la estandarización y metodología para implementar Ore Value Ranking en Minera Escondida Ltda., para ello se estudiaron dos criterios de decisión (o de corte) los cuales son una ley castigada por la recuperación de cada destino (CuRec/t) y el otro es el beneficio marginal por tonelada (US\$/t). Si bien el último criterio incorpora más información, como por ejemplo costo de mina variable en función del tiempo de ciclo de cada bloque a cada destino, también incorpora mayor incertidumbre debido a que considera algunas variables no controladas, como los son el precio y el costo de combustible.

Dentro de los resultados obtenidos en este estudio, destaca que utilizar el criterio CuRec/t en el plan del año fiscal 2018, sin cambiar la secuencia de extracción original, solo asignando mejor a los destinos, significa un aumento de 0.26% en el total de producción de cobre fino y en un incremento de 0.4% del beneficio económico de Minera Escondida. Lamentablemente debido a las limitaciones de los softwares de planificación que utiliza actualmente la empresa, no fue posible generar un plan minero usando el criterio US\$/t, pero en un futuro cuando sea factible, se recomienda contrastar el beneficio de este criterio con la incertidumbre que incorpora.

Otro resultado importante fue la definición de las leyes de corte para cada material de los rajos de Minera Escondida usando Ore Value Ranking, esto permitió mostrar que la ley de corte 0.3% de cobre, que actualmente utiliza la empresa, es un valor mucho más alto del que debería ser, significando que 367 Mt de material fueran consideradas lastre en el plan quinquenal, pero realmente eran mineral al tener en cuenta más información. Para ver cuánto de ese tonelaje extra efectivamente puede ser procesado se recomienda generar planes con estas nuevas leyes de corte.

Finalmente se recomienda que para lograr una implementación real de Ore Value Ranking en Minera Escondida es necesario una correcta gestión de cambio, en la cual se muestre los potenciales beneficios de este cambio, creando equipos comprometidos con la estrategia de la empresa y asegurando los elementos tangibles como softwares apropiados y capacitaciones al personal.

ABSTRACT

The decrease in mineral grades in different mines and the increase in costs, have created an scenario in which the implementation of innovation and new technologies is needed in order to make the best use of resources and so increment the value in the mining business. All this is possible through the mine planning that defines the sequence of extraction and the allocation of exploited material to different processes.

The sequence of extraction defines, for each period of time, the quantity and location of material that will be extracted. On the other hand, the allocation of material defines where this material, already extracted, will end, either at different processes (concentrator plant, leaching piles, etc.), at stock for its later processing, or to waste material. Nowadays the traditional methodology of planning makes both, the extraction sequence and the material allocation, use the cutoff grade as a decision criteria instead, the Ore Value Ranking questions this procedure and offers the incorporation of more information in order to make more accurate decisions.

The objective of the present thesis is to generate the standardization and methodology to implement Ore Value Ranking in Minera Escondida LTDA., two decision criteria where studied, the first one consists in a grade punished by the recuperation of each destiny (CuRec/t) and the second one is the marginal benefit by tonnage (US\$/t). Although the last criterion incorporates more information, such as the variable mine cost, depending on the cycle time of each block to its destiny, it also incorporates more uncertainty due to the fact that it considers some non controllable variables, such as the metal price and the fuel cost.

From the results obtained in this study highlights that the use of criterion CuRec/t in the plan for fiscal year 2018, without changing the original extraction sequence and only optimizing the process assignment, produces and increment of 0.26% in total fine copper production and a 0.4% of the economical benefit for Minera Escondida. Unfortunately due to limitations of the planning softwares that Minera Escondida uses it was not possible to generate a mine plan using the US\$/t criteria, but it's recommended for future exercises to register the benefit of this criterion considering the uncertainty that incorporates.

Other significant result is the definition of cutoff grades for each material of Minera Escondida pits using Ore Value Ranking, this allowed to show that the current 0.3% cutoff grade, is a higher than it should, meaning that 367 Mt of material where considered as waste rather than mineral in the five year plan. To see how much of that extra tonnage can be processes it's recommended to generate plans with this new cutoff grades.

Finally, it is recommended that, to achieve a real implementation of the Ore Value Ranking at Minera Escondida, a correct change management is needed, one that shows the potential benefits of this change, creating teams committed to the strategy of the company and ensuring tangible elements such as softwares and the corresponding staff training.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mis padres, Jimena Castillo y Roberto Ramírez, por brindarme, a través de su esfuerzo y cariño, los medios y condiciones para alcanzar mis metas.

Agradezco a la Universidad de Chile por entregarme, a través de su excelencia, las herramientas para enfrentar el mundo laboral.

Gracias a Minera Escondida Ltda. por darme la oportunidad de realizar una memoria desafiante y enriquecedora en su organización, especialmente agradezco a Felipe Kremer por su apoyo, confianza y compromiso.

Finalmente doy las gracias a mi pareja Tomás Ayala, quien ha sido mi mayor apoyo con su compañía y amor en estos seis años de crecimiento como profesional y como persona.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Motivación del trabajo	1
1.2 Objetivos	2
1.2.1 Objetivo General	2
1.2.2 Objetivos Específicos	3
1.3 Alcances	3
2. METODOLOGÍA	4
3. ANTECEDENTES	6
3.1 Revisión Bibliográfica	6
3.1.1 Teoría de Kenneth Lane: “The Economic definition of ore”	6
3.1.2 Aplicación de Brett King: “Cash Flow Grades”	7
3.1.3 Memoria de Ignacio Medina: “Valores de corte multivariable en planificación minera” ...	8
3.1.4 Memoria de Marcelo Vargas: “Modelo de planificación minera de corto y mediano plazo incorporando restricciones operacionales y de mezcla”	9
3.1.5 Morales C. y Rubio E: "Development of a mathematical programming model to support the planning of short-term mining"	11
3.1.6 Smith M. L.: “Optimizing short-term production schedules in surface mining: Integrating mine modeling software with AMPL/CPLEX”	12
3.1.7 Análisis Bibliográfico	13
3.2 Antecedentes del proyecto	15
3.2.1 Antecedentes de la empresa	16
3.2.2 Antecedentes de OVR	17
4. DESARROLLO	20
4.1 Actualización de modelo de productividad	20
4.2 Actualización de costos	23
4.3 Generación de curvas de beneficio	25
4.4 Estudio de materiales de baja ley	31
4.4.1 Sulfuros	31
4.4.2 Mixtos	34
4.4.3 Óxidos	36
4.5 Definición de modelo de costo de venta	38
5. RESULTADOS	42
5.1 Aplicación de OVR en estudio de Ore Control	42

5.2	Uso de OVR en plan del año fiscal	45
5.3	Implementación de OVR en Ore Control y Corto Plazo	50
5.3.1	Estandarización en Ore Control	51
5.3.2	Estandarización en Planificación de Corto Plazo	52
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	53
7.	BIBLIOGRAFÍA	55

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Descripción de valores de corte	9
Tabla 2: Varianza de modelo tiempos de ciclo en el tiempo	21
Tabla 3: Inputs de costos de script de costos.....	24
Tabla 4: Recuperaciones promedio de materiales en destinos	30
Tabla 5: Características de sulfuros secundarios y primarios de baja ley.....	31
Tabla 6: Leyes de corte marginal de sulfuros primarios y secundarios	33
Tabla 7: Tonelaje de sulfuros primarios y secundarios sobre ley de corte marginal y bajo 0.3%	33
Tabla 8: Leyes de corte marginal de sulfuros en función de costos de capital de sustento.....	33
Tabla 9: Características de mixtos de baja ley	34
Tabla 10: Ley de corte marginal y tonelaje de mixtos de baja ley	35
Tabla 11: Leyes de corte marginal de mixtos en función de costos de capital de sustento	35
Tabla 12: Características de óxidos de baja ley.....	36
Tabla 13: Ley de corte marginal y tonelaje de óxidos de baja ley	37
Tabla 14: Leyes de corte marginal de óxidos en función de costos de capital de sustento	38
Tabla 15: Aplicación de castigos en función de contenido de As y Zn.....	39
Tabla 16: Máximo y mínimo de costo de venta variable en año fiscal 2018	41
Tabla 17: Comparación de planes de caso base y CuRec/t.....	46
Tabla 18: Comparación de plan Caso base y nuevo plan CuRec/t	49

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Ejemplo de aplicación.....	1
Ilustración 2: Esquema de valorización.....	2
Ilustración 3: VAN diferencial en función de ley de corte.....	6
Ilustración 4: Esquema de cálculo de CuRec/t.....	18
Ilustración 5: Esquema de cálculo de US\$/t.....	18
Ilustración 6: Comportamiento de tiempos de ciclo en fase PL1.....	20
Ilustración 7: Comparación de tiempos de ciclo de data y modelo.....	21
Ilustración 8: Gráfico de dispersión de tiempos de ciclo entre modelo y data.....	22
Ilustración 9: Ejemplificación de script de modelo de productividad.....	22
Ilustración 10: Curvas de beneficio de sulfuros primarios en ambos rajos.....	27
Ilustración 11: Curvas de beneficio de sulfuros secundarios en ambos rajos.....	28
Ilustración 12: Curvas de beneficio de material parcial en ambos rajos.....	28
Ilustración 13: Curvas de beneficio de mixtos en ambos rajos.....	29
Ilustración 14: Curvas de beneficio de óxidos en ambos rajos.....	29
Ilustración 15: Curva de beneficio de sulfuros primarios de baja ley.....	32
Ilustración 16: Curva de beneficio de sulfuros secundarios de baja ley.....	32
Ilustración 17: Curva de beneficio de mixtos de baja ley.....	34
Ilustración 18: Curva de beneficio de óxidos de baja ley.....	37
Ilustración 19: Gráfico de dispersión bloques a concentradora con costo de venta variable versus fijo....	40
Ilustración 20: Curvas de beneficio de mixtos con 30% y 35% de recuperación en LS.....	43
Ilustración 21: Curva de beneficio por material en LO.....	43
Ilustración 22: Curva de beneficio por material en LS.....	44
Ilustración 23: Comparación de finos con plan caso base y CuRec/t.....	46
Ilustración 24: Gráfico cascada de fino en plan caso base y CuRec/t.....	47
Ilustración 25: Gráfico cascada de fino plan caso base y CuRec/t.....	48
Ilustración 26: Gráfico cascada de finos plan caso base y CuRec/t.....	48
Ilustración 27: Esquema de alineación entre áreas con OVR.....	50
Ilustración 28: Forma de trabajo en Vulcan con OVR.....	52

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1: Fórmula del método Cash Flow Grade	7
Ecuación 2: Función objetivo para maximizar fino	10
Ecuación 3: Fórmula de cálculo de CuRec/h	18
Ecuación 4: Fórmula de cálculo de US\$/h.....	18
Ecuación 5: Fórmula de beneficio de procesamiento	26
Ecuación 6: Fórmula de beneficio de lastre	26
Ecuación 7: Ecuación de beneficio mineral dependiente solo de ley	26
Ecuación 8: Ecuación de costo de venta unitario fijo.....	39
Ecuación 9: Ecuación de costo de venta variable	40

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación del trabajo

Minera Escondida es una mina de cobre ubicada en el Desierto de Atacama, en la zona norte de Chile, es operada por BHP Billiton y es propiedad de BHP Billiton (57,5%), Rio Tinto PLC (30%) y Jeco Corporation (12.5%). Escondida posee dos rajos, Rajo Escondida y Rajo Escondida Norte, los cuales en conjunto producen concentrado y cátodos de cobre, haciendo de ésta la mina con mayor producción de cobre del mundo.

La planificación minera tiene el objetivo de diseñar la mejor estrategia productiva en función de los recursos minerales existentes y las estrategias de negocios establecidas por las compañías mineras. Los planes mineros definen la secuencia de extracción y la asignación de los materiales explotados a los distintos destinos. La secuencia de extracción determina qué, cuándo y cuánto se extraerá, en otras palabras precisa para cada periodo de tiempo la cantidad de material que se extraerá y desde que lugar de la mina se explotarán. En cambio la asignación de material responde a la pregunta hacia dónde se destinarán los materiales ya explotados, ya sea a destinos de procesamiento (planta concentradora, pilas de lixiviación, etc.) o a stocks para su posterior proceso o a botaderos.

Ore Value Ranking (OVR) es una metodología que genera un plan minero usando información adicional a la ley para destinar y secuenciar materiales.



Ilustración 1: Ejemplo de aplicación.

En la Ilustración 1 se observa un diagrama para un rajo del cual se quiere saber qué bloque sería mejor extraer primero. Si fuera por el método convencional, que hasta hoy ha usado Minera Escondida se escogería el bloque B, ya que sólo se consideraría la ley como criterio de decisión y por lo tanto extraer las mejores leyes primero, sería la mejor opción. Pero al usar esta metodología se estaría ignorando que el bloque A tiene una mejor recuperación en la planta y que también tiene un costo de transporte menor al bloque B, aunque el bloque B además de tener una mejor ley posee una tasa de tratamiento más rápida en la planta debido a que tiene menor dureza. En consecuencia cabe la pregunta de si al considerar toda esta información adicional, la decisión se mantiene o cambia al bloque A, y es justamente Ore Value Ranking la metodología que entrega esta respuesta integrando varios ítems en la valorización de los bloques, de manera de optimizar la secuencia de extracción al tomar decisiones más informadas.

El método OVR además de optimizar la secuencia de extracción, también optimiza el destino de cada bloque, lo que es fundamental en minas como Minera Escondida, la cual posee muchos destinos, tales como plantas concentradoras, lixiviación de sulfuros, lixiviación de óxidos, stocks y botaderos, sin embargo hasta estos días se destina cada material en función de criterios de ley de

corte pudiendo existir el caso en que un bloque de óxidos que tenga ley inferior a la ley de corte, produce menos pérdida de beneficio mandarlo a lixiviación de óxidos en vez del botadero. Como OVR considera la recuperación por procesos variable bloque a bloque, toma mejores decisiones al definir el mejor destino para los materiales.

La valorización con Ore Value Ranking depende del cuello de botella de la planta, si éste es el tonelaje, debido a que se tienen limitaciones ya sea en la capacidad hidráulica de la planta, recursos hídricos, chancado, entre otros, entonces los bloques se valorizarán en unidades de masa, ya sea dólares por tonelada (US\$/t) o cobre recuperado por tonelada (CuRec/t), en cambio si se tiene materiales muy duros, el tiempo de residencia en la planta aumentará, haciendo que el tiempo en la planta sea el crítico, y por lo tanto lo más conveniente es efectuar una valorización en horas, ya sea US\$/h o CuRec/h. De este modo se podrá maximizar el valor en función de lo que es crucial en la planta, tal como se muestra en la Ilustración 2.

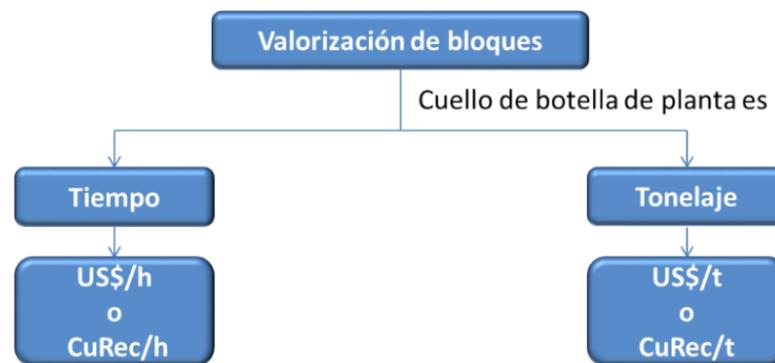


Ilustración 2: Esquema de valorización.

Escondida ha realizado un análisis evaluando OVR, el cual arroja un 1% al VAN del plan de 10 años, sin modificar la secuencia de extracción original, sólo destinando correctamente los materiales, por lo tanto este beneficio adicional sería sin CAPEX adicional. Al implementar esta nueva metodología en Minera Escondida, las principales áreas que experimentarían cambios en sus rutinas convencionales serían:

- Planificación de largo, mediano y corto plazo.
- Ore Control.

Ore Control son los encargados de trazar los polígonos de material de la mina y generar las reconciliaciones de leyes, por lo tanto considerando la cantidad de áreas involucradas, implementar OVR en Minera Escondida representa un desafío no solo ingenieril sino también de gestión.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Generar la estandarización y metodología para implementar Ore Value Ranking en Minera Escondida Ltda., ajustado a sus necesidades y estrategias.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Generar modelo de productividad de ambos rajos de Minera Escondida, con el fin de tener costos de mina diferenciado bloque a bloque.
- Definir modelo de costo de venta, reflejando contenido de elementos menores y ley de concentrado.
- Comparar los resultados obtenidos de valorizar los bloques en US\$/t y CuRec/t y determinar cuál es la mejor opción.
- Resolver las necesidades que las áreas involucradas tendrán con la implementación de Ore Value Ranking, además de asegurar que tengan un correcto entendimiento de éste, con los cambios e implicancias que conlleva para consolidar una óptima implementación de esta nueva metodología.

1.3 Alcances

- Se comparan criterios CuRec/t y US\$/t en un horizonte de corto plazo sin modificar secuencia de extracción original, sólo cambiando la forma en que se destinan los bloques (asignación a procesos).
- El costo mina solo considera variable el costo de transporte en función de los tiempos de ciclo, los demás costos como perforación, tronadura y carguío se definen como costos unitarios fijos.
- Los costos de mandar el material a stock no consideran costos por remanejo ni costos de oportunidad.
- Los elementos menores considerados en el modelo de costos de venta son:
 - Arsénico.
 - Zinc.
- Se estandariza implementación de OVR específicamente en las áreas:
 - Planificación Corto Plazo.
 - Ore Control.

2. METODOLOGÍA

Para alcanzar los objetivos de la presente memoria, se cuentan con las siguientes nueve etapas, desarrollados en orden cronológico.

1. Revisión de antecedentes bibliográficos y teóricos.
2. Actualización de modelo de tiempos de ciclo.
3. Actualización de costos unitarios fijos.
4. Definición de modelo de costo de venta.
5. Generación de curvas de beneficio.
6. Aplicación de OVR en estudio de Ore Control.
7. Uso de OVR en plan del año fiscal.
8. Implementación de OVR en Ore Control y Corto Plazo.
9. Análisis de resultados y conclusiones.

A continuación estas etapas se describen de forma general.

1. Revisión de antecedentes bibliográficos y de la empresa: Se analizan estudios que cuestionan el criterio de corte convencional y se aterrizan con los antecedentes y realidad de Minera Escondida.
2. Actualización de modelo de productividad: Con el último plan quinquenal emitido por el área de Planificación de Mediano Plazo, se actualizan los modelos de productividad existentes en la empresa, que definen las toneladas por hora de cada bloque en función de sus tiempos de ciclo de transporte hacia cada destino.
3. Renovación de costos: Minera Escondida cuenta con modelo de costos unitarios fijos para definir el costo mina, costo de procesamiento y de venta, el cual se actualiza con los valores considerados en el último plan quinquenal emitido.
4. Definición de modelo de costo de venta: En la empresa el costo de venta se define como costo unitario fijo, por lo que se procede a definir un modelo de costo de venta variable que considera la presencia de elementos menores y la ley de concentrado que produce cada bloque.
5. Generación de curvas de beneficio: Se grafica el beneficio por tonelada de los bloques de un modelo de bloques en función de la ley de cobre, para los distintos tipos de material presentes en Escondida, en los distintos tipos de procesamiento (planta concentradora, lixiviación de sulfuros, lixiviación de óxidos y botadero). Lo anterior con el fin de ver el potencial de usar un nuevo criterio de corte.
6. Aplicación de OVR en estudio de Ore Control: El área de Ore Control tiene la necesidad de evaluar la factibilidad de procesar material de clasificación mixta (sulfurado y oxidado) en lixiviación de sulfuros, ya que solo se destina a lixiviación de óxidos. Para esto se generan curvas de beneficio aplicando la metodología Ore Value Ranking y así poder definir la mejor opción considerando la diferencia de costos y recuperación en los destinos.

7. Uso de OVR en plan del año fiscal: El área de Planificación de Corto Plazo genera el plan de dos años fiscales de la mina, usando como criterio de corte la ley de cobre. Se procede a aplicar la metodología Ore Value Ranking al primer año fiscal del plan de dos años, manteniendo la secuencia de extracción, pero cambiando los destinos en función de lo que genere mayor valor de fino, si se usa cobre recuperado por tonelada o mayor de beneficio si se usa dólares por tonelada.
8. Implementación de OVR en Ore Control y Corto Plazo: Se estudian los procesos y softwares usados por ambas áreas y se evalúa la factibilidad de implementar la metodología Ore Value Ranking en sus procedimientos, finalizando con reporte entregado a la empresa que estandariza la forma de implementar OVR en estas áreas, proponiendo soluciones a las necesidades que se tengan.
9. Análisis de resultados y conclusiones: Se examinan los resultados obtenidos y se forman conclusiones y recomendaciones de utilidad tanto académica, como para la empresa Minera Escondida.

3. ANTECEDENTES

3.1 Revisión Bibliográfica

3.1.1 Teoría de Kenneth Lane: “The Economic definition of ore”

El libro de K. Lane invita al cuestionamiento de lo que convencionalmente se ha definido como mineral (material sobre una ley de corte), ya que este criterio se deduce del beneficio y este no refleja el trade off entre procesar ahora o procesar en el futuro, lo cual es un error muy importante porque se tiene una capacidad limitada de tratamiento y muchas veces se debe enviar material a stocks. Además el problema de ambas aseveraciones es que ninguna lidia con las fluctuaciones de precio u otros parámetros económicos en el tiempo y es por esto que Lane afirma que el VAN es el único criterio que incorpora estas variaciones, definiendo una política de leyes de corte optimizada.

El VAN remanente decrece mientras se va consumiendo los recursos, haciéndose cero cuando se agotan. Es por esto que se debe tener una estrategia óptima para la tasa de decrecimiento.

Lane define una forma de calcular los criterios de corte (g) deducido de la fórmula del VAN, estos criterios dependen de los procesos que limitan la capacidad del sistema, como usualmente no son uno, sino varios los procesos que restringen la capacidad total del sistema en una operación minera, como por ejemplo la capacidad de transporte, la capacidad de procesamiento, etc., el autor propone una metodología para obtener el criterio de corte óptimo aprovechando la forma convexa que tiene el VAN incremental con respecto a g , de esta forma cada proceso limitante tendrá su propia curva y al interseccionarlas, la curva inferior que las une, representará los valores factibles del VAN debido al conjunto de limitantes. En la Ilustración 3 se muestran las curvas del VAN incremental para tres procesos restrictivos, la mina (V_m), la concentradora (V_c) y la refinería (V_r), se observa que la línea gruesa representa los valores factibles debido a las distintas restricciones, de esta forma el criterio de corte óptima será el máximo punto de esta curva (G_{mr}).

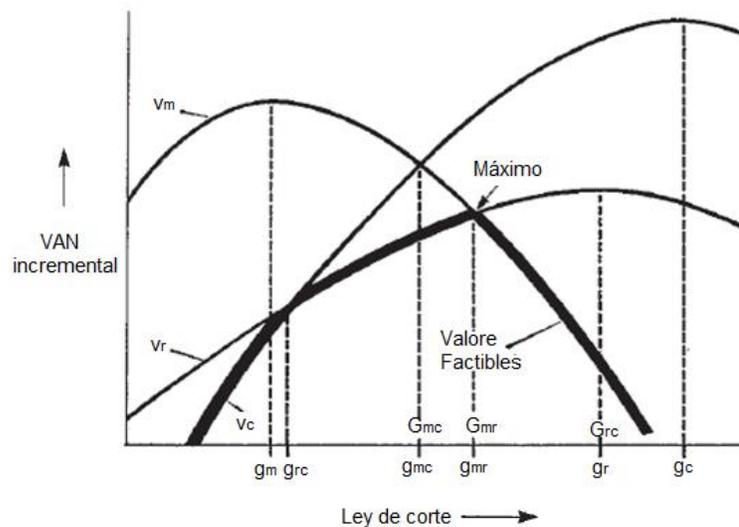


Ilustración 3: VAN diferencial en función de ley de corte

3.1.2 Aplicación de Brett King: “Cash Flow Grades”

B. King, en base a la teoría de Lane, genera una aplicación para minas que tienen materiales con distintas tasas de procesamiento.

En la minería tradicional los materiales se clasifican en un ranking de clasificación para determinar si es mineral o lastre, usando una ley de corte. Pero se requiere un ranking más complejo cuando los minerales a explotar tienen diferentes tasas de procesamiento, en otras palabras se necesita un sistema cuantitativo para decidir si es mejor procesar un poco de roca dura con alto contenido de metal o una roca blanda con una ley más baja. Este trabajo expone un método para generar un ranking de minerales con diferentes características de procesamiento.

Maximizar los flujos de caja es una componente clave en la optimización de la planificación minera para alcanzar el mejor VAN, es por esto que King propone un sistema de clasificación de roca (Cash flow grade) que maximiza estos flujos en la planificación de largo plazo, el cual se calcula como un valor por unidad de tiempo para poder así aplicarlo a horizontes tanto de largo como corto plazo.

Ecuación 1: Fórmula del método Cash Flow Grade

$$G_{CashFlow} \left[\frac{US\$}{hr} \right] = \left(ValorMineral \left[\frac{US\$}{t} \right] - ValorLastre \left[\frac{US\$}{t} \right] \right) * TasaProcesamiento \left[\frac{t}{hr} \right]$$

El ValorMineral consiste en los ingresos de los productos y todos los costos de procesamiento. El ValorLastre en la ecuación superior es negativo, ya que tiene costos, pero no ingresos. Materiales con diferentes durezas y composiciones químicas tendrán una diferente TasaProcesamiento.

Un Cash flow grade igual a cero indica que no hay diferencia en flujos de caja si mando el material a botadero o a procesamiento. En operaciones con capacidades restringidas, la ley de corte óptima siempre será positiva, en cambio el Cash flow grade puede ser cero. Materiales con el mismo ingreso y costos por tonelada, pero diferente dureza serán posicionados en el ranking separadamente debido a sus diferentes tasas de procesamiento. Además la importancia de esta ecuación es que los costos fijos no impactan en el ranking, puesto que se consideran como costos hundidos y así se puede enfocar la valorización en encontrar el mineral más beneficioso.

Para probar la habilidad del método Cash flow grade, de producir el más alto flujo de caja, se recolectó información de una operación polimetálica que tiene tasas de tratamiento dependientes del tipo de mineral, de este modo se comparan cinco formas diferentes de generar rankings de mineral.

- Cash flow grade (US\$/hr): Procedimiento ya mencionado con su correspondiente fórmula (Ecuación 1).
- Ley de cobre (%/t): Simplemente usa el criterio de ley de corte considerando solo el metal principal (cobre). Es un ranking carente, ya que no toma en cuenta los otros metales.
- Valor in-situ (US\$/t): Se calcula considerando cobre y los otros metales. No toma en cuenta las diferentes recuperaciones de procesamiento.
- Valor neto (US\$/t): Se calcula considerando el valor del cobre y otros metales, incorporando diferentes recuperaciones y costos de procesamiento.
- Valor neto con correcciones de transporte y dureza (US\$/t): Usa el valor neto antes mostrado, pero añade una corrección por distancias de transporte y dureza. Las correcciones de transporte son calculados de la diferencia en costos de transporte de mineral y lastre,

dependiendo de las distancias hacia los lugares de descarga. Los ajustes de dureza usan los rendimientos del mineral para calcular el tiempo que cada bloque requiere para ser procesado. El costo fijo de procesamiento anual fue proporcionado para cada bloque acorde a cuanto tiempo de procesamiento requiere.

Los diferentes rankings se contrastan usando una misma secuencia de extracción y se comparan a distintas capacidades de procesamiento, obteniéndose que:

- El Cash flow grade entrega el más alto flujo de caja en todas las capacidades de procesamiento. Esto implica que es un camino apropiado para clasificar materiales y maximizar el flujo de caja. Se obtuvo entre 2% y 3% adicional de material para procesar sin expandir capacidad de la planta.
- El mejor beneficio de usar Cash flow ranking ocurre con capacidades de procesamiento relativamente pequeños. Mientras la capacidad de procesamiento se incrementa, se reduce la diferencia entre los rankings, y en un caso límite, procesar todo el material no tendrá diferencias en el valor si es que no hay restricción de capacidad de procesamiento.
- Generalmente, con un modelo más detallado, el flujo de caja aumenta, es por esto que las curvas de valor neto y valor in-situ estén tan por debajo de los otros, ya que no incorporan toda la información relevante para maximizar los flujos de caja.

Cabe mencionar que mejoras más sustanciales se dan cuando se crea la secuencia de minado en función de este criterio de Cash Flow Ranking. Esto no se estudia en este trabajo, ya que tiene el objetivo de aislar y comparar claramente el valor de los distintos rankings a una misma secuencia de extracción.

3.1.3 Memoria de Ignacio Medina: “Valores de corte multivariable en planificación minera”

El autor recalca que el criterio de corte representa un elemento estratégico importante puesto que es este parámetro, el que define el plan de largo plazo, la capacidad de la mina, el material que debe ser destinado a planta o a botadero y el perfil de inversiones requeridos. Es por esto que presenta un estudio que analiza la incidencia del tipo de valor de corte en la secuencia minera de extracción y sus efectos en el valor de un proyecto.

Para este estudio se realiza planificación de largo plazo en base anual, esencialmente conceptual y estratégica y tienen un fin comparativo del comportamiento de una misma mina al planificarse bajo distintos criterios de corte y distintas configuraciones de capacidad planta-mina. Los criterios de corte y la información que consideran se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1: Descripción de valores de corte

Valor de Corte	Unidad	Nº Variables	Descripción
Ley elemento principal	%/t	1	Ley CuT
Ley Equivalente	%/t	2	Ley CuT y ley Mo
Beneficio in situ	\$/t	4	Ley CuT, ley Mo, precio Cu, Precio Mo
Beneficio Neto	\$/t	7	Ley CuT, ley Mo, precio Cu, precio Mo, Recuperación Cu, Recuperación Mo, Recuperación Cu Lixiviación.
Beneficio Neto Corregido	\$/t	12	Ley CuT, ley Mo, precio Cu, precio Mo, Recuperación Cu, Recuperación Mo, Recuperación Cu Lixiviación, Dureza(Wi), costo mina, consumo acido lixiviación y costos de venta Cu y Mo.
Ley de Flujo de Caja	\$/hr	14	Ley CuT, ley Mo, precio Cu, precio Mo, Recuperación Cu, Recuperación Mo, Recuperación Cu Lixiviación, Dureza(Wi), costo mina, consumo acido lixiviación y costos de venta Cu y Mo, rendimiento concentradora, rendimiento chancado lixiviación.

Los resultados que se obtuvieron, en diferencia promedio de VPN, con respecto a los resultados obtenidos de planificar con ley de cobre son:

- Cobre equivalente respecto a la planificación por CuT es de 0.4%.
- Beneficio In situ respecto a la planificación por CuT es de 1.6%.
- Beneficio Neto respecto a la planificación por CuT es de 5.9%.
- Beneficio Neto Corregido respecto a la planificación por CuT es de 8.4%.
- Ley de Flujo de Caja respecto a la planificación por CuT es de 9.1%.

El autor concluye que a mayor información incorporada en los criterios de corte, es posible tomar decisiones más informadas y por lo tanto mejora la secuencia y estrategias de extracción, y finalmente el VPN del proyecto. Pero también recomienda que se debe estudiar la incertidumbre que incorporan las variables adicionales consideradas en estos criterios de corte.

3.1.4 Memoria de Marcelo Vargas: “Modelo de planificación minera de corto y mediano plazo incorporando restricciones operacionales y de mezcla”

La programación lineal entera mixta es un tipo de programación matemática que utiliza algoritmos de resolución exactos, usualmente el algoritmo Bench & Bround y busca resolver un problema con variables enteras y otras racionales. La tesis de M. Vargas tiene el objetivo de generar planificación minera en un horizonte anual y trimestral con el objetivo de maximizar los finos recuperados utilizando programación lineal entera mixta para la realidad de Minera Spence, que es un rajo que produce 200 kt de cobre fino al año y tiene dos líneas de procesamiento: Lixiviación de óxidos y lixiviación de sulfuros.

Para maximizar el fino recuperado, usando programación lineal entera mixta, se define la siguiente función objetivo:

$$\sum_{\substack{dest(\ddot{u}) \\ \in [OX, SP, ROM]}} \sum_{t=1}^T CU(\ddot{u}) \Delta p(\ddot{u}, t) + Lcu(OX) \cdot p(OX, t) + Lcu(SP) \cdot p(SP, t)$$

A continuación se explican las variables de esta función:

- T: Periodo total a considerar en el horizonte de planificación.
- $dest(\ddot{u})$: Posibles destinos del bloque \ddot{u} , los cuales para Minera Spence son lixiviación de óxidos (OX), lixiviación de sulfuros (SP) y ROM.
- $CU(\ddot{u})$: Cantidad de fino del bloque de coordenadas \ddot{u} .
- $\Delta p(\ddot{u}, t)$: Variable binaria que dice si el bloque \ddot{u} es procesado (igual a uno) o no (igual a cero) en el periodo t.
- $Lcu(OX)$: Cantidad de finos de los stocks de óxidos, en este ejercicio se tienen stock de óxidos con una ley media conocida.
- $Lcu(SP)$: Cantidad de finos de los stocks de sulfuros, en este ejercicio se tienen stock de sulfuros con una ley media conocida.
- $p(OX, t)$: Variable binaria que dice si se remaneja (igual a uno) o no (igual a cero) en el periodo t desde los stocks de óxidos.
- $p(SP, t)$: Variable binaria que dice si se remaneja (igual a uno) o no (igual a cero) en el periodo t desde los stocks de sulfuros.

Se observa que al maximizar la función objetivo se sabrá para cada periodo qué extraer (óxido o sulfuros), desde donde (coordenadas u), hacia qué destinos y cuánto se extrae. Esta solución debe cumplir con las siguientes restricciones, que no son exclusivas de la realidad de Minera Spence sino que deben cumplirse en la industria en general.

- Cada bloque puede ser minados y procesado una sola vez.
- Solo los bloques minados pueden ser procesados.
- Los stocks son limitados, por lo que el remanejo no puede exceder el tonelaje de los stocks.
- No se puede exceder la capacidad de movimiento mina ni la capacidad de procesamiento.
- Se deben respetar las precedencias verticales, en otras palabras, para extraer un bloque se deben haber extraído previamente los bloques arriba de éste que pertenezcan a su arco de presidencia.
- Igualmente debe respetarse las precedencias horizontales, a lo cual en este problema se impone un periodo máximo para extraer un bloque y luego extraer el que lo precede.
- Debe respetar los límites de mezcla, los cuales son porcentajes máximos de compuestos no deseados al momento de procesar.
- Se debe saturar la capacidad de transporte, de esta forma se impone como mínimo la capacidad máxima de transporte multiplicado por un factor que es menor o igual a uno y depende de la disponibilidad mecánica programada, entre otras cosas.

Actualmente las capacidades computacionales no permiten resolver este tipo de problemas en un tiempo razonable para minas de la magnitud de Spence, es por ello que en la tesis de M. Vargas se propone resolver el problema utilizando las siguientes heurísticas de resolución:

- Herramienta de agregación: Propone re-bloquear en bloques de mayor tamaño (MRU) y así disminuir la cantidad de éstos y por lo tanto la cantidad de variables del problema. Para ello se desarrolló una herramienta capaz de generar macro-bloques irregulares (no cúbicos) que agrupa según litología a un volumen constante.
- Estructura de grafos: debido a la forma irregular de los nuevos macro bloques, se usa una herramienta que utiliza la metodología de estructura de grafos para ordenar las precedencias verticales y horizontales de modo de respetar los ángulos de talud y la conexidad geométrica de la solución a nivel de banco.
- Heurística de ventanas: es una técnica en el cual se resuelve el problema de secuenciamiento para los primeros $T' < T$ períodos, luego se fija parte de esta solución y se resuelve para los siguientes T' períodos sin fijar, repitiendo iterativamente hasta haber resuelto para el horizonte completo. Esto disminuye los tiempos de cálculo pero no garantiza la optimalidad de la solución.

Los equipos utilizados en el trabajo de M. Vargas fueron, para el horizonte trimestral un Notebook con procesador Intel Xeon CPU 1.6 GHz y 3 Gb de memoria RAM, y para el horizonte anual un Cluster de 4 procesadores Intel Xeon CPU 1.6 GHz y 4 Gb de memoria RAM.

Los resultados de aplicar programación lineal entera mixta, fueron:

- En el horizonte trimestral se obtiene 37% de cobre fino adicional con respecto a la planificación manual en un tiempo de cálculo de 20 minutos y con un gap menor al 5% con respecto al óptimo real.
- En el horizonte anual se incrementa en un 20% el cobre fino, esta solución se obtuvo en 6 horas y sin superar el 5% de gap con el óptimo real.

Si bien estos resultados al usar la heurística de agregación generan geometrías suavizadas, no son en su totalidad operativizadas, por lo tanto M. Vargas propone utilizar estas soluciones como una guía para la planificación de corto plazo, de modo que orienten la secuencia de extracción operativa.

Finalmente el autor resalta las ventajas de utilizar la programación lineal entera mixta en horizontes de corto plazo, debido a que genera de forma automática planes que incorporan la realidad geometalúrgica y reflejan las limitantes operacionales y de mezcla, periodo a periodo.

3.1.5 Morales C. y Rubio E: "Development of a mathematical programming model to support the planning of short-term mining"

Se propone resolver problemas de programación lineal entera mixta, usando ciertas heurísticas para que pueda ser posible llevar a la práctica este método en tiempos razonables de cálculo.

El estudio tiene por objetivo secuenciar la extracción bloque a bloque en vez de usar la metodología convencional de fase-banco.

La metodología de planificación fase-banco consiste en que después de definir las fases, estas se subdividen en grupos de bloques al mismo nivel vertical (mismo banco) con el fin de agendarlos sin que excedan las limitaciones de capacidades.

En este estudio se hicieron ciertas simplificaciones tales como:

- Se asume solo un destino de procesamiento.
- Se tiene solo una restricción de capacidad de recursos.

Las heurísticas que propone son:

- Algoritmo de multiplicador crítico (ACM): Solo es posible de utilizar cuando se tiene solo una restricción para los recursos. Consiste en calcular la solución óptima del problema de programación lineal con la complejidad de un algoritmo pseudo paramétrico de forma logarítmica, lo cual simplifica bastante el problema.
- TopoSort: Consiste en generar una solución factible encontrando una buena secuencia de extracción aprovechando los arcos de precedencia previamente definidos para un modelo de bloques, obteniendo así ordenamientos topológicos. Para esto es necesario darle un peso a cada bloque, donde los bloques con altos pesos son los que son extraídos tempranamente en la secuencia, en este estudio se escogió el tiempo esperado de extracción como el peso de cada bloque, pero cabe mencionar que dependiendo del criterio de peso que se escoja se obtendrán distintas soluciones.
- Heurística de búsqueda local: De forma iterativa se escoge la solución integral factible para un conjunto específico de bloques, donde en cada iteración se busca mejorar el valor de la función objetivo, si esto no es posible entonces se busca la solución en otro set de bloques y se vuelve a iterar. Esto no cambia la estructura del problema, lo que hace es explorar diferentes vecindades con el objetivo de evadir el óptimo local.

Los resultados que obtuvieron para un horizonte de 15 años en yacimientos que no superan los 4.3 millones de bloques, utilizando un equipo Linux 2.6.9 con 32 GB de RAM y dos procesadores Quad-Core Intel Xeon E5420, fueron:

- Usando solo la heurística ACM el resultado óptimo se obtiene en minutos, pero esto es solo aplicable cuando se tiene una restricción de recursos.
- Usar TopoSort es muy rápido y se obtiene soluciones muy buenas (dentro del 6% de optimalidad).
- Al combinar TopoSort y la heurística de búsqueda local durante una hora se obtienen soluciones con optimalidades del 3 a 4%.

3.1.6 Smith M. L.: “Optimizing short-term production schedules in surface mining: Integrating mine modeling software with AMPL/CPLEX”

El autor recalca el engorroso, repetitivo y poco productivo procedimiento que es la planificación manual de corto plazo, debido a lo difícil que es obtener soluciones que cumplan con todas las

restricciones de una operación, entre ellas las restricciones de mezcla, evitar fluctuaciones excesivas en la calidad de alimentación a las plantas concentradoras, etc.

El gran problema de la programación lineal entera mixta, es la parte entera, debido a que obliga a usar algoritmos como Branch and Bound para su solución, lo cual requiere de increíbles esfuerzos computacionales.

Para planificar en un horizonte de corto plazo usando programación lineal entera mixta, el autor sugiere seleccionar una cantidad razonable de bloques superficiales, de modo de ignorar los bloques profundos que son imposibles de extraer en el horizonte de corto plazo y de esta manera reducir la cantidad de bloques y por lo tanto la cantidad de variables para la resolución. El set de bloques escogido es llevado a un archivo ASCII el cual fácilmente se puede convertir a un data file AMPL, el cual usa un lenguaje de modelamiento para programación matemática que facilita la aplicación de métodos de optimización.

Antes del desarrollo de lenguajes de programación como AMPL, aplicar programación lineal entera mixta era una tarea laboriosa con muchas líneas de código para poder lograr definir el problema enteramente. La función de AMPL es facilitar el desarrollo del modelo usando notación algebraica que permite la producción de modelos comprensibles y eficientes que son fácilmente depurables y modificables. Por lo tanto AMPL traduce el modelo en un formato que es legible por softwares de optimización, como por ejemplo Cplex, que es el usado en este estudio.

El autor recalca la importancia que debe tener la integración entre ambos softwares (AMPL y el software optimizador), ya que si la integración entre ambos es pobre, el tiempo que se perderá transfiriendo y llevando al formato la información, puede perjudicar la productividad que pueden ganar los planificadores al usar programación lineal entera mixta.

Para el agendamiento dinámico multi periodo con complejas restricciones, se asume imposible optimizar usando programación lineal entera mixta, debido a las capacidades computacionales actuales, pero el autor dice que con el aumento de la rapidez en los equipos y con la capacidad de tener arquitecturas de CPU paralelas, muy prontamente va a ser factible.

Por mientras que las capacidades computacionales van mejorando, el autor sugiere el uso de heurísticas para planificar en el corto plazo usando programación lineal entera mixta, dentro de estas destaca además de reducir el número de bloques, relajar la optimalidad (tener un gap aceptable con respecto al optimo real).

3.1.7 Análisis Bibliográfico

El estudio de la presente memoria tiene el objetivo de evaluar el efecto de aplicar Ore Value Ranking en la planificación de corto plazo, sin modificar la secuencia que se obtiene tradicionalmente de forma manual usando como criterio de corte la ley de cobre, sino que viendo exclusivamente el efecto de cómo se destinan los materiales. Es por esto que a continuación se compara la metodología OVR y la programación lineal entera mixta en el contexto de la planificación de corto plazo.

Las ventajas que presenta la programación lineal entera mixta con respecto a la metodología Ore Value Ranking son:

- La programación lineal entera mixta obtiene de forma automática planes de corto plazo que cumplen con las restricciones geometalúrgicas y de mezcla requeridos.
- OVR explota de forma golosa, ya que va desde las mejores a menores leyes en forma de ranking, lo cual en el largo plazo no es sustentable, ya que agota de manera más rápida las reservas, en cambio la programación lineal entera mixta si está bien coordinada con la estrategia de largo plazo es una metodología sustentable.
- El control de penalidades en OVR ocurre solo al usar la variable US\$/t, ya que se castiga el beneficio de procesar bloques con presencia de penalizables, en cambio esto no ocurre al usar la variable CuRec/t, esto es una desventaja frente a la programación lineal entera mixta, debido a que esta considera en sus restricciones de programación los límites de mezcla.

Las desventajas que presenta la programación lineal entera mixta con respecto a la metodología Ore Value Ranking son:

- Debido a las capacidades computacionales actuales, la única forma de obtener soluciones de la programación lineal entera mixta en tiempos razonables, es usando heurísticas como el uso de técnicas de agregación de bloques lo cual hace que se tenga un peor control de mezclas al perder selectividad.
- Ore Value Ranking cuestiona el criterio de corte convencional, incorporando mayor información a este y permitiendo tomar decisiones más informadas, este concepto es de mucha utilidad, ya que permite visualizar las fases, bancos y bloques que tienen realmente el mejor valor y tomar buenas resoluciones.
- La rapidez de respuesta que necesita la planificación de corto plazo, especialmente en los horizontes mensuales y semanales, hace prácticamente imposible el uso de programación lineal entera mixta no solo por la gran cantidad de tiempo de cálculo que este requiere sino porque se debe programar los imprevistos que sufre constantemente el sector de operaciones.

Teóricamente un plan de OVR y un plan de programación lineal entera mixta podrían coincidir si es que se tiene un yacimiento homogéneo, debido a que al tener leyes y características similares a lo largo del yacimiento, no es necesario considerar criterios de corte que incorporen más información que la ley.

Según los estudios recopilados, se tienen los siguientes rangos de mejora reportados:

- El paper de Cash Flow Grade muestra un estudio con mejoras entre 2% y 3% adicional de cobre fino sin modificar la secuencia de extracción original de largo plazo.
- La memoria de Ignacio Medina obtuvo mejoras, con respecto a planes con criterio ley de cobre, de 9.1% en el VAN usando el criterio ley de flujo de caja, pero modificando la secuencia de extracción en función de este criterio.
- El estudio de Marcelo Vargas muestra que utilizar programación lineal entera mixta incrementa en un 20% el cobre fino para un plan de corto plazo (anual) en contraste con un plan elaborado de forma manual.

- Un análisis realizado en Minera Escondida expone mejoras de un 1% en el VAN del plan de 10 años aplicando el criterio US\$/t de OVR, pero sin modificar la secuencia de extracción original.

La razón por la cual el rango de mejora de OVR mostrado en el estudio de largo plazo de Escondida es menor que el propuesto por el criterio de Cash Flow Grade se debe a que este último considera información adicional, que es la tasa de procesamiento, además de que el mismo paper propone que a mayores capacidades de tratamiento, se tiene menores rangos de mejora y Minera Escondida tiene capacidades colosales que escapan de la media de la industria. Se podrían esperar mejoras más sustanciales si es que se modificara la secuencia de extracción usando OVR, de este modo se podrían esperar mejorías como las expuestas en el estudio de Ignacio Medina, aunque es importante mencionar que los rangos expuestos en los distintos estudios son de casos específicos, por lo que los incrementos esperados dependen de cada operación minera.

Las razones principales de porqué se decide utilizar la metodología Ore Value Ranking para el presente estudio se debe a que en el caso de Minera Escondida el área de planificación de corto plazo se encarga de generar planes anuales, mensuales y semanales, pero debido a las problemáticas imprevistas con las que se enfrenta día a día el área de operaciones, tales como inundaciones en los rajos, eventos climáticos, mantención de equipos no programada, etc., se hace inviable utilizar programación lineal entera mixta para los horizontes mensuales y semanales, no solo porque estos eventos conllevan a que se tenga que programar restricciones adicionales en el momento, sino que se necesitan respuestas rápidas para paliar los problemas en operaciones, como por ejemplo cuando falla una pala, actualmente el área de planificación de corto plazo, genera rápidamente un plan B de distribución de palas, únicamente observando las mejores leyes y así mitigar la disminución de finos, esta metodología funciona como un ranking, de esta forma OVR sería la mejor opción en estos casos, donde en vez de mirar las mejores leyes se verían la ubicación de los mejores valores de CuRec/t o US\$/t. Otra razón es que para poder utilizar programación lineal entera mixta en una operación tan colosal como Minera Escondida, que no solo tiene una cantidad de bloques enorme, sino que tiene muchos posibles destinos para cada bloque, es necesario el uso de heurísticas como la agregación de bloques lo cual conlleva a un mal control de mezclas y esto se opone a la estrategia que tiene Minera Escondida, sobre todo con los elementos penalizables de los que se quiere tener mucho control en el futuro.

Al utilizar Ore Value Ranking en el plan anual de Minera Escondida, sin modificar la secuencia de extracción original sino simplemente destinando de forma más informada, se esperan rangos de mejora cercano al 1% en el VAN, el cual es el valor obtenido en el estudio realizado para el horizonte de largo plazo utilizando el criterio US\$/t.

3.2 Antecedentes del proyecto

Esta sección tiene por objetivo dar a conocer, de forma anticipada, la información importante a tener en cuenta para comprender el contexto del estudio presentado. La primera parte son los antecedentes de la empresa y como funciona a grandes rasgos en la actualidad, la segunda parte expone el estado de los estudios de Ore Value Ranking en Minera Escondida antes de la presente memoria.

3.2.1 Antecedentes de la empresa

El yacimiento de Minera Escondida tiene una gran diversidad litológica, la cual se puede agrupar en cinco grupos de material:

- Sulfuros secundarios: Son sulfuros que se encuentran en la zona enriquecida bajo el nivel freático, específicamente en este yacimiento se caracteriza por tener alta presencia de minerales de covelina y calcosina.
- Sulfuros primarios: Son sulfuros mucho más profundos a la zona de enriquecimiento, presentando la mineralogía original de la alteración hidrotermal, en este yacimiento se caracteriza por la alta presencia de calcopirita y pirita.
- Parcial lixiviable: Son sulfuros secundarios que debido a influencias meteorológicas, se encuentran de forma natural parcialmente lixiviados.
- Óxidos: Material que se encuentra superficialmente, en la zona de oxidación, presentando para este yacimiento alta presencia de minerales oxidados de cobre, como malaquita, crisocola, etc.
- Mixtos: Material que se encuentra en la zona transicional entre óxidos y sulfuros, presentando importante presencia de minerales de ambas zonas.

Minera Escondida tiene tres destinos de procesamiento, los cuales se detallan a continuación:

- Concentradora: A grandes rasgos involucra chancado y molienda de la roca y su posterior concentración en celdas de flotación, para finalizar en etapas de espesamiento. Es el proceso más costoso, pero con las mejores recuperaciones. Procesa solo sulfuros, tanto primarios como secundarios, entregando como producto el concentrado que comercializa la operación.
- Lixiviación de Óxidos: Este proceso involucra chancado, pero no molienda. Es el único destino que procesa óxidos y material mixto entregando como producto cátodos de cobre, luego de pasar por las etapas de extracción por solvente y electro obtención. En la lixiviación de óxidos la roca chancada se dispone en pilas dinámicas, donde excedido su tiempo de residencia, se remueve y se repone con roca nueva.
- Lixiviación de Sulfuros: Este destino no involucra reducción de tamaño de la roca, por lo tanto se apila con la granulometría resultante de la tronadura y se dispone en pilas estáticas. Es el proceso que por lejos tiene los costos más bajos, su finalidad es procesar sulfuros de menor ley y material parcial lixiviable, entregando como producto cátodos de cobre, luego de pasar por las etapas de extracción por solvente y electro obtención.

Además de los destinos de procesamiento, Escondida cuenta con otros cuatro destinos:

- Stock de concentradora.
- Stock de lixiviación de sulfuros.
- Stock de lixiviación de óxidos.
- Botadero.

Actualmente en Minera Escondida se define como ley de corte marginal 0.3% de ley de cobre, por lo tanto cualquier material, ya sea óxido, mixto, sulfuro o parcial, al tener una ley inferior a este valor es catalogado inmediatamente como lastre.

Planificación de mediano plazo se encarga de la planificación táctica de Minera Escondida, su principal entregable es el plan quinquenal, el cual se alinea con la estrategia del plan de diez años entregado por planificación de largo plazo, y entrega la dirección a planificación de corto plazo. El plan quinquenal se emite todos los años, entregando las directrices de los próximos cinco años fiscales.

El área de planificación de corto plazo se encarga de generar planes operacionales con un horizonte máximo de dos años, estos planes se adhieren a lo exigido en ley, tonelaje y a las fases definidas por el plan quinquenal. El principal entregable de esta área es el plan de dos años fiscales, el cual se elabora con softwares que funcionan con sistema de ranking debido a la rapidez y eficiencia que se requiere en el nivel operacional. El plan de dos años está planificado mensualmente y entrega las directrices a planificación semanal que coordina el funcionamiento de la mina, disposición de camiones, palas, polígonos de tronadura, agendamiento de tronaduras, etc.

3.2.2 Antecedentes de OVR

Minera Escondida tiene interés en evaluar el beneficio y fino que aportan los criterios CuRec/t y US\$/t, los cuales se detallan a continuación:

- CuRec/t: Es la ley de cobre castigada por la recuperación en los distintos procesos, la Ilustración 4 muestra un esquema de este criterio, el cual muestra que para un mismo bloque de material se tendrán tres valores de cobre recuperado, uno a concentradora que será la multiplicación de la ley por la recuperación de ese bloque en la planta y los otros valores serán a lixiviación de sulfuros y lixiviación de óxidos resultantes de la multiplicación de la ley por las recuperaciones en esos procesos respectivos. Ore Value Ranking es una metodología que ordena en forma de ranking los valores de este criterio, de manera que los valores más altos de CuRec/t a concentradora se destinen allí hasta copar la capacidad de la planta, luego del material restante se destine los mejores CuRec/t de lixiviación de sulfuros a estas pilas, la misma lógica resulta para destinar a lixiviación de óxidos. Al usar OVR con este criterio se obtiene mayor cantidad de fino que el que se obtendría usando solo la ley de cobre.
- US\$/t: Es la diferencia de beneficios, en dólares por tonelada, de definir un bloque como mineral (valor mineral) menos mandar ese mismo bloque al botadero (valor lastre). En la Ilustración 5 se muestra la forma de calcular este criterio, donde el valor del mineral incorpora los ingresos y costos de venta, procesamiento y de mina, en cambio el valor del lastre solo es el costo de mina de enviar el bloque al botadero. Una ventaja de este criterio es que el costo de venta se puede hacer variable con elementos menores y ley de concentrado, de manera de que los bloques con altos contenidos de elementos penalizables (As, Zn, etc.) sean castigados en valor, en cambio los que tengan alto contenido de elementos pagables (oro, molibdeno, etc.) sean premiados en valor. Otra ventaja es que los

costos de mina se pueden hacer variables con los tiempos de ciclo, de modo que los bloques más profundos y los destinos más lejanos sean castigados en valor. Siguiendo la misma lógica de ranking explicada en CuRec/t, se destinan los bloques. Este criterio entrega mayor beneficio económico que los demás criterios, ya sea CuRec/t o la ley.



Ilustración 4: Esquema de cálculo de CuRec/t



Ilustración 5: Esquema de cálculo de US\$/t

En un futuro, cuando Minera Escondida tenga problemas de alta cantidad de roca dura y el tiempo de residencia en las plantas concentradoras se vuelva crítico, entonces se evaluarán los criterios CuRec/h y US\$/h los cuales no son más que los criterios CuRec/t y US\$/t multiplicados por la tasa de procesamiento en la planta, tal como muestra las Ecuaciones 3 y 4. De esta forma se usará la misma lógica anterior pero con la diferencia que para destinar a concentradora se escogerán los mejores CuRec/h o US\$/h.

Ecuación 3: Fórmula de cálculo de CuRec/h

$$\left[\frac{\text{CuRec}}{\text{h}} \right] = \left[\frac{\text{CuRec}}{\text{t}} \right] * \text{TasaProcesamiento} \left[\frac{\text{t}}{\text{hr}} \right]$$

Ecuación 4: Fórmula de cálculo de US\$/h

$$\left[\frac{\text{US\$}}{\text{h}} \right] = \left[\frac{\text{US\$}}{\text{t}} \right] * \text{TasaProcesamiento} \left[\frac{\text{t}}{\text{hr}} \right]$$

Usando el criterio CuRec/t se tienen tres valores para un mismo bloque, debido a los tres destinos de procesamiento, en cambio el criterio US\$/t tienen seis valores para un mismo bloque, los cuales son los tres destinos de procesamiento y los tres stocks correspondientes.

Si bien el criterio US\$/t posee mayor información para finalmente maximizar el VAN, este aporta incertidumbre, ya que incorpora variables como el precio del cobre y el costo del combustible, las cuales son más bien inciertas en el tiempo. En cambio la variable CuRec/t tiene muy poca incertidumbre, ya que en Minera Escondida se lleva un buen control y actualización constante de las variables de leyes y recuperación, donde la recuperación es resultado de un modelo probado que depende de la mineralogía y granulometría de un material.

Antes de la presente memoria, ya se encontraban disponibles en Minera Escondida, un set de tres scripts los cuales tienen la finalidad de incorporar a los modelos de bloques las variables OVR (CuRec/t, CuRec/h, US\$/t y US\$/h) por medio del software Vulcan. Estos tres scripts se detallan a continuación:

- Script de Modelo de Productividad: Es el primer script en aplicarse y tiene la finalidad de calcular los tiempos de ciclo para cada bloque en cada destino a través de un modelo matemático.
- Script de Costos: Define como costos unitarios fijos todos los costos considerados en el beneficio, excepto los costos de mina, los cuales los calcula en función de los tiempos de ciclo previamente definidos con el script de modelo de productividad.
- Script de Valorización: Es el último en aplicarse y tiene el objetivo de calcular para cada bloque las variables CuRec/t, CuRec/h, US\$/t y US\$/h.

Con anterioridad a la presente memoria, Minera Escondida hizo un estudio de aplicar el criterio US\$/t al plan de diez años sin modificar la secuencia original, solamente destinando mejor, obteniendo un 1% adicional a su VAN.

4. DESARROLLO

4.1 Actualización de modelo de productividad

Minera Escondida cuenta con un software de simulación que entrega los tiempos de ciclo de los camiones mineros dependiendo de la ubicación del bloque en la mina y hacia qué destino se envía. Este programa computacional se utiliza para estimar los tiempos de ciclo de transporte en los distintos planes, ya sea quinquenal, anual e incluso el de diez años.

El script de tiempos de ciclo posee un modelo matemático que arroja el tiempo de ciclo en función de:

- Fase a la cual pertenece el bloque.
- Banco en el cual se encuentra.
- Destino al que se envía.

Tener un modelo matemático que solo dependa de esos tres ítems, se debe a que esta información se encuentra directamente en el modelo de bloques, permitiendo un cálculo rápido, simple y muy cercano a la realidad.

Para poder actualizar anualmente el modelo matemático, se utiliza el software de simulación con las fases del plan quinquenal. De esta manera los tiempos de ciclo se grafican en función de los tres ítems antes mencionados, obteniéndose por ejemplo que para la fase llamada PL1 sus tiempos de ciclo a botadero se comportan como muestra la Ilustración 6.

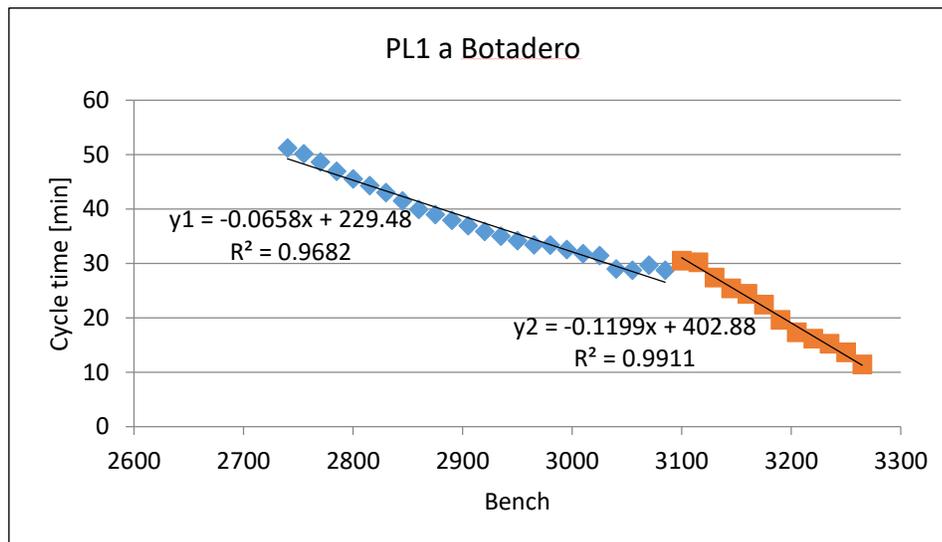


Ilustración 6: Comportamiento de tiempos de ciclo en fase PL1

Se puede apreciar en la Ilustración 6, que el comportamiento del tiempo de ciclo desde la fase PL1 al botadero se puede ajustar a dos rectas, donde bajo el banco 3100 el tiempo de ciclo queda

representado por la función lineal y_1 , en cambio sobre el banco 3100 el comportamiento se ajusta a la función lineal y_2 . Siguiendo con esta misma lógica se crean los modelos matemáticos para cada una de las fases en cada uno de los destinos, como son doce fases y siete destinos, entonces se tienen ochenta y cuatro modelos matemáticos que arrojan el tiempo de ciclo dependiendo del banco en que se encuentra.

Que exista un cambio de pendiente entre las rectas y_1 e y_2 se debe a que posiblemente en el banco 3100 haya una conexión inter-rampa o que desde ese banco se asigne otra zona de vaciado, entre otras posibles explicaciones.

Esta forma de modelar los tiempos de ciclo resulta en valores muy cercanos a los de la data obtenida por el software simulador, con muy poca varianza por año, lo cual se aprecia en la Tabla 2 y en la Ilustración 7 que muestra los tiempos de ciclo obtenido con los modelos en comparación con los de la data.

Tabla 2: Varianza de modelo tiempos de ciclo en el tiempo

Año	Varianza [min]
2017	0.008
2018	0.013
2019	0.002
2020	0.030
2021	0.044
2022	0.051

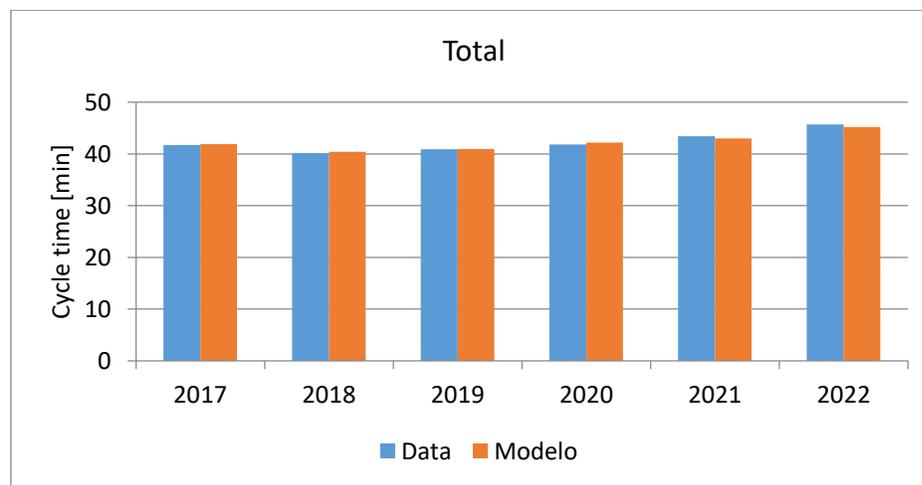


Ilustración 7: Comparación de tiempos de ciclo de data y modelo

Además de ajustarse muy bien en el horizonte temporal, los tiempos de ciclo coinciden muy bien a la data por fase que arroja el software de simulación, pudiendo compararlos gráficamente en la Ilustración 8 que muestra un gráfico de dispersión entre los tiempos de ciclo del modelo y los de la data para cada fase en cada uno de los años, observándose que los datos se ajustan muy bien a la recta $Y=X$, concluyendo que el modelo es una muy buena forma de representar la data.

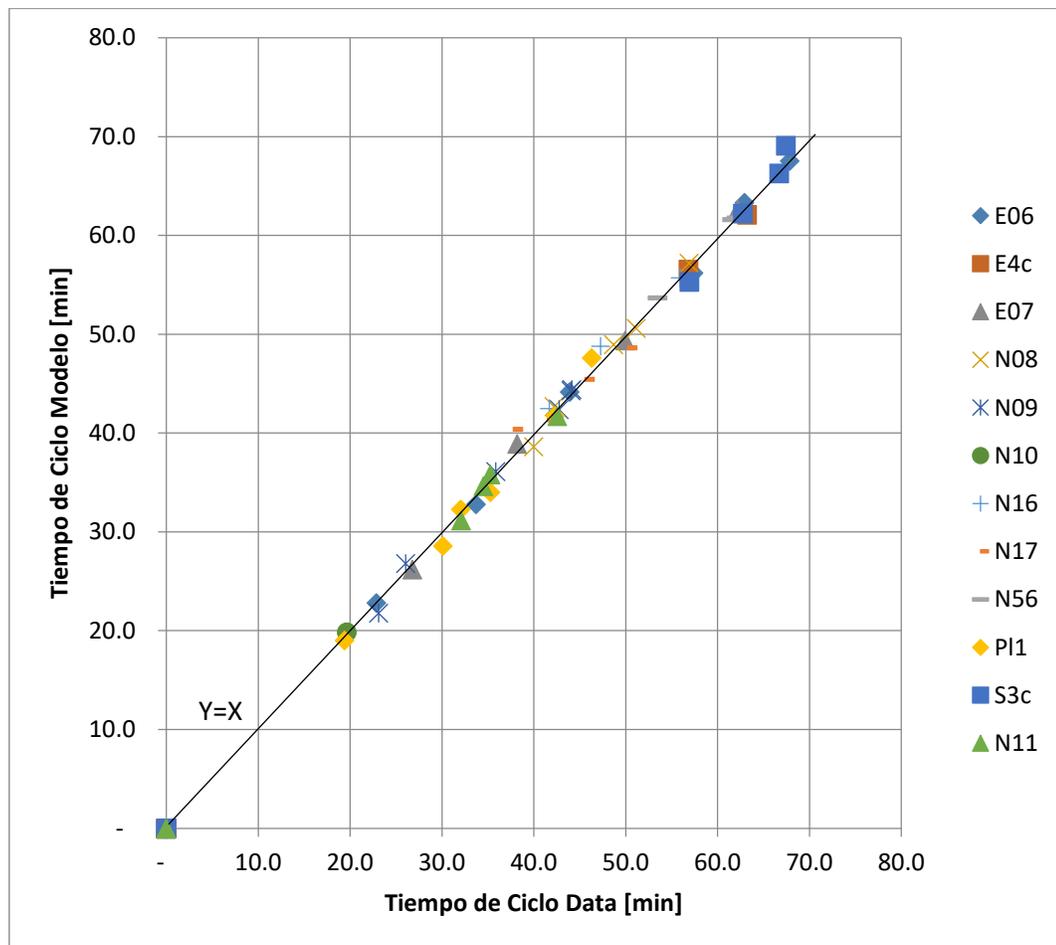


Ilustración 8: Gráfico de dispersión de tiempos de ciclo entre modelo y data

Una vez obtenidos todos los modelos matemáticos se procede a actualizar el script de tiempos de ciclo, donde usando como ejemplo lo visto en la Ilustración 6, la lógica del script para la fase PL1 a botadero sería como se muestra en la Ilustración 9.

```

Si Fase = PL1 entonces
    Si Banco <= 3100 entonces
        Tiempo_ciclo_botadero= -0.0658 * Banco + 229.48
    Sino
        Tiempo_ciclo_botadero= -0.1199 * Banco + 402.88

```

Ilustración 9: Ejemplificación de script de modelo de productividad

4.2 Actualización de costos

El script de costos valoriza, en dólares por unidad de masa el costo que tiene cada proceso desde que se perfora la roca en la mina hasta que se venden los productos de cobre. Éstos se clasifican en las siguientes categorías:

- Costo Mina [US\$/t]
- Costo Concentradora [US\$/t]
- Costo Lixiviación de Óxidos [US\$/t]
- Costo Lixiviación de Sulfuros[US\$/t]
- Costo de Venta [US\$/lb]

El costo mina considera todos los costos desde la perforación de la roca hasta que llega a su destino (Concentradora, Lixiviación de Óxidos, Lixiviación de Sulfuros, Botadero, Stock de Concentradora, Stock de Lixiviación de Óxidos o Stock de Lixiviación de Sulfuros). Pero como todos estos costos se consideran como costos unitarios fijos, a excepción del costo de transporte que varía en base a la productividad modelada, entonces el valor del costo mina variará según el tiempo de ciclo desde el bloque en la mina hasta el destino, de este modo se tendrá siete costos de mina para cada bloque, ya que se tienen siete posibles destinos:

- Costo mina a Concentradora.
- Costo mina a Lixiviación de Óxidos.
- Costo mina a Lixiviación de Sulfuros.
- Costo mina a Stock de Concentradora.
- Costo mina a Stock de Lixiviación de Óxidos.
- Costo mina a Stock de Lixiviación de Sulfuros.
- Costo mina a Botadero.

Para el costo de concentradora se toman en cuenta los costos desde que la roca llega al proceso de conminución hasta que el concentrado se filtra en el puerto.

En el costo de lixiviación de óxidos se valorizan los costos desde que la roca llega al chancador de óxidos hasta que se obtiene el producto lixiviado.

El costo de lixiviación de sulfuros considera los costos desde que llega la roca a las pilas hasta que se lixivian, este no considera conminución, ya que en este proceso la roca viene directamente desde la mina a ser apilada.

El costo de venta, a excepción de los demás costos que se expresan en dólares por tonelada, éste se registra en dólares por libra, ya que son cargos que se le aplican a las libras de cobre producidas, mientras que los costos anteriormente mencionados se aplicaban a cada tonelada de roca procedente de la mina. Dependiendo del proceso se tienen distintos tipos de costos de venta:

- Costo de venta de concentradora.
- Costo de venta de lixiviación de óxidos.
- Costo de venta de lixiviación de sulfuros.

El costo de venta de concentradora considera como cargos, los costos de TC, RC y Flete.

Tanto el costo de venta de lixiviación de óxidos, como el costo de venta de lixiviación de sulfuros, consideran los procesos de extracción por solvente, electro obtención, flete, entre otros.

Finalmente todos los costos considerados como inputs para el script, con sus unidades respectivas, se reflejan en la Tabla 3.

Tabla 3: Inputs de costos de script de costos

Categoría		Costo	Unidad
Costo Mina		Perforación	US\$/t
		Tronadura	US\$/t
		Carguío	US\$/t
		Transporte	US\$/h
		Otros	US\$/t
Costo Concentradora		Conminución	US\$/t
		Tratamiento Concentradora	US\$/t
		Filtrado	US\$/t
		Agua	US\$/t
Costo Lixiviación de Óxidos		Conminución	US\$/t
		Lixiviación	US\$/t
		Agua	US\$/t
Costo Lixiviación de Sulfuros		Lixiviación	US\$/t
		Agua	US\$/t
		Capital de sustento	US\$/t
Costo de Venta	Concentradora	TC	US\$/lb
		RC	US\$/lb
		Flete	US\$/ton_con_húmedo
	Lixiviación de Óxidos	Extracción por Solvente	US\$/lb
		Electro Obtención	US\$/lb
		Flete	US\$/lb
		Otros	US\$/lb
	Lixiviación de Sulfuros	Extracción por Solvente	US\$/lb
		Electro Obtención	US\$/lb
		Flete	US\$/lb
		Otros	US\$/lb

En el plan de diez años es donde se actualizan los costos de la Tabla 3, mostrando el detalle anual, por eso es que cada vez que se emite este informe (una vez al año) los planificadores de corto plazo deberían tomar como inputs de costos, los valores de la Tabla 3 para los dos primeros años de este plan de diez años.

Como el valor de los costos se actualiza una vez al año, el script de costos debe hacerlo también, sin cambiar su lógica de programación, sino que simplemente cambiando los valores de los inputs desplegados en la Tabla 3.

Minera Escondida no posee un informe de rápido acceso que despliegue los costos de su plan de diez años, por lo que se recomienda que para temas de eficiencia de actualización del script de costos a utilizar en la metodología Ore Value Ranking, se cuente con uno.

4.3 Generación de curvas de beneficio

Una vez actualizados los scripts se procede a aplicarlos con el software VULCAN usando el modelo de bloques que utiliza el área de planificación de mediano plazo. El resultado de esto es que el modelo de bloques queda con información adicional para cada bloque, dentro de la cual destaca:

- Costo de Mina a Concentradora.
 - Costo de Mina a Lixiviación de Óxidos.
 - Costo de Mina a Lixiviación de Sulfuros.
 - Costo de Mina a Stock de Concentradora.
 - Costo de Mina a Stock de Lixiviación de Óxidos.
 - Costo de Mina a Stock de Lixiviación de Sulfuros.
 - Costo de Mina a Botadero.
 - Costo en Concentradora.
 - Costo en Lixiviación de Óxidos.
 - Costo en Lixiviación de Sulfuros.
 - Costo de Venta en Concentradora.
 - Costo de Venta en Lixiviación de Óxidos.
 - Costo de Venta en Lixiviación de Sulfuros.
- CuRec/t en Concentradora.
 - CuRec/t en Lixiviación de Óxidos.
 - CuRec/t en Lixiviación de Sulfuros.
 - US\$/t en Concentradora.
 - US\$/t en Lixiviación de Óxidos.
 - US\$/t en Lixiviación de Sulfuros.
 - US\$/h en Concentradora.
 - CuRec/h en Concentradora.
- Variables de Ore Value Ranking

De toda esta información adicional, solamente es variable bloque a bloque, los costos de mina y las variables de Ore Value Ranking, ya que cómo se dijo anteriormente, los costos de procesamiento y de venta se consideran costos unitarios fijos e iguales entre todos los bloques.

Una vez obtenido este nuevo modelo de bloques con los scripts, se generan curvas de beneficio, las cuales son gráficos que muestran el comportamiento del beneficio por tonelada en función de la ley de cobre, su forma de cálculo se muestra en las Ecuación 5 y 6, donde B_p es el beneficio de procesar el mineral y B_e es el beneficio de destinar el material a botadero.

Ecuación 5: Fórmula de beneficio de procesamiento

$$B_p \left[\frac{\text{US\$}}{t} \right] = (\text{Precio} - \text{CostoVenta}) * \text{LeyCu} * \text{Recuperación} * 2204.62 - (\text{CostoMina} + \text{CostoProcesamiento})$$

Ecuación 6: Fórmula de beneficio de lastre

$$B_e = -\text{CostoMina a Botadero}$$

Es importante mencionar que este beneficio tiene unidades en dólares por tonelada, pero su cálculo es diferente al criterio OVR, ya que como se puede apreciar en la Ilustración 5 de la sección 3.3.1 Antecedentes de OVR, el criterio Ore Value Ranking es la diferencia entre B_p y B_e puesto que tiene la finalidad de ser un valor positivo cuando tiene mayor beneficio considerar un material como mineral, pudiendo incluso tener un B_p negativo, pero que a final de cuentas genera menos pérdida económica que mandarlo al botadero.

Por lo anteriormente explicado, es necesario definir dos tipos de ley de corte:

- Ley de corte break-even: es la ley de cobre a la cual, sobre su valor se produce un beneficio positivo, en otras palabras B_p mayor a cero.
- Ley de corte marginal: sobre esta ley de cobre se tiene la condición de que B_p es mayor a B_e , en otras palabras aunque el beneficio de procesar el material sea negativo, es aún mayor al costo de enviarlo al botadero. Es justamente sobre esta ley de corte cuando se tienen valores positivos en el criterio OVR US\$/t.

El modelo de bloques resultante de la corrida de scripts, se traspasa a un Excel, donde se calcula el promedio de los costos de mina y el promedio de las recuperaciones a los distintos destinos, filtrando por los siguientes tipos de material:

- Sulfuros primarios.
- Sulfuros secundarios.
- Parcial.
- Mixtos.
- Óxidos.

Como los costos de venta y de procesamiento son constantes estos se reemplazan directamente en la Ecuación 5 junto con los valores promedios obtenidos para las recuperaciones y los costos de mina, quedando una ecuación dependiente solo de la ley de cobre, como muestra la Ecuación 7.

Ecuación 7: Ecuación de beneficio mineral dependiente solo de ley

$$B_p = a * \text{LeyCu} - b$$

El valor a es resultado del producto entre el precio del cobre menos el costo de venta, por la recuperación y por el factor de conversión libra-tonelada, mientras que el valor b es la suma del costo mina con el costo de procesamiento. Es de relevancia mencionar que a y b toman distintos

valores dependiendo del proceso que se está graficando, ya que tanto las recuperaciones, como los costos de venta, de mina y de procesamiento difieren entre procesos.

Al calcular el promedio del costo mina a botadero se tiene que B_e toma un valor constante, viéndose como una recta horizontal en los gráficos de curva de beneficio.

A continuación se muestran las curvas de beneficio resultantes tanto del rajo Escondida como el rajo Escondida Norte, en detalle para cada tipo de material, donde las curvas LO corresponden a la lixiviación de óxidos y LS a la lixiviación de sulfuros.

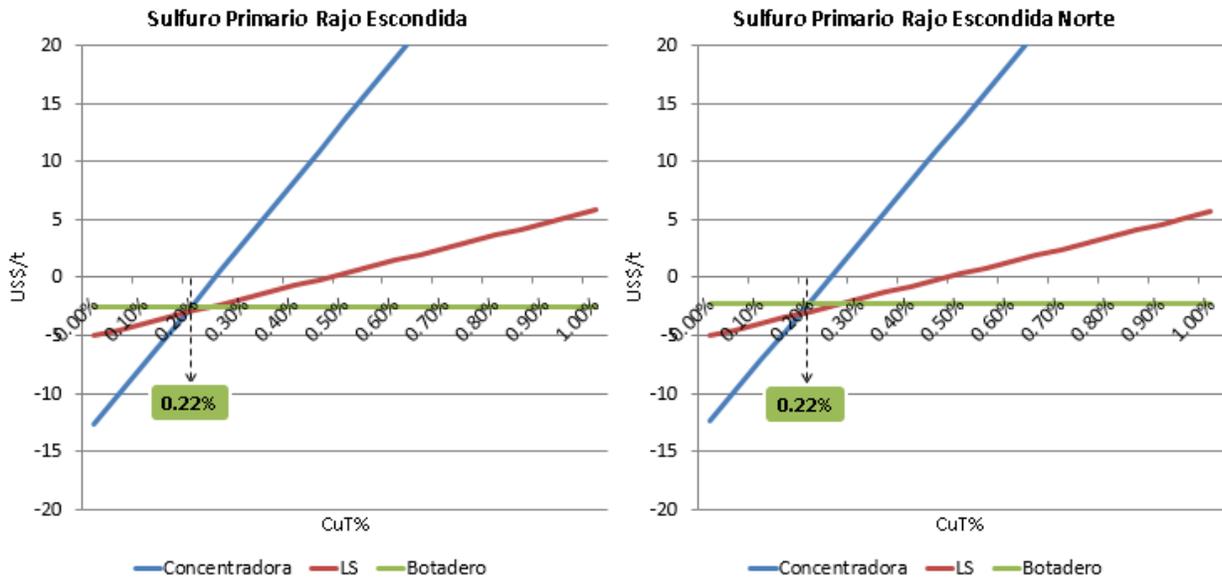


Ilustración 10: Curvas de beneficio de sulfuros primarios en ambos rajos

En la Ilustración 10 se observa que la ley de corte marginal para los sulfuros primarios es 0.22% independiente de que rajo provenga, notándose que la recta de concentradora se superpone a las demás sobre esta ley, permitiendo aseverar que este proceso entrega un mejor beneficio que la Lixiviación de Sulfuros, y cuando se llega a leyes menores que 0.22% conviene enviar el material a botadero ya que como se muestra, la recta de lixiviación está por debajo del valor a botadero.

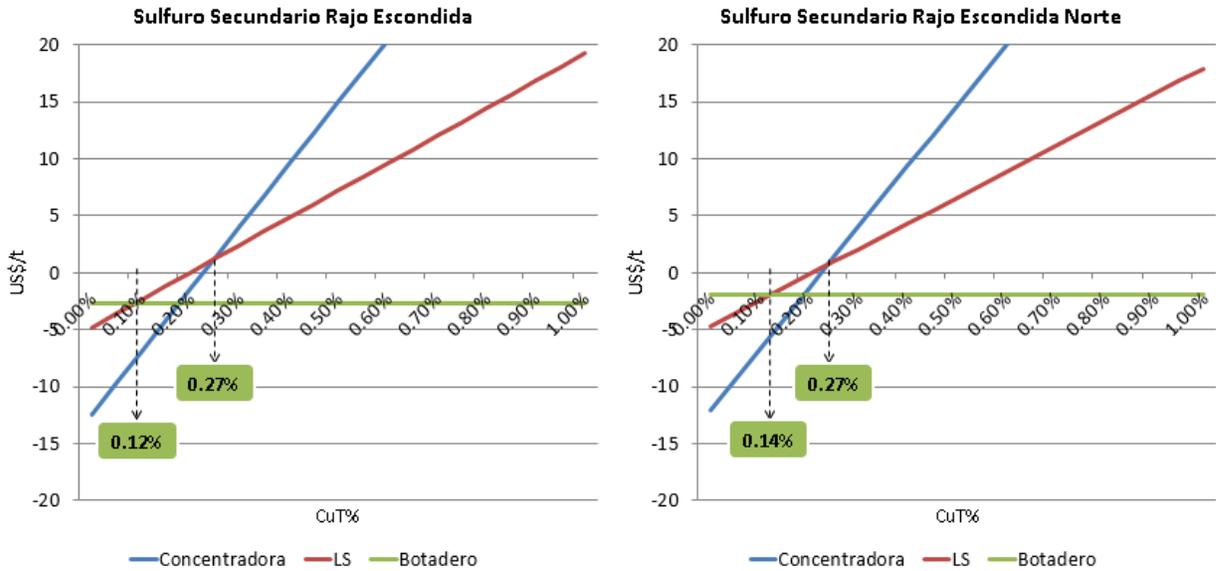


Ilustración 11: Curvas de beneficio de sulfuros secundarios en ambos rajos

La Ilustración 11 muestra que sobre 0.27% de ley de cobre conviene enviar el material secundario a concentradora, y que bajo esta ley hasta las leyes de corte marginal (0.12% en el caso de rajo Escondida y 0.14% en el caso de rajo Escondida Norte) conviene tratar el material en el proceso de lixiviación de sulfuros. Que exista un tramo de leyes en que es mejor destinar a lixiviación de sulfuros por sobre la concentradora, se debe a que a pesar de la menor recuperación de este proceso, sus bajos costos producen un mayor beneficio que las altas recuperaciones, pero altos costos de la concentradora.

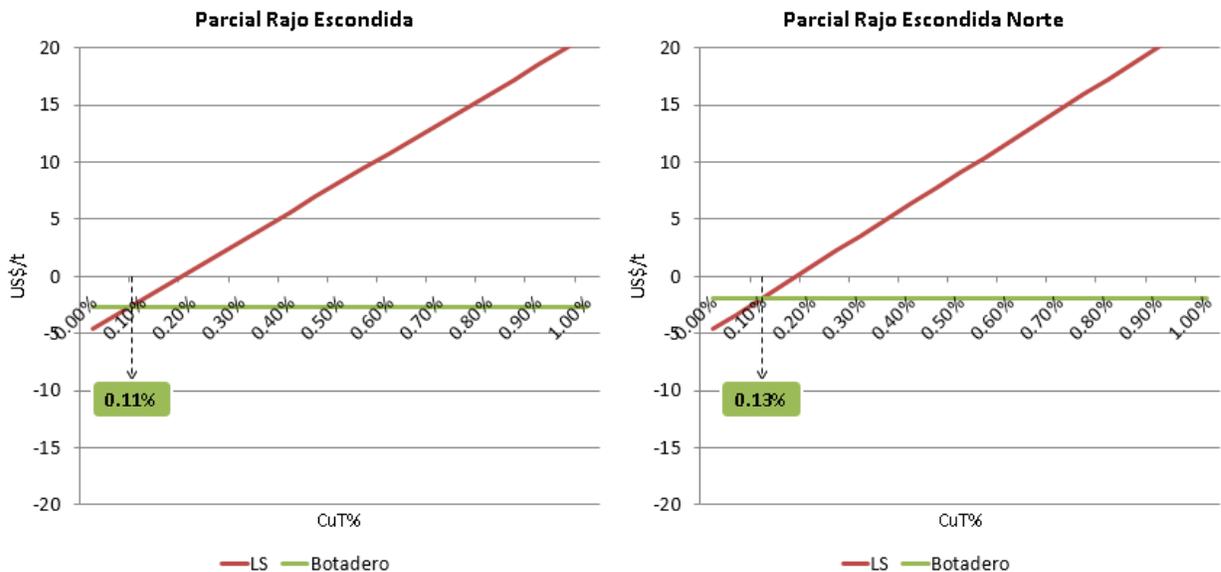


Ilustración 12: Curvas de beneficio de material parcial en ambos rajos

El material parcial lixiviable, como despliega la Ilustración 12, tiene una ley de corte marginal de 0.11% si es que viene del rajo Escondida y de 0.13% si viene del rajo Escondida Norte.

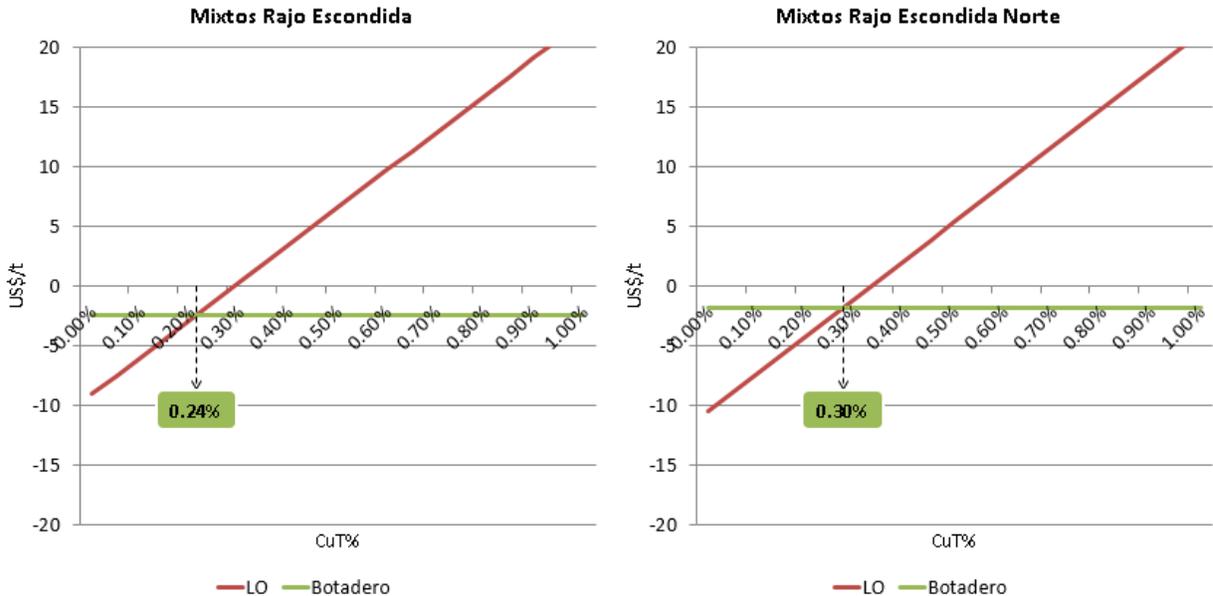


Ilustración 13: Curvas de beneficio de mixtos en ambos rajos

Para los materiales mixtos se tiene una ley de corte marginal de 0.24% si proviene del rajo Escondida y 0.30% si viene del rajo Escondida Norte, como muestra la Ilustración 13.

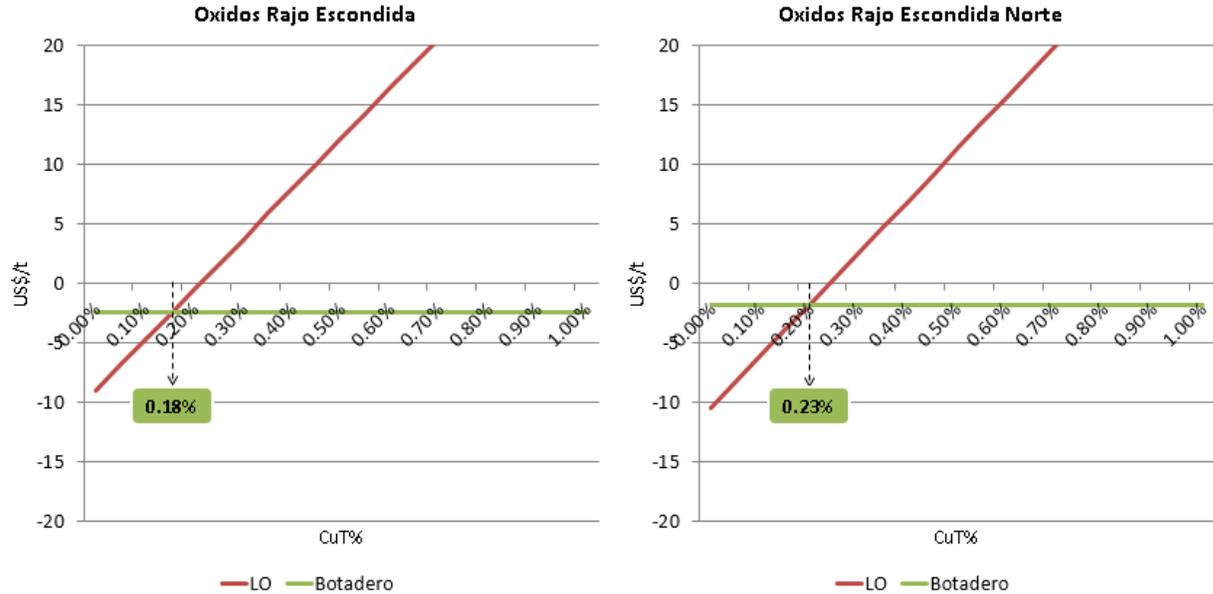


Ilustración 14: Curvas de beneficio de óxidos en ambos rajos

La Ilustración 14 expone que la ley de corte marginal para los óxidos es de 0.18% si procede del rajo Escondida y 0.23% si procede del rajo Escondida Norte.

Que existan diferencias en el valor de la ley de corte para un mismo tipo de material, pero por provenir de distintos rajos, se debe a que por la ubicación de éstos, el costo de mina, que es variable con los tiempos de ciclo, cambia de un rajo a otro, además de que también cambian las recuperaciones porque los rajos no son yacimientos exactamente iguales y al tener ciertas diferencias de distribución litológica esto se refleja en diferencias en recuperación.

Es importante mencionar que las curvas de beneficio están hechas con los promedios de recuperaciones y costos de mina para materiales con leyes sobre 0.3% de ley de cobre, por lo tanto lo que se muestra en los gráficos para leyes bajo ese valor es una proyección, pero en la siguiente sección (4.4 Estudio de materiales de baja ley) se examina con mayor detalle el comportamiento de materiales para este rango.

Una observación adicional importante que se deduce de las curvas de beneficio, es que el valor de la ley de corte marginal no es constante, contraponiéndose a lo que ha asumido hasta estos días Minera Escondida que usa un valor fijo de 0.3%. De hecho los gráficos muestran que la ley de corte marginal depende del tipo de material, del destino y del rajo que se procede. Por lo tanto si se quisiera optimizar el beneficio, se debería trabajar con leyes de corte marginal diferenciadas por rajo, material y destino, lo cual es engorroso operacionalmente.

Si se usaran los criterios OVR de US\$/t o de US\$/h no se tendría el problema de una ley de corte marginal variable, ya que por definición el valor de corte marginal para estos criterios es constante e igual a cero.

Además de que las curvas de beneficio muestran que la ley de corte marginal no es constante, también exponen que para todos los materiales es menor a 0.3%, exhibiendo la necesidad de evaluar la posibilidad de tratar estos materiales que hasta ahora Minera Escondida ha considerado como estéril.

En la Tabla 4 se muestran las recuperaciones promedio de cada material en cada proceso utilizadas para crear las curvas de beneficio.

Tabla 4: Recuperaciones promedio de materiales en destinos

		Recuperación en Concentradora	Recuperación en Lixiviación de Óxidos	Recuperación en Lixiviación de Sulfuros
Rajo Escondida	Sulfuro Primario	81.5%	-	17.8%
	Sulfuro Secundario	84.7%	-	39.5%
	Mixto	-	51.0%	-
	Óxido	-	69.1%	-
	Parcial	-	-	40.7%
Rajo Escondida Norte	Sulfuro Primario	80.0%	-	17.6%
	Sulfuro Secundario	82.8%	-	37.2%
	Mixto	-	51.7%	-
	Óxido	-	70.5%	-
	Parcial	-	-	43.5%

4.4 Estudio de materiales de baja ley

El estudio presentado en este capítulo tiene por finalidad hacer una estimación más precisa de las leyes de corte marginal, estudiando materiales con leyes de cobre bajo 0.3% en las fases a explotar en el plan quinquenal, el cual se ha planificado enviar en su totalidad al botadero, pero ahora se desea analizar su posible potencial de procesamiento. Específicamente se estudian sulfuros, mixtos y óxidos.

4.4.1 Sulfuros

En Minera Escondida los sulfuros tienen la posibilidad de ser tratados en la planta concentradora o en las pilas de lixiviación de sulfuros, pero con la limitada capacidad de la planta, las leyes de corte operativo en este destino nunca han sido menores al 0.7%. Por lo tanto se desea evaluar la ley de corte marginal de sulfuros de baja ley (menor a 0.3%) al destinarlo solamente a lixiviación de sulfuros, ya que las pilas tienen la capacidad de expandir mucho más su capacidad planificada y tener el potencial de recibir estos materiales antes considerados como estéril.

Se estudia la cantidad y características de los sulfuros que tienen leyes de cobre entre 0.2% y 0.3%, distinguiendo entre sulfuros primarios y secundarios, los ítems principales se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5: Características de sulfuros secundarios y primarios de baja ley

Ítem	Unidad	Primario	Secundario
Tonelaje	Mt	213.09	94.40
Recuperación	%	15.20	27.30
CuT	%	0.25	0.25

Los sulfuros secundarios siempre presentan mejores recuperaciones que los primarios en el proceso de lixiviación, lo cual queda expuesto en la Tabla 5, donde se muestra casi el doble de recuperación.

Usando la misma metodología expuesta en la sección 4.3 para crear las curvas de beneficio, se procede a graficarlas, pero usando las nuevas recuperaciones y costos de mina que estos materiales de baja ley poseen.

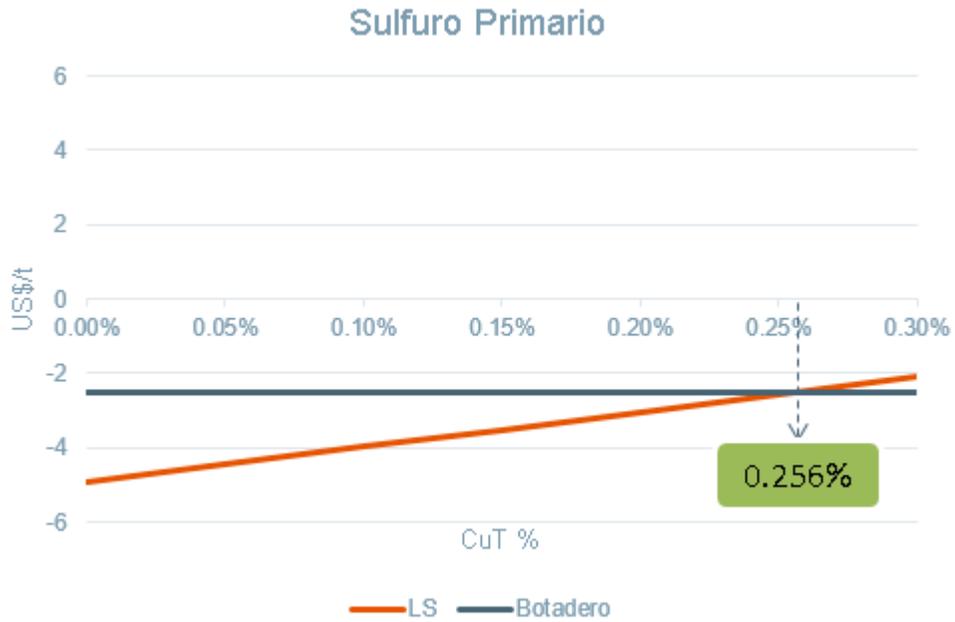


Ilustración 15: Curva de beneficio de sulfuros primarios de baja ley

En la Ilustración 15 se aprecia que la ley de corte marginal para los sulfuros primarios, al solo considerar como potenciales destinos la lixiviación de sulfuros y el botadero, es 0.26%, el cual es un valor muy cercano al mostrado en el cruce de las rectas LS y botadero en la Ilustración 10 del capítulo 4.3.

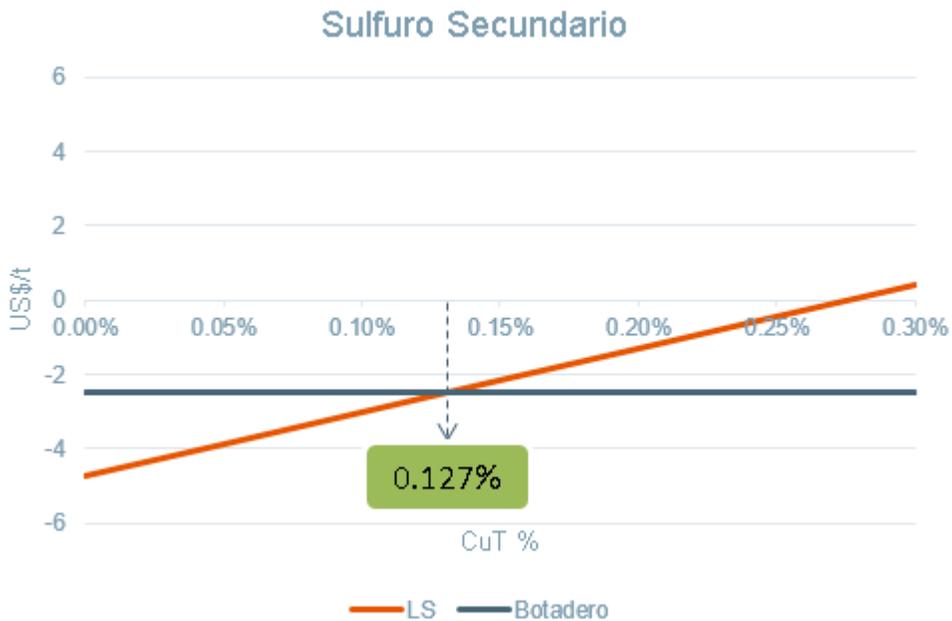


Ilustración 16: Curva de beneficio de sulfuros secundarios de baja ley

Si bien no hay mucha diferencia en los costos de mina de los materiales primarios y secundarios, la considerable diferencia que se tiene en la recuperación en las pilas, hace que los sulfuros

secundarios tengan una ley de corte marginal bastante menor, de 0.13%, como muestra la Ilustración 16, el cual es un valor muy similar al mostrado en la Ilustración 11, de la sección 4.3.

Que las leyes de corte marginal tanto para los sulfuros primarios como los secundarios sean muy similares a las expuestas en la sección 4.3, a pesar de que los sulfuros de baja ley tienen menor recuperación que los de alta ley (valores mostrados en Tabla 4 y Tabla 5), se debe a que los costos de mina a lixiviación de sulfuros son menores en estos materiales de baja ley, produciendo que la curva de beneficio a pilas de sulfuros se mantenga prácticamente en la misma ubicación sin variar la ley de corte marginal.

Tabla 6: Leyes de corte marginal de sulfuros primarios y secundarios

Ley de Corte Marginal %	
Primario	Secundario
0.26	0.13

La Tabla 7 muestra el tonelaje sobre las leyes de corte marginal y bajo 0.3%, el cual si se considerara en el plan quinquenal, se tendría 305.8 Mt de alimentación adicional a lixiviación de sulfuros.

Tabla 7: Tonelaje de sulfuros primarios y secundarios sobre ley de corte marginal y bajo 0.3%

Tonelaje sobre ley de corte marginal y bajo 0.3% [Mt]		
Primario	Secundario	Total
86.1	219.7	305.8

Si bien las pilas de lixiviación de sulfuros tienen la posibilidad de expandirse, esto significaría un costo adicional, el cual se define como costo de capital de sustento. A continuación se muestra en la Tabla 8 un análisis de sensibilidad, de cómo varían las leyes de corte marginal y el tonelaje de materiales bajo 0.3% de ley de cobre con distintos valores de costo de capital de sustento.

Tabla 8: Leyes de corte marginal de sulfuros en función de costos de capital de sustento

Capital de Sustento	Sulfuros con ley de cobre bajo 0.3%			
	Ley de Corte Marginal %		Tonelaje [Mt]	
	Primarios	Secundarios	Primarios	Secundarios
0 US\$/t	0.26	0.13	86.1	219.7
0.5 US\$/t	0.31	0.16	0	142.8
1 US\$/t	0.36	0.19	0	33.8

En la Tabla 8 se expone que al aumentar de 0 a 0.5 US\$/t el costo de capital de sustento, este hace que no sea rentable procesar sulfuros primarios de leyes bajo 0.3%.

4.4.2 Mixtos

El material mixto corresponde al que se encuentra en la zona transicional entre óxidos y sulfuros, el cual siempre ha sido únicamente destinado a la lixiviación de óxidos o al botadero. Como interesa estudiar la componente de baja ley de estos materiales, en la Tabla 9 se muestra la cantidad y principales características de los mixtos entre las leyes 0.2% y 0.3%, dentro del modelo de bloques del plan quinquenal.

Tabla 9: Características de mixtos de baja ley

Ítem	Unidad	Mixto
Tonelaje	Mt	78.12
Recuperación	%	50.66
CuT	%	0.25

Al crear la curva de beneficio para estos materiales mixtos de baja ley, mostrada en la Ilustración 17, se observa que poseen una ley de corte marginal de 0.22%, implicando que sobre esta ley y bajo el 0.3% de ley de cobre, existen 58.5 Mt de material adicional que fue considerado como estéril en el plan quinquenal, siendo que es un mejor negocio procesarlo en vez de mandarlo al botadero.

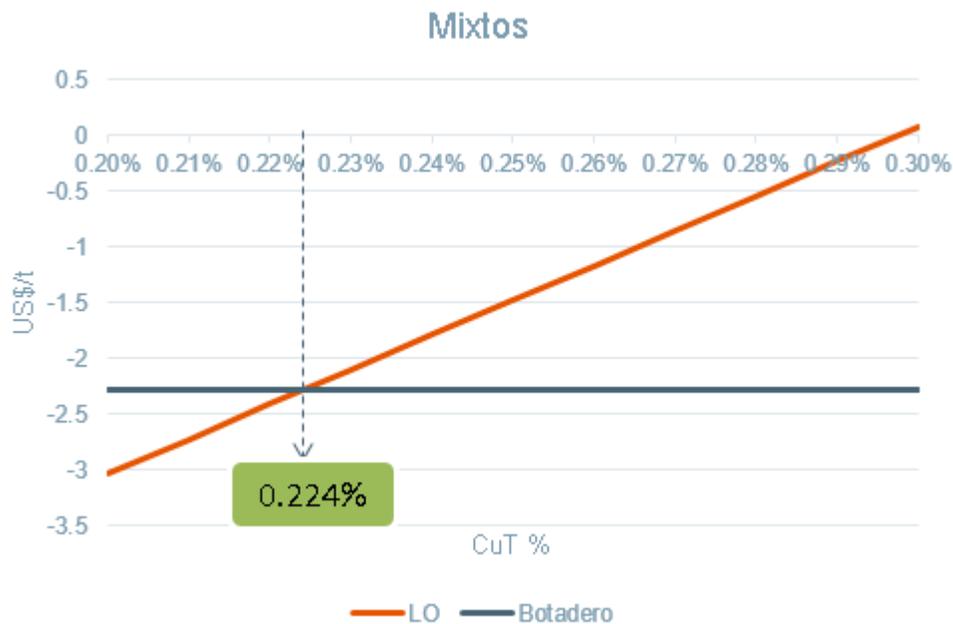


Ilustración 17: Curva de beneficio de mixtos de baja ley

Tabla 10: Ley de corte marginal y tonelaje de mixtos de baja ley

Mixtos		
Ley de Corte Marginal	%	0.22
Tonelaje sobre ley de corte marginal y bajo 0.3%	Mt	58.51

Como las pilas de lixiviación de óxidos son dinámicas en Minera Escondida, el procesar más material no implica directamente un aumento de tamaño de éstas, sino que se podría disminuir el tiempo de residencia del material y así permitir mayor capacidad de alimentación. Estudiar este efecto y su consecuente impacto en la recuperación o P80 a alimentar en las pilas escapa de los alcances de la presente memoria, pero en la Tabla 11, se muestra un análisis de sensibilidad de la ley de corte marginal y el tonelaje frente a un posible costo de capital de sustento al aumentar el tamaño de las pilas de lixiviación.

Tabla 11: Leyes de corte marginal de mixtos en función de costos de capital de sustento

Capital de Sustento	Mixtos con ley de cobre bajo 0.3%	
	Ley de Corte Marginal %	Tonelaje [Mt]
0.5 US\$/t	0.24	38.0
1 US\$/t	0.26	38.0
1.5 US\$/t	0.27	31.1

En la Tabla 11 se observa que el costo de capital de sustento tiene poco efecto sobre el tonelaje de mixtos de baja ley, debido a que entre esas nuevas leyes de corte marginal no existe mucho tonelaje, por lo tanto gracias a la distribución de leyes del material mixto, éste puede resistir altos costos de capital de sustento y seguir aportando una buena cantidad de tonelaje adicional al plan quinquenal.

Un análisis importante resulta de notar que la ley de corte marginal mostrada en la Ilustración 17, es menor que la expuesta en la Ilustración 13, que es la curva de beneficio hecha con información de sulfuros con ley superior a 0.3%, esto se debe al cambio en la recuperación y costo mina, que es lo único que puede variar entre ambos gráficos, ya que los costos de venta y de procesamiento son costos unitarios fijos y por lo tanto los mismos. A continuación se describen las causas.

- Efecto costo mina a Lixiviación de Óxidos: Debido a la ubicación que tienen los mixtos de baja ley en los rajos, se tiene un costo de mina a lixiviación de óxidos mucho menor al que presentan los mixtos de ley sobre 0.3%, haciendo que el beneficio de enviar a este destino aumente y por lo tanto la ley de corte marginal disminuya. Cabe mencionar que en el modelo de bloques del plan quinquenal, la mayoría de los mixtos de baja ley se encuentran en el rajo Escondida, el cual se ubica a una distancia mucho menor a las pilas de lixiviación

de óxidos que el rajo Escondida Norte, por esto en la Ilustración 17 se expone la considerable diferencia en las leyes de corte marginal entre ambos rajos.

- Efecto recuperación: La recuperación de los mixtos depende de la proporción del cobre soluble con respecto al cobre total, además de disminuir con el contenido de calcopirita, si bien la proporción de CuS y CuT prácticamente no varía, se tiene que el contenido calcopiritico aumenta en mixtos de baja ley, haciendo que se tenga un menor recuperación. En la Tabla 9 se aprecia que la recuperación de los mixtos bajo la ley de 0.3% es de 50.66%, en cambio como muestra la Tabla 4 la recuperación de los mixtos con ley superior es de 51.3% en promedio de ambos rajos. Si la recuperación es menor, se esperaría que la ley de corte marginal aumente con respecto a lo mostrado en la Ilustración 13, pero prevalece la gran diferencia de costo mina a Lixiviación de Óxidos, haciendo que finalmente la ley de corte marginal disminuya.

4.4.3 Óxidos

La Tabla 12 muestra las características de los óxidos entre 0.2% y 0.3% de ley de cobre que se encuentran dentro de las fases del plan quinquenal.

Tabla 12: Características de óxidos de baja ley

Ítem	Unidad	Óxido
Tonelaje	Mt	2.62
Recuperación	%	64.9
CuT	%	0.25

La curva de beneficio desplegada en la Ilustración 19, muestra que la ley de corte marginal de los óxidos es de 0.182%, esto implica que existen 2.73 Mt de material adicional que pudo destinarse a lixiviación de óxidos en el plan quinquenal, pero que se destinaron a botadero.

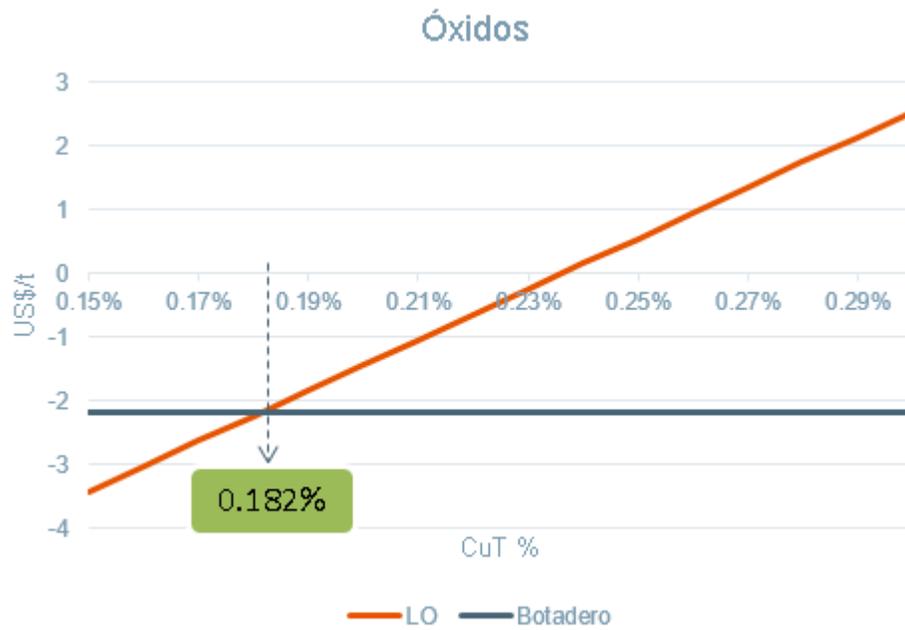


Ilustración 18: Curva de beneficio de óxidos de baja ley

Tabla 13: Ley de corte marginal y tonelaje de óxidos de baja ley

Óxidos		
Ley de Corte Marginal	%	0.18
Tonelaje sobre ley de corte marginal y bajo 0.3%	Mt	2.73

Es posible observar que la ley de corte marginal de los óxidos de baja ley mostrada en la Ilustración 18 difiere de la Ilustración 14 debido a las siguientes causas:

- Efecto rajo: El 71% de los óxidos sobre la ley de corte marginal y bajo 0.3% provienen del rajo Escondida el cual en la Ilustración 14 sí muestra una ley de corte marginal de 0.18%, pero como el porcentaje de óxidos del rajo Escondida Norte no es despreciable, se esperaría que se tuviera una ley de corte marginal mayor debido a que este último rajo presenta este valor bastante alto (0.23%). Por lo tanto el hecho de que mayoritariamente los óxidos provengan principalmente del rajo más ventajoso, no es condición suficiente para presentar una ley de corte marginal tan baja.
- Efecto costo mina a Lixiviación de Óxidos: Al igual que como sucedió con el material mixto, se tiene que los óxidos con leyes entre la ley de corte marginal y 0.3% tienen un costo de mina a lixiviación de Óxidos menor a los materiales de alta ley, haciendo que la ley de corte marginal tenga un valor tan bajo como 0.18%.
- Efecto recuperación: Tal como se muestra en la Tabla 12, la recuperación de los óxidos de baja ley es de 64.9%, en cambio la recuperación de los óxidos sobre 0.3% de ley de cobre es mayor, tal y como se muestra en la Tabla 4. A pesar de que este efecto debería aumentar la ley de corte marginal y hacerla mayor a 0.18%, el efecto del costo de mina es mucho mayor, haciendo que finalmente se tenga ese valor.

En coherencia con lo comentado en la sección de mixtos, a pesar de que las pilas de óxidos sean dinámicas, se presenta un análisis de sensibilidad de la ley de corte de los óxidos frente a posibles costos de capital de sustento, el cual se expone en la Tabla 14, donde se aprecia que el tonelaje varía de forma despreciable incluso para costos altos como lo es 1.5 US\$/t, quedando en evidencia el gran potencial que tiene procesar estos materiales incluso si eso significa grandes costos adicionales.

Tabla 14: Leyes de corte marginal de óxidos en función de costos de capital de sustento

Capital de Sustento	Óxidos con ley de cobre bajo 0.3%	
	Ley de Corte Marginal %	Tonelaje [Mt]
0.5 US\$/t	0.19	2.68
1 US\$/t	0.21	2.59
1.5 US\$/t	0.22	2.44

El costo mina juega un rol importante en los óxidos y mixtos de baja ley, ya que si bien esta porción bajo 0.3% de ley de cobre tiene recuperación menor que los materiales de ley superior, al tener costos de mina menor, su ley de corte marginal se hace menor a lo mostrado en los gráficos de la sección 4.3.

Es importante mencionar que si bien se ha demostrado el enorme potencial de procesar sulfuros, mixtos y óxidos de ley inferior a 0.3%, es necesario y se recomienda crear un plan con la secuencia de extracción para saber cuánto material extra es posible de procesar realmente, considerando las disponibilidades y capacidades de los distintos sistemas o eventuales expansiones a capacidades de transporte y procesamiento con sus costos de capital de sustento correspondientes.

4.5 Definición de modelo de costo de venta

Esta parte tiene por finalidad evaluar de forma preliminar el efecto que tiene considerar un costo de venta variable de concentradora al momento de planificar. Este costo variable se aplicará exclusivamente para los efectos de este capítulo, por lo cual en la Sección 5 de resultados, las evaluaciones se harán con costo de venta unitario fijo.

Actualmente el área de planificación de Minera Escondida no toma en cuenta los créditos ni penalidades al momento de optimizar sus planes, por ahora asumen costos de venta unitarios fijos los cuales son los mostrados en la Tabla 3 del capítulo 4.3. Esto significa que este costo no considera castigos por elementos penalizables (As, Zn, Sb) o premios por presencia de pagables en el concentrado (Au, Mo), los cuales son elementos que si posee el yacimiento de Escondida.

La Ecuación 8 muestra la actual forma en que Minera Escondida calcula su costo de venta unitario fijo para el concentrado, en esta se aprecia que para convertir el costo de flete en dólares por tonelada de concentrado húmedo a dólares por libra, se debe dividir por:

- El factor de conversión toneladas a libra = 2204.62

- Ley de concentrado = 26%
- Factor tonelaje húmedo a seco = (1-9%)

Que la Ecuación 8 asuma una humedad de concentrado del 9% está bien, ya que eso es parte del estándar de Escondida, pero que asuma una ley de concentrado fija y del 26%, no está bien ya que este es un valor variable.

Ecuación 8: Ecuación de costo de venta unitario fijo

$$CostoVentaFijo \left[\frac{US\$}{lb} \right] = TC \left[\frac{US\$}{lb} \right] + RC \left[\frac{US\$}{lb} \right] + \frac{Flete \left[\frac{US\$}{ton_conc_humedo} \right]}{2204.62 * 26\% * (1 - 9\%)} = 0.2 \left[\frac{US\$}{lb} \right]$$

En este capítulo se genera un modelo de costos de venta variable con el contenido de arsénico y zinc, ya que son los elementos de proporciones no despreciables en el yacimiento. Además de ser variable con ambos penalizables, el costo de venta en el modelo queda en función de leyes de concentrado reales, de esta manera al valorizar el costo de venta para cada bloque en un modelo de bloques usando los scripts, se tendrán valores de costo de venta:

- Mayores a 0.2 US\$/lb: Si es que su contenido de zinc o arsénico sobrepasa los límites aceptables o es un bloque que produce muy baja ley de concentrado.
- Menores a 0.2 US\$/lb: Si es que es un bloque que tiene alta ley de concentrado y que los castigos por los penalizables son nulos o despreciables.

La Tabla 15 muestra la forma en que se castiga un concentrado dependiendo de la ley de Zinc o Arsénico contenido en este.

Tabla 15: Aplicación de castigos en función de contenido de As y Zn

	Condición	Castigo [US\$/ton_conc]
Ley de Zn en Concentrado (con_zn) [%]	>3%	2*(con_zn*100-3)
Ley de As en Concentrado (con_as) [%]	>0.2%	2.5*(con_as*100-0.2)/0.1
	>0.5%	7*(con_as*100-0.5)/0.1
	>1%	11*(con_as*100-1)/0.1

Como las variables con_zn y con_as están disponibles en el modelo de bloques de Minera Escondida, resulta directo la evaluación de las penalidades.

La Ecuación 9 muestra la forma de calcular el nuevo costo de venta que es variable, el cual a diferencia del costo de venta unitario fijo mostrado en la Ecuación 8, tiene un término adicional que corresponde a las penalidades y ya no se asume 26% de ley de concentrado, sino que en la fórmula se reemplaza el valor de ley de concentrado real de cada bloque.

$$\begin{aligned}
 & \text{CostoVentaVariable} \left[\frac{\text{US\$}}{\text{lb}} \right] \\
 &= TC \left[\frac{\text{US\$}}{\text{lb}} \right] + RC \left[\frac{\text{US\$}}{\text{lb}} \right] + \frac{\text{Flete} \left[\frac{\text{US\$}}{\text{ton_conc_humedo}} \right]}{2204.62 * \text{LeyConcentrado} * (1 - 0.09)} \\
 &+ \frac{\text{castigo_zn} \left[\frac{\text{US\$}}{\text{ton_conc}} \right] + \text{castigo_as} \left[\frac{\text{US\$}}{\text{ton_conc}} \right]}{2204.62 * \text{LeyConcentrado}}
 \end{aligned}$$

Este modelo de costo de venta variable se incorpora a los scripts OVR, con el fin de tener un nuevo US\$/t a concentradora el cual se llama US\$/t_Concentradora_CVV, quedando la antigua variable que consideraba costo de venta unitario fijo bajo el nombre de US\$/t_Concentradora_CF.

El año fiscal 18 tiene una ley de corte operacional a concentradora del 0.7% la cual se puede estimar en 25 US\$/t como criterio de corte en OVR. Se desea saber el efecto en el tonelaje a alimentar en ese año a la planta al aplicar el costo de venta variable. La Ilustración 19 muestra un gráfico de dispersión en donde los ejes son los criterios de corte operacional a planta de 25 US\$/t considerando costo de venta variable versus fijo.

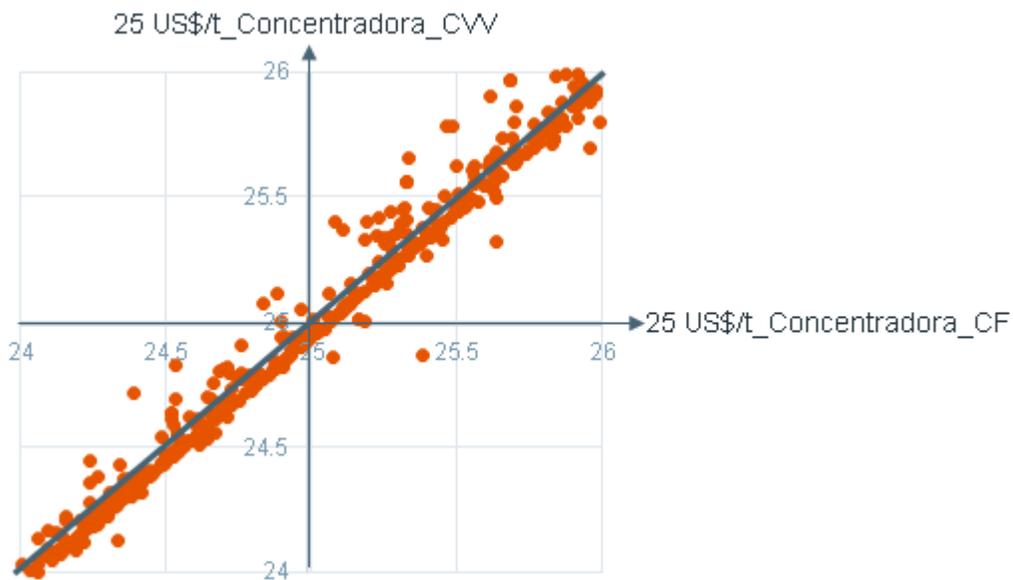


Ilustración 19: Gráfico de dispersión bloques a concentradora con costo de venta variable versus fijo

En la Ilustración 19 se aprecia que:

La mayor parte de los bloques del año fiscal 18 se encuentran bajo la recta Y=X, implicando que el castigo por penalidades o por bajas leyes de concentrado es la mayoría de las veces mayor que el premio de leyes de concentrado mayores al 26%.

- En la mayoría de los casos ambos criterios coinciden en lo que se debe y no debe enviar a la concentradora, lo cual corresponde a los bloques dentro de los cuadrantes superior derecho e inferior izquierdo respectivamente.
- En el cuadrante superior izquierdo se tienen bloques que son destinados a la concentradora si es que se usa un costo de venta unitario fijo, pero que no deberían ser destinados si se usa costo de venta variable. Esto sucede porque son bloques con un gran castigo por penalidades de arsénico y zinc y leyes de concentrado inferiores a 26%.
- El cuadrante inferior derecho expone la existencia de bloques que usar un costo de venta unitario fijo dice que no deberían ir a la concentradora, pero que utilizar un costo variable dice que sí. Esto ocurre porque son bloques con nula o despreciable penalidad por elementos menores y altas leyes de concentrado, mayores al 26%.

El efecto total sobre la alimentación a concentradora en el FY18, al usar costo de venta variable, se refleja en que el 0.65% que antes se alimentaba debido a que se usaba un costo unitario fijo, ahora ya no se envía a la planta. Esto significa un tonelaje más bien despreciable, pero se recomienda completar el modelo con los elementos pagables principales (oro y molibdeno) además de generar un plan usando el criterio OVR US\$/t con costo de venta variable y otro plan con el mismo criterio, pero con ese costo unitario fijo, de esta manera se puede saber el efecto económico.

Un dato interesante que resulta de aplicar costo de venta variable a los sulfuros de alta ley presentes en el FY18 es que este costo varía tal como se muestra en la Tabla 16, dejando en evidencia cuan diferente es al 0.2 US\$/lb fijo que antes se usaba.

Tabla 16: Máximo y mínimo de costo de venta variable en año fiscal 2018

Costo Venta Variable	US\$/lb
Mínimo	0.17
Máximo	0.79

La amplia gama de valores que toma el costo de venta variable implica que existan bloques donde el efecto de las penalidades y bajas leyes de concentrado se reflejan en un máximo de 6 US\$/t de diferencia con respecto al criterio OVR con costo unitario fijo. En cambio el máximo efecto de penalidades despreciables y altas leyes de concentrado se reflejan en 2.5 US\$/t de diferencia con respecto al criterio OVR con costo de venta unitario fijo.

5. RESULTADOS

5.1 Aplicación de OVR en estudio de Ore Control

Con la necesidad de parte del área de Ore Control de evaluar la factibilidad de procesar material mixto no solo en lixiviación de óxidos sino que también en lixiviación de sulfuros, se procede a mostrar el potencial de Ore Value Ranking para evaluar el potencial económico y aprovechar la instancia para presentar el modo de uso de OVR y sus aplicaciones a los trabajadores del área de Ore Control.

Como se menciona en la sección de antecedentes, el material mixto es el que se encuentra en la zona transicional entre óxidos y sulfuros, presentando características intermedias entre estos dos tipos de material. Actualmente en Minera Escondida este material solo se procesa en lixiviación de óxidos, siendo que por sus características no debería descartarse procesarlo en las pilas de sulfuros.

Usando el modelo de bloques de Ore Control, el cual es un modelo de bloques que constantemente se está actualizando con los pozos de tronadura, se procede a aplicar los scripts usando el software Vulcan, con la finalidad de que este modelo cuente con las variables OVR.

Usando la misma metodología que en capítulo 4.3, pero con la diferencia de que esta vez no se usará el modelo de bloques de mediano plazo sino que el modelo de pozos, se construyen dos curvas de beneficio, una asumiendo que la recuperación promedio de los mixtos en las pilas de sulfuros es del 30% y otra en que se asume una recuperación promedio del 35%. Que en este ejercicio se asuman los valores de recuperación del material mixto en el nuevo proceso se debe a que se cuenta con cierta certeza de que los valores fluctúan entre los valores 30% y 35%, pero todavía no se realizan las pruebas químicas para generar el modelo real de la recuperación de este material en interacción con los sulfuros en las pilas de lixiviación de sulfuros, por lo tanto el presente estudio y sus curvas de beneficio representan un análisis stand-alone porque se obvian las externalidades que puede generar el mezclar materiales diferentes y solo se analiza el beneficio que tendría procesar el material mixto sin interacción con los demás. Las curvas de beneficio generadas se muestran en la Ilustración 20.

La Ilustración 20 muestra que si los óxidos tuvieran una recuperación promedio de 30% en lixiviación de sulfuros trae un mayor beneficio económico tratar este material en este proceso por sobre la lixiviación de óxidos en el rango de leyes de cobre entre 0.1% y 0.4%. Al considerar una recuperación del 35% se pueden tratar leyes aún mayores en lixiviación de sulfuros (hasta 0.52% de ley de cobre) conviniendo por sobre las pilas de óxidos.

Que exista un tan amplio rango de leyes en que es más beneficioso procesar mixtos en lixiviación de sulfuros por sobre la de óxidos, a pesar de la inferior recuperación de este proceso frente a las pilas de óxidos (30-35% versus 51%), se debe a no solo los bajísimos costos de procesamiento que tiene LS, el cual es el menos costoso, sino que además tiene costos de mina menores a LO, ya que sus pilas se ubican mucho más cerca de los rajos. Dicho lo anterior queda en evidencia la importancia de OVR en el análisis puesto que castiga debidamente el beneficio de las pilas óxidos por encontrarse tan lejanas a los rajos, este es un análisis nunca antes hecho y que juega un rol importantísimo en las decisiones económicas.

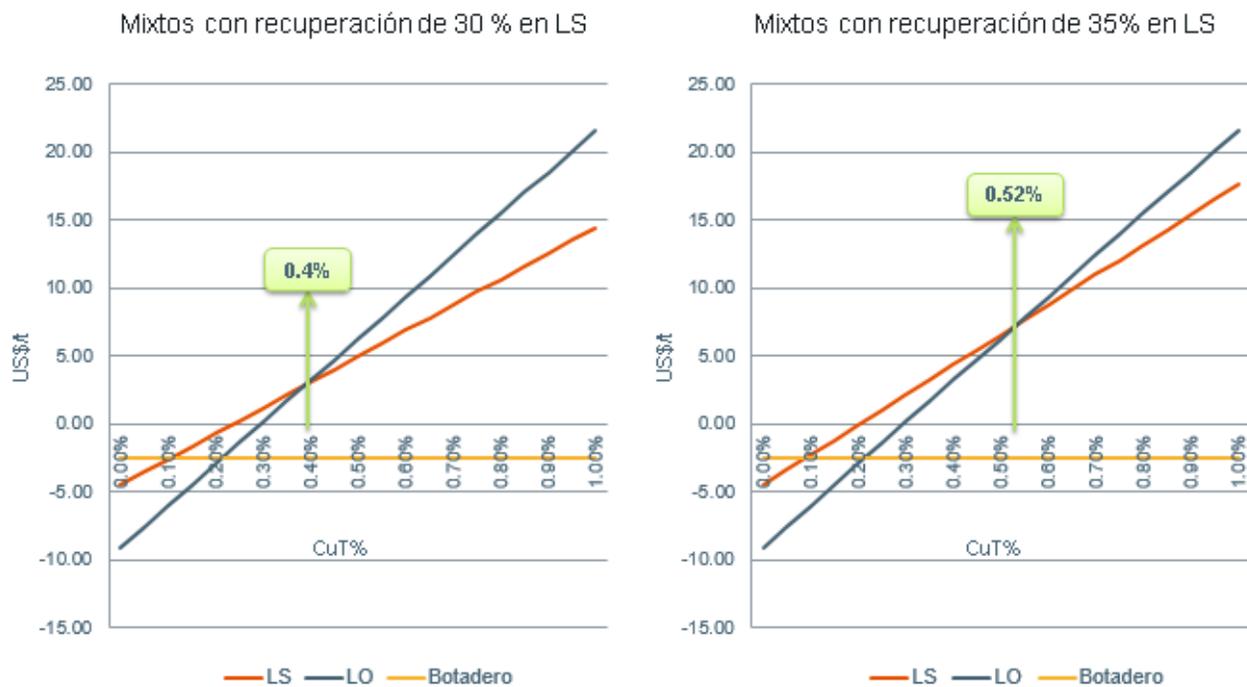


Ilustración 20: Curvas de beneficio de mixtos con 30% y 35% de recuperación en LS

Además de construir las curvas de beneficio por proceso, es interesante el análisis que resulta elaborarlas por material. La Ilustración 21 muestra el beneficio de procesar óxidos en comparación con los mixtos en el proceso de lixiviación de óxidos y la Ilustración 22 compara los beneficios de procesar sulfuros primarios, sulfuros secundarios, parcial lixiviables y mixtos en el proceso de lixiviación de sulfuros. Cabe mencionar que para ambos gráficos la recuperación considerada para los mixtos es del 30%.

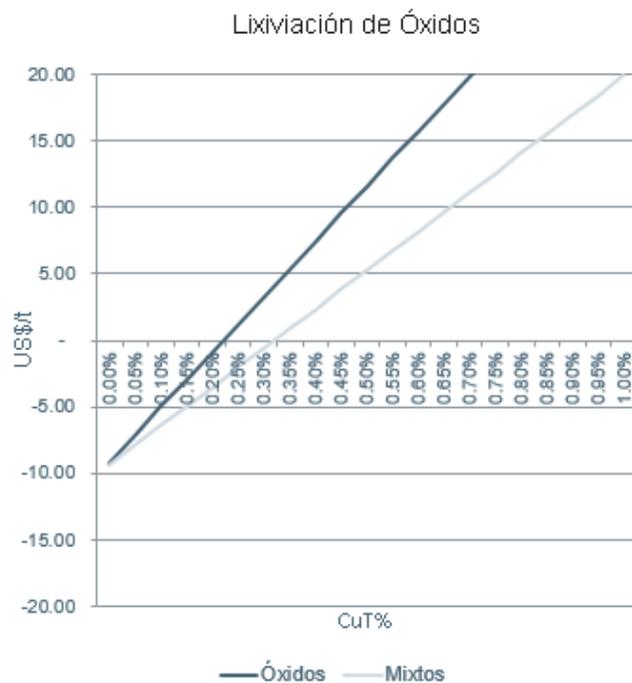


Ilustración 21: Curva de beneficio por material en LO

En la Ilustración 21 se aprecia que los óxidos siempre convienen ser tratados en la lixiviación de óxidos por sobre los mixtos para todo rango de leyes, esto se debe únicamente a la gran diferencia de recuperación entre ambos materiales (70% versus 51%), y no se debe a otra causa ya que ambos presentan los mismos costos de procesamiento y prácticamente los mismos costos de mina.

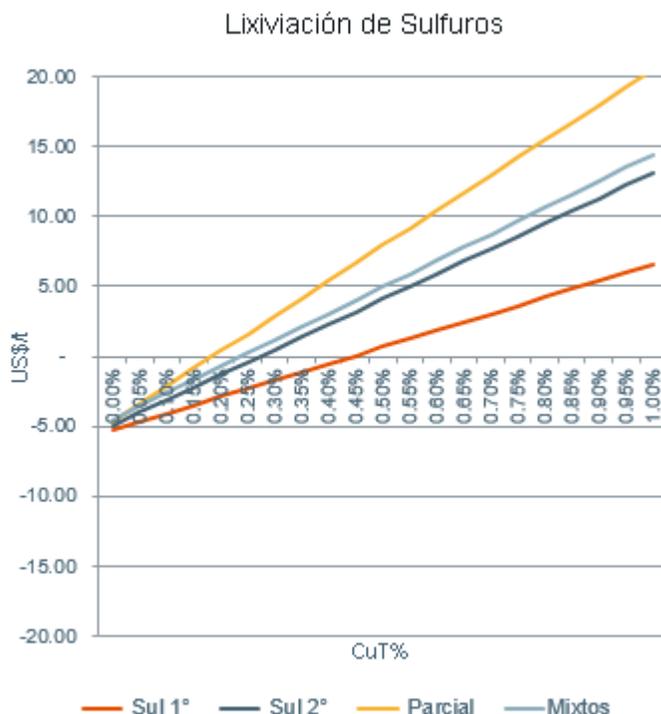


Ilustración 22: Curva de beneficio por material en LS

La Ilustración 22 expone que el proceso de lixiviación de sulfuros debería considerar seriamente procesar material mixto si es que las pruebas químicas arrojaran una interacción positiva con los sulfuros y parcial lixiviable, ya que para todo rango de ley siempre conviene por sobre los materiales sulfuros primario y secundario, perdiendo solo con respecto al material parcial lixiviable. Que el material mixto convenga por sobre los sulfuros primarios en LS, se debe principalmente a la gran diferencia de recuperación (30% versus 17.6%), en cambio que convenga más que los sulfuros secundarios no se debe a este factor, puesto que los secundarios tienen una mejor recuperación en este proceso, alrededor del 38%, acá juega un rol importante el costo de mina y por lo tanto OVR, los sulfuros secundarios se encuentran más profundo que los mixtos en ambos rajos haciendo que sus costos de mina sean mayores.

La aplicación de Ore Value Ranking para generar las curvas de beneficio del presente estudio juega un rol importante en mostrar el potencial económico que tiene procesar mixtos en las pilas de sulfuro, pero se recomienda hacer pruebas piloto y de laboratorio para evaluar la factibilidad química de procesar este material en este proceso, estudiando las recuperaciones de los materiales que actualmente procesa LS frente a la interacción con los mixtos en las pilas.

5.2 Uso de OVR en plan del año fiscal

El plan del año fiscal es elaborado por el área de planificación de corto plazo usando el software PPC, el cual es un programa en donde el usuario de forma manual escoge las mejores leyes hasta copar los distintos destinos en cada periodo. PPC está creado para trabajar únicamente con leyes por lo cual no es compatible con Ore Value Ranking.

Minera Escondida cuenta con un software piloto llamado PPLPCP el cual está programado con la intención de funcionar con cualquier criterio de corte usando la metodología de ranking, por lo tanto es compatible con OVR, pero hasta el momento es solo posible utilizar el criterio CuRec/t, ya que no funciona bien con valores de US\$/t.

Debido a la inexistencia de herramientas para crear planes con US\$/t, se procede solo a estudiar el criterio CuRec/t con el programa PPLPCP. Como primera instancia se crea un caso base que intenta replicar lo logrado con PPC para el año fiscal 18, pero incorporándole ciertas mejoras al plan, a continuación se relatan las similitudes y diferencias que tiene el caso base usando PPLPCP con respecto a lo que hecho por planificación de corto plazo utilizando PPC.

Similitudes:

- Se utiliza la misma secuencia de extracción.
- En ambos se usa criterio de corte de ley de cobre en sistema de ranking.
- Se solicita la misma cantidad de alimentación para planta y lixiviación de óxidos obtenida con PPC.
- Ambos planes no consideran procesamiento de materiales con ley de cobre bajo 0.3%.

Diferencias:

- Entre ambos planes existen disimilitudes de ley, ya que PPLPCP tiene una mejor política de leyes de corte debido a que optimiza automáticamente y no de forma manual como PPC.
- Al caso base se le solicita no alimentar ni remanear stocks de concentradora, a diferencia del plan de PPC.
- En el caso base no se establece límite de capacidad de lixiviación de sulfuros, únicamente se restringe como máximo remanear 5 Mt al mes.
- Como resultado del punto anterior se alimenta 2.14 Mt adicionales a las pilas de sulfuro con respecto al plan de PPC.

Se procede a generar un plan utilizando el criterio CuRec/t, el cual tiene las mismas características que el caso base, pero con la diferencia de que en vez de hacerse con un ranking de leyes se hace con este criterio OVR y además se consideran los sulfuros de baja ley (entre 0.2 y 0.3% de ley de cobre) para ser destinados a las pilas de sulfuro. La Tabla 17 muestra una comparación del plan del caso base con respecto al plan generado con OVR.

La Tabla 17 exhibe, tal como dice la teoría, que al usar un ranking de leyes de cobre, como en el caso base, siempre se tendrán mejores leyes (CuT) con respecto a usar otro criterio, pero CuRec/t

no difiere mucho en este valor y a su favor se observan mejoras consistentes en la recuperación para todos los procesos excepto en la lixiviación de sulfuros, debido a que en este plan se están incorporando todos los sulfuros de leyes entre 0.2% y 0.3%, los cuales son 9 Mt que tienen recuperaciones inferiores.

Tabla 17: Comparación de planes de caso base y CuRec/t

			Caso Base	CuRec/t
Concentradora	CuT	%	0.95	0.95
	Recuperación	%	83.20	83.29
	Alimentación	dmt	132,038,400	132,038,400
Lixiviación de Óxidos	CuT	%	0.89	0.87
	CuS	%	0.59	0.58
	Recuperación	%	64.75	66.27
	Alimentación	dmt	20,787,900	20,787,900
Lixiviación de Sulfuros	CuT	%	0.50	0.48
	CuS	%	0.03	0.03
	Recuperación	%	25.37	24.34
	Alimentación desde Mina	dmt	58,795,001	67,489,689
	Alimentación desde Stocks	dmt	15,807,275	15,807,183
	Alimentación Total	dmt	74,602,276	83,296,872

La Ilustración 23, expone la cantidad de fino producido con el plan del caso base y el producido usando CuRec/t. Queda en evidencia lo que la teoría dice y es que al usar este criterio OVR se incrementa la cantidad de fino producido, para este ejercicio significa un aumento en 3,291 toneladas de cobre fino para el año fiscal 2018, lo cual es un 0.26% adicional con respecto al caso base.



Ilustración 23: Comparación de finos con plan caso base y CuRec/t

Al desglosar las 3,291 toneladas de fino adicional por proceso se tiene el siguiente aporte:

- Fino adicional en Concentradora: 30 t.
- Fino adicional en Lixiviación de Óxidos: 577 t.
- Fino adicional en Lixiviación de Sulfuros: 2,684 t.

Es posible notar que el aporte de fino es casi despreciable en la planta concentradora, en cambio en los procesos de lixiviación es mucho mayor.

A continuación se muestran gráficos de cascada en las Ilustraciones 24, 25 y 26 que tienen por objetivo mostrar cómo es que se obtiene el delta adicional de cobre fino usando CuRec/t con respecto al caso base.



Ilustración 24: Gráfico cascada de fino en plan caso base y CuRec/t

La cantidad de fino producido depende únicamente del tonelaje alimentado, la recuperación y la ley de cobre. En la Ilustración 24 se analiza los criterios que cambian entre el plan del caso base y CuRec/t, los cuales son solamente la ley de cobre y la recuperación, ya que como se muestra en la Tabla 17, el tonelaje de alimentación es el mismo. En este gráfico de cascada se aprecia que con la disminución de la ley con respecto al caso base, se están perdiendo 1,057 toneladas de cobre fino, pero con el aumento de recuperación se están ganando 1,088 toneladas de cobre fino, teniéndose el delta de fino adicional de 30 toneladas para la concentradora.

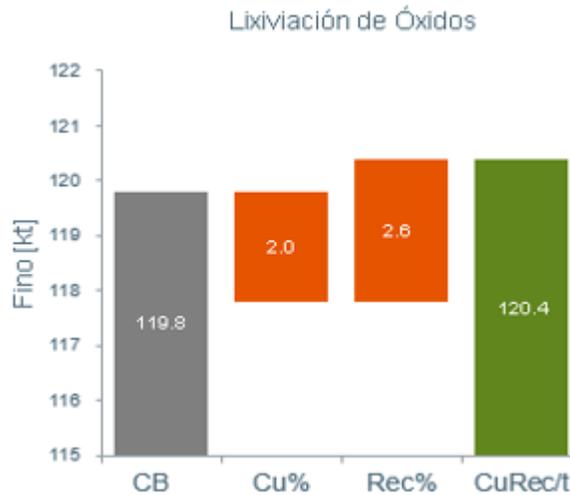


Ilustración 25: Gráfico cascada de fino plan caso base y CuRec/t

Tal como se aprecia en la Tabla 17, la alimentación a las pilas de óxidos es la misma tanto en el caso base como en el plan generado con CuRec/t, por lo tanto la Ilustración 25 muestra la influencia de los criterios ley de cobre y recuperación, observándose que la disminución de ley produce una pérdida de 2 kt de cobre fino, pero el aumento de recuperación conlleva a un incremento de 2.6 kt toneladas de cobre fino, reflejándose en las 577 toneladas adicionales de fino aportadas por este proceso.

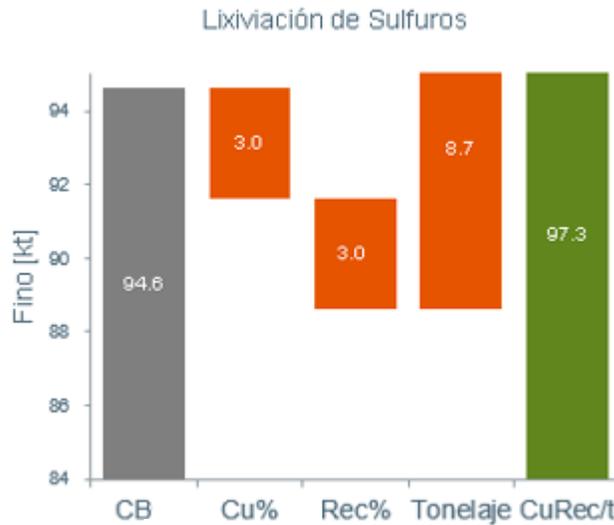


Ilustración 26: Gráfico cascada de finos plan caso base y CuRec/t

La Tabla 17 muestra que en el plan OVR se están incorporando nueve millones de toneladas adicionales de alimentación a lixiviación de sulfuros, lo cual al ser sulfuros de baja ley, presentan una recuperación menor y por lo tanto disminuyen la recuperación total con respecto al caso base. Esto se refleja en la Ilustración 26, donde se observa que con las pérdidas de ley y recuperación, el cobre fino disminuye en 6 kt pero con el aumento del tonelaje de alimentación se aumenta en 8.7 kt de fino, produciendo finalmente las 2,684 toneladas adicionales de cobre en este proceso.

Al analizar los sulfuros de baja ley que se están incorporando en el plan CuRec/t, se observa que 0.6 kt de éstos tienen valores OVR menores a 0 US\$/t, haciendo que se pierda valor al considerarlos. De esta manera se procede a regenerar el plan, pero enviando esos 0.6 kt al botadero. La Tabla 18 muestra la comparación del caso base con respecto a este nuevo plan CuRec/t.

Como resultado de este nuevo plan OVR mostrado en la Tabla 18 se tiene que el cobre fino adicional con respecto al caso base ahora es de 2,645 toneladas, y su desglose por proceso es:

- Fino adicional en Concentradora: 30 t.
- Fino adicional en Lixiviación de Óxidos: 577 t.
- Fino adicional en Lixiviación de Sulfuros: 2038 t.

Tabla 18: Comparación de plan Caso base y nuevo plan CuRec/t

			Caso Base	CuRec/t
Concentradora	CuT	%	0.95	0.95
	Recuperación	%	83.20	83.29
	Alimentación	dmt	132,038,400	132,038,400
Lixiviación de Óxidos	CuT	%	0.89	0.87
	CuS	%	0.59	0.58
	Recuperación	%	64.75	66.27
	Alimentación	dmt	20,787,900	20,787,900
Lixiviación de Sulfuros	CuT	%	0.50	0.48
	CuS	%	0.03	0.03
	Recuperación	%	25.37	24.34
	Alimentación desde Mina	dmt	58,795,001	66,902,513
	Alimentación desde Stocks	dmt	15,807,275	15,807,183
	Alimentación Total	dmt	74,602,276	82,709,696

La producción de fino adicional usando el criterio CuRec/t conlleva en 22.1 MUS\$ de beneficio adicional para el año fiscal 2018, o sea 0.4% de incremento con respecto al caso base, lo cual al desglosarlo por proceso se tienen los siguientes aportes:

- Beneficio adicional en Concentradora: 0.2 MUS\$
- Beneficio adicional en Lixiviación de Óxidos: 3.5 MUS\$
- Beneficio adicional en Lixiviación de Sulfuros: 18.4 MUS\$

5.3 Implementación de OVR en Ore Control y Corto Plazo

El presente capítulo tiene por finalidad mostrar la estandarización de cómo implementar Ore Value Ranking en las áreas de Ore Control y planificación de corto plazo de Minera Escondida, lo cual es resultado de interaccionar con ambas áreas y descubrir sus necesidades frente a la eventual implementación de OVR.

La Ilustración 27 expone el alineamiento entre planificación de mediano plazo con Ore Control y planificación de corto plazo. Este esquema propone que el área de planificación de mediano plazo sea el encargado de actualizar una vez al año los scripts, luego de emitir el plan quinquenal, ya que se usan datos provenientes de este plan. Una vez renovados los scripts se entregan a las áreas de Ore Control y planificación de corto plazo con el fin de que los utilicen para actualizar los modelos de bloques con los cuales ellos trabajan y así cuenten con las variables de Ore Value Ranking restauradas en función de la nueva información.

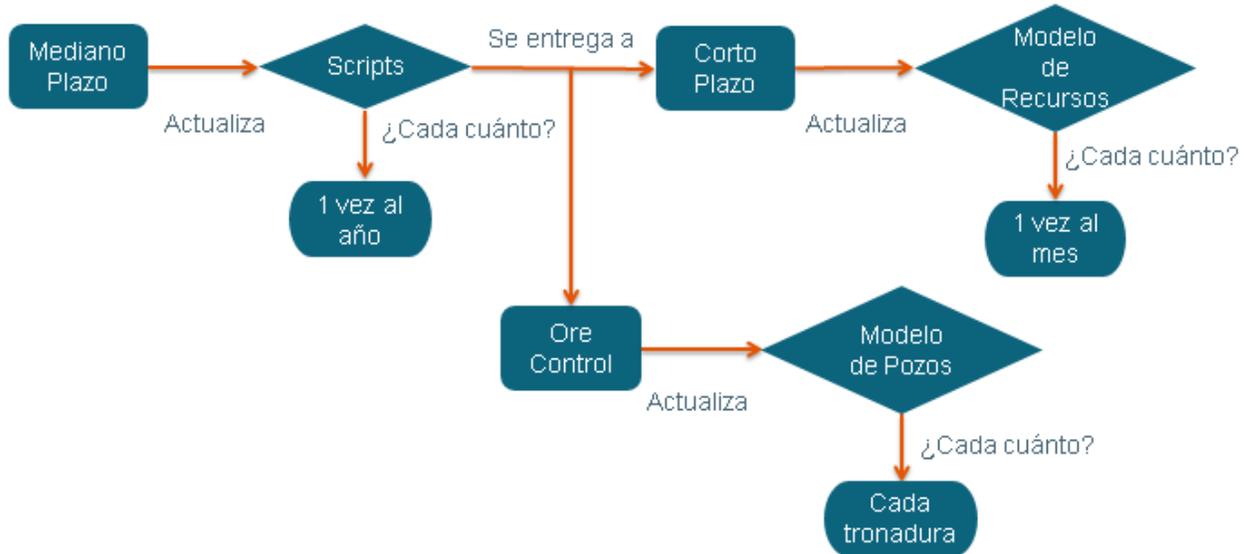


Ilustración 27: Esquema de alineación entre áreas con OVR

Planificación de mediano plazo deberá utilizar la siguiente información del plan quinquenal para actualizar los scripts:

- Modelo de productividad, el cual se obtiene con la metodología expuesta en el capítulo 4.1.
- Información de costos, específicamente los mostrados en la Tabla 3 del capítulo 4.2.

Hoy en día el área de Ore Control actualiza el modelo de bloques con el que trabaja, llamado Modelo de Pozos, con cada tronadura debido a que cada vez que ocurre una tronadura en Minera Escondida, esta área reestablece las leyes de su modelo de bloques con la información que obtiene de los pozos de tronadura. Desplegando las leyes y código de materiales de este modelo en Vulcan, es como trazan los polígonos de material. Es por esto que las variables OVR deben actualizarse con tanta frecuencia como se ha hecho con las leyes, para seguir con la misma metodología, pero

con la diferencia de que los polígonos ya no usarán las leyes para ser trazados sino que usaran las variables OVR (ya sea CuRec/t o US\$/t).

Actualmente el área de planificación de corto plazo recibe una vez al mes el modelo de bloques con el cual ellos trabajan, el cual se llama Modelo de Recursos, debido a esto es que es necesario que esta área al momento de recibir su modelo de bloques actualice las variables OVR con los scripts.

A continuación en la sección 5.3.1 y 5.3.2 se describe como deberían funcionar las áreas de Ore Control y planificación de corto plazo respectivamente, cuando se implemente la metodología Ore Value Ranking.

5.3.1 Estandarización en Ore Control

Actualmente Ore Control además de trazar los polígonos de material, se encarga de reconciliar las leyes de cobre mostradas en el modelo de bloques con lo que miden en los pozos de tronadura. Al implementar Ore Value Ranking en sus procedimientos se recomienda que además reconcilien las recuperaciones a los distintos destinos, para así evaluar la incertidumbre de esta variable a través del tiempo.

Tal como se muestra en el capítulo de antecedentes, Ore Control genera los polígonos de material con la intención de ser usados por planificación semanal. Su metodología actual consiste en usar la herramienta Vulcan para desplegar de forma espacial las leyes y los códigos de material (números que dicen si un material es óxido, sulfuro, mixto o parcial) y así delimitar áreas con su potencial destino, por ejemplo trazaran un polígono destinado a concentradora si es que está compuesto mayoritariamente por sulfuros de alta ley (sobre ley de corte operacional a planta). De esta forma planificación semanal puede trazar de forma operativa los polígonos de tronadura de la semana.

Con el nuevo método OVR, la forma de trazar los polígonos no será muy diferente, ya que es posible usar la misma herramienta Vulcan y continuar desplegando los códigos de material, pero con la diferencia de que se mostrarán las variables OVR en vez de las leyes, implicando lo siguiente:

- Como criterio de corte operacional no se usarán leyes, sino que valores de OVR, ya sea en US\$/t o CuRec/t.
- Como criterio de corte marginal, se usará cero en el caso de US\$/t o las leyes de corte marginal mostradas en la sección 4.4 para el caso de CuRec/t. De esta forma, las áreas con valor menor a estos cortes marginales serán polígonos de lastre.

La Ilustración 28, muestra cómo usando la herramienta Vulcan, Ore Control despliega las leyes y códigos de material y trazan los polígonos de material. Se puede observar concretamente que visualizar los criterios OVR no significará problema usando este software.

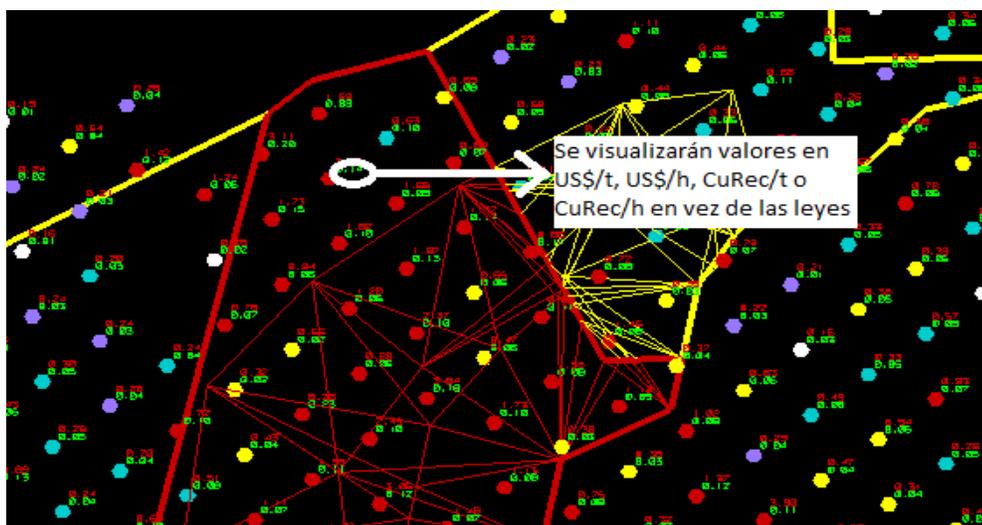


Ilustración 28: Forma de trabajo en Vulcan con OVR

5.3.2 Estandarización en Planificación de Corto Plazo

Esta área cuenta con softwares que funcionan con metodología de ranking, pero exclusivamente con el criterio de ley, para generar planes mineros. Se debe contar con un software que funcione con el mismo método, pero que sea compatible con los criterios CuRec/t y US\$/t, para que al ordenar por valor, se envíen los mejores CuRec/t o US\$/t a concentradora hasta copar su capacidad, luego los mejores sulfuros restantes en conjunto con los parciales se destinen a lixiviación de sulfuros y los mejores mixtos y óxidos se destinen a lixiviación de óxidos.

Si bien métodos como programación lineal son mejores para maximizar el valor, se recomienda continuar con la metodología de ranking en estas áreas más operativas debido a la eficiencia que requieren, ya que muchas veces se ven enfrentados a rediseñar sus planes frente a imprevistos operacionales y por rapidez se escogerán los mejores valores en vez de resolver un problema de programación lineal lo cual es mucho más lento y engorroso.

Además de acogerse a las exigencias de planificación de mediano plazo, corto plazo debe acogerse a la demanda de las plantas concentradoras, las cuales solicitan una alimentación sin mucha variabilidad de ley a lo largo del tiempo, de esta manera con la implementación de OVR el área debe encargarse de cumplir los valores en CuRec/t o US\$/t exigidos, pero procurando que no existan cambios significativos de ley de cobre entre un periodo y otro.

Los planes de corto plazo son una guía para planificación semanal, por lo tanto de la misma forma en que reciben metas en términos de Ore Value Ranking, deben entregar metas en CuRec/t o US\$/t a las áreas más operativas.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se recomienda que sea parte del estándar de Minera Escondida tener un informe de costos del plan quinquenal de rápido acceso para actualizar script de costos de manera eficiente.

Las leyes de corte marginal para los distintos tipos de material son diferentes y bastante menores al 0.3%, por lo tanto se recomienda que la empresa utilice curvas de beneficio con Ore Value Ranking para su cálculo, construyéndolas con material de baja ley, ya que estos tienen menores recuperaciones y menores costos de mina que los materiales de alta ley, de esta manera se tendrá mayor certidumbre de los valores reales de corte marginal.

Se destaca la importancia de OVR en el cálculo de leyes de corte marginal, ya que gracias a esta metodología es posible tener costos de mina diferenciados y así tener cálculos de beneficio mucho más realistas a cuando se consideran costos de mina constantes.

Los sulfuros primarios tienen una ley de corte marginal de 0.26%, pero al aumentar en 0.5 US\$/t el costo de capital de sustento, ya no es rentable procesar sulfuros primarios de ley menor a 0.3%. En cambio los sulfuros secundarios al tener una recuperación mucho mayor en la lixiviación de sulfuros tienen una ley de corte marginal mucho menor, de 0.13%, resistiendo altos costos de capital de sustento. Si en el plan quinquenal se hubieran considerado los sulfuros sobre estas leyes de corte marginal reales, se tendrían 305.8 Mt adicional a alimentar a las pilas de sulfuros.

La ley de corte marginal real del material mixto en el plan quinquenal es de 0.22% y de los óxidos es de 0.18%, implicando que 61.2 Mt pudieron destinarse a lixiviación de óxidos, pero se enviaron a botadero por tener ley inferior a 0.3%.

Si bien al calcular las leyes de corte marginal reales se obtiene un gran potencial en tonelaje de alimentación adicional, se recomienda generar un plan con la secuencia de extracción para saber cuánto material extra es posible de procesar realmente, evaluando las disponibilidades y capacidades de los distintos sistemas o eventuales expansiones a capacidades de transporte y procesamiento con sus costos de capital de sustento correspondientes.

Incorporar un modelo de costos de venta variable con la ley de concentrado y penalidades por arsénico y zinc, influye solo en un 0.65% del tonelaje de alimentación a la planta en el año fiscal 2018. Se recomienda completar el modelo con elementos pagables (oro y molibdeno) además de generar un plan usando el criterio OVR US\$/t con costo de venta variable y otro plan con el mismo criterio, pero con ese costo unitario fijo, de manera que se pueda saber el efecto económico.

Ore Value Ranking muestra el potencial económico que tiene procesar material mixto en la lixiviación de sulfuros, conviniendo por sobre las pilas de óxidos en un amplio rango de leyes, pero se recomienda evaluar la factibilidad química, estudiando la interacción de los sulfuros y material parcial al incorporar a las pilas este nuevo material.

Utilizar el criterio CuRec/t en el plan del año fiscal 2018, sin cambiar la secuencia de extracción original, solo destinando mejor, significa un aumento de 0.26% en el total de producción de cobre fino y en un incremento de 0.4% del beneficio económico total. Por lo tanto se recomienda generar plan modificando la secuencia de extracción para percibir beneficios aún mayores.

Es importante conocer las leyes de corte marginal reales al usar el criterio CuRec/t para no incorporar al plan materiales que resten beneficio económico.

En Minera Escondida el área de Ore Control cuenta con software compatible con Ore Value Ranking, en cambio el área de planificación de corto plazo no. Pero afortunadamente dentro de la empresa existe software de planificación capaz de generar planes de corto plazo usando OVR, el cual es exitoso con el criterio CuRec/t, sin embargo se sugiere mejorar para el criterio US\$/t, ya que no funciona bien.

Cuando se cuente con herramienta para generar planes con US\$/t se invita a evaluar los beneficios de este criterio contrastados con la incertidumbre que adiciona, puesto que en su valorización incorpora variables no controladas, como los son el precio del cobre y los costos de combustible, para ello una forma de estudiarlo es hacer un análisis de sensibilidad del beneficio en función de un rango de fluctuaciones de precio y costo del combustible y así estimar una varianza asociada.

Se debe evaluar la posibilidad de que Ore Control reconcilie recuperaciones además de leyes, ya que permitiría evaluar la certidumbre en las valorizaciones de Ore Value Ranking.

Para lograr una implementación real de Ore Value Ranking en Minera Escondida es necesario una correcta gestión de cambio, por lo tanto en esa dirección se recomienda continuar mostrando a los equipos, a través de una buena comunicación efectiva, los beneficios y potenciales usos que tiene OVR, tal como se hizo con Ore Control, ya que en etapas iniciales de una transformación es importante mostrar la finalidad del cambio a los equipos y que se sientan comprometidos con la estrategia de la empresa. Una vez logrado esto se debe continuar con proporcionar los elementos tangibles para la implementación, tales como softwares compatibles con OVR, capacitaciones del personal, fijar metas y plazos de implementación. Finalmente se recomienda evaluar los costos de implementación de OVR para saber cuál será su aporte real en el negocio.

7. BIBLIOGRAFÍA

- King, B. (1999). *Cash Flow Grades - Scheduling Rocks with Different Throughput Characteristics*. Perth.
- Lane, K. (1988). *The Economic Definition of Ore - Cut-off Grades Theory and Practice*. Londres: Mining Journal Books Limited.
- Pereira, I. M. (2013). *Valores de Corte Multivariable en Planificación Minera*. Santiago: Memoria Universidad de Chile.
- Billiton, B. (2017). *Sobre Minerals Americas*. Obtenido de <http://www.bhp.com/espanol/negocios/minerals-americas>
- Maksaev, V. (2015). *Catédra de Procesos Supérgenos*. Santiago: Curso GL4401-1 Universidad de Chile.
- Vargas, M. (2007) *Modelo de Planificación Minera de Mediano y Corto Plazo Incorporando Restricciones Operacionales y de Mezcla*. Santiago: Tesis de Magister Universidad de Chile.
- Morales, C. & Rubio, E. (2010), *Development of a mathematical programming model to support the planning of short-term mining*, Proc. of the 34th Intern. Symp. on Application of Computers and Operations research in the Mineral Industry (APCOM), Vancouver, Canada.
- Smith, M. L., (1998). *Optimizing short-term production schedules in surface mining: Integrating mine modeling software with AMPL/CPLEX*. International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, 12, p.149-155.