



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS

**ESTIMACIÓN DE VOLUMEN Y LEY DE MINERAL REMANENTE EN
PANEL CAVING**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

JORGE BARAQUI SCHWARZE

SANTIAGO DE CHILE

2012



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS

ESTIMACIÓN DE VOLUMEN Y LEY DE MINERAL REMANENTE EN PANEL CAVING

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

JORGE BARAQUI SCHWARZE

**PROFESOR GUÍA:
ENRIQUE RUBIO ESQUIVEL**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
BRUNO BEHN THEUNE
JAIME CHACÓN FERNÁNDEZ**

**SANTIAGO DE CHILE
2012**

Resumen

La principal función de la planificación de corto plazo es definir el programa de producción que sustente el presupuesto de operación de una mina a nivel trimestral o anual. Este programa debe ser factible de ejecutar bajo las condiciones actuales de operación, de modo que el costo de operación del periodo planificado se cumpla con la menor desviación posible. En la minería de Panel Caving este plan de producción se basa en la secuencia de hundimiento, capacidades de acarreo y estados operacionales definidos por el plan de mediano plazo. Es así como la planificación de corto plazo debe hacerse cargo de una serie de desviaciones constitutivas del plan que sustenta la vida de la mina tales como retrasos en preparaciones mineras, disponibilidad física de infraestructura de producción, reparación de áreas productivas, entre otros. El objetivo de esta memoria de título es diseñar una metodología que permita incorporar minerales marginales y remanentes al evaluar el cierre de los puntos de extracción, de manera de alcanzar las metas productivas establecidas en los planes de largo plazo. Esta memoria se basa en la metodología de estimación de recursos remanentes diseñada e implementada en la División El Teniente de Codelco Chile.

La metodología consiste en estimar los recursos remanentes en una columna de extracción a partir de las muestras extraídas en el punto de extracción y el modelo de reservas, de manera de realizar una interpolación lineal entre ambas leyes, el segundo paso consiste en incorporar los recursos marginales o de “sobre extracción” en los planes de corto plazo sensibilizando la ley de cierre de puntos a diferentes criterios de corte marginal. Esta metodología se aplica a la mina Esmeralda de la División El Teniente obteniéndose una estimación de recursos disponibles adicionales al programa de producción del año. A partir de estos recursos el plan de producción se construye integrando los recursos re estimados, haciendo frente a los siguientes problemas operacionales: Menor área disponible por atrasos en la incorporación, colapsos en nivel de producción, fallas en infraestructura de manejo de materiales, etc. De no incorporar estos recursos remanentes la oferta de cobre fino para el año se habría visto disminuida, afectando el cumplimiento del programa de producción.

Se concluye que esta metodología es factible desde el punto de vista técnico económico de ser utilizada para estimar recursos marginales a incorporar en los programas de corto plazo con el objetivo de hacer frente a eventos operacionales no considerados en los planes de producción de largo plazo. Se recomienda incorporar una tasa menor a 15% del plan de producción como recursos marginales remanentes, para evitar fuertes desviaciones en la ley.

Agradecimientos

A mi paciente esposa Elizabeth y mis hijos Sofía del Rosario y Jorge Andrés.

A mis padres, Jorge y Astrid.

Mis hermanos, Astrid, Francisco y en especial a Claudia (QEPD).

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1	Introducción	1
1.1	Objetivos.....	1
1.2	Alcances	2
1.3	Metodología.....	2
2	Enfoque conceptual de la planificación minera.....	4
2.1	Planificación minera estratégica.....	5
2.2	Planificación minera táctica.....	6
2.3	Horizontes de planificación de minas.....	6
2.4	Atributos del proceso de planificación minera.....	7
2.5	Carácter iterativo e interactivo del proceso de planificación minera.....	8
2.6	¿Por qué se planifica una mina?	9
3	Planificación minera en División El Teniente	11
3.1	Planificación minera de largo plazo.....	11
3.1.1	Horizonte de planificación	12
3.1.2	Variables y parámetros de planificación más relevantes	12
3.1.3	Información de salida de los planes mineros	12
3.2	Planificación minera de mediano plazo	13
	Horizonte de planificación.....	13
	Variables y parámetros de planificación más relevantes:.....	13
	Planes y documentos emitidos	13
3.3	Secuencia de planificación de Largo-Mediano Plazo.....	14
3.3.1	Planificación minera de corto plazo.....	16
	Horizonte de planificación.....	17
	Variables y parámetros de planificación más relevantes.....	17
	Planes y documentos emitidos:	17
3.3.2	Control producción mina.....	18
	Horizonte de planificación.....	18
	Variables y parámetros de planificación más relevantes:.....	18
	Planes y documentos emitidos:	19
	Las salidas de los planes muestran los siguientes datos:	19
3.3.3	Secuencia de planificación de corto plazo (situación actual).....	19
3.4	Dilema de la planificación de corto plazo.....	23

4	Metodología de estimación recursos marginales – Corto Plazo	26
4.1	Metodología para la estimación de leyes en puntos con sobre extracción	26
4.1.1	Calibración inicial	30
4.1.2	Aplicación de alcance y validación.....	32
4.1.3	Reconstitución de la columna extraída banco a banco.....	34
	Recopilación de antecedentes.....	34
	Generación de la muestra compositada por banco	35
4.1.4	“Columna Ajustada” según los muestreos históricos	36
	Desviación simple.....	38
	Covarianza normalizada	39
	Tolerancia.....	41
4.1.5	Algoritmo (Asignación de ley a los bancos futuros a extraer)	41
4.1.6	Alcance de la estimación.....	44
5	Incorporación de recursos marginales en la planificación de corto plazo.....	51
5.1	Alcance del estudio.....	51
5.2	Introducción a la subrutina LSQ	52
5.2.1	Definición de reservas extraíbles para el corto plazo.....	52
5.2.2	Evaluación económica columnas de extracción.....	53
	Conclusiones y recomendaciones	57
6	Bibliografía	59
7	Anexos	60
7.1.1	Generación del modelo de reservas.	60
	Modelo de bloques	60
	Criterio ley de corte.....	63
	Criterio agotamiento de puntos.....	66

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Análisis de la desviación simple como función de la covarianza normalizad	31
Gráfico 2. Extracción histórica de los periodos 2001-2004	32
Gráfico 3. Validación del método LSQ para la estimación de la ley para el año 2004 del sector Esmeralda.....	33
Gráfico 4. Reconciliación ley de Cu.....	38
Gráfico 5. Grafico de desviaciones simples.....	39
Gráfico 6. Análisis de la desviación simple como función de la covarianza normalizada.	41
Gráfico 7. Sensibilización del ancho de bandas para el sector Esmeralda.....	44
Gráfico 8. Alcance preliminar observado de la estimación del sector Esmeralda, Año 2004.	45
Gráfico 9. Frecuencias consumo de bancos anual de los puntos de extracción.....	46
Gráfico 10. Aporte sobre extracción sector Esmeralda, Año 2005.....	57
Gráfico 11. Ley calculo ley Cu con modelos de estimación, tonelaje real 2005.....	58

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Planes y documentos Planificación Mediano Plazo.	14
Tabla 2. Planes y documentos Planificación Corto Plazo.	17
Tabla 3. Covarianza normalizada umbral y número de columnas re estimadas.	31
Tabla 4. Sensibilización del N° de muestras compositadas por banco.	42
Tabla 5. Simulación de Leyes estimadas año 2004.	44
Tabla 6. Alcance Preliminar observado de la estimación del sector Esmeralda, Año 2004... ..	45
Tabla 7. Frecuencias consumo de bancos anual de los puntos de extracción.	46
Tabla 8. Velocidad de extracción punto 2 33H.	49
Tabla 9. Velocidad de extracción punto 4 32F.	49
Tabla 10. Velocidad de extracción punto 6 28H.	50
Tabla 11. Diluyentes de sectores agotados sobre Esmeralda.	52
Tabla 12. Factor de esponjamiento de acuerdo al tipo de fragmentación.	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Proceso de Planificación Minera Estratégica.	5
Figura 2. Proceso de Planificación Minera	8
Figura 3. Diagrama Plan Anual Preparación, Preparación Mina.	21
Figura 4. Esquema de comparación de leyes entre muestras y modelo diluido para una columna.	26
Figura 5. Ejemplo formato carga información.	27
Figura 6 Esquema de estimación de leyes basado en una regresión lineal de las muestras compositadas.	28
Figura 7. Aplicación de LSQ para una columna de extracción.	29
Figura 8. Cotas mínimas y máximas para la re estimación de bancos basado en la regresión lineal.	30
Figura 9. Cambio de formato de los muestreos históricos mediante ponderación por tonelajes.	36
Figura 10. Comparación y posterior ajuste de la columna Extraída.	37
Figura 12. Esquema de la regresión lineal y sus condiciones de borde.	42
Figura 12. Punto 2 33H.	48
Figura 13. Punto 4 32F.	49
Figura 14. Punto 6 28H.	50
Figura 15. Sectores agotados sobre Esmeralda.	52
Figura 16. Caso N° 3.	53
Figura 17. Gráfico de valores actualizados netos por punto de extracción v/s número de bancos	55
Figura 18. Esquema explicativo determinación altura económica extraíble para el Corto Plazo.	56
Figura 19. Déficit de producción de área.	58
Figura 21. Variación de Leyes en la Columna Económica Extraíble.	64
Figura 22. Explicación del algoritmo de Lane.	65

1 Introducción

La División El Teniente, realiza la planificación de la extracción de mineral en distintos horizontes de tiempo. El proceso comienza con la planificación de Largo Plazo donde se generan los planes de negocio de la División para los próximos veinte o más años, llegando hasta la planificación de Corto plazo, instancia en que se definen los planes de producción mensuales, semanales y diarios.

Una de las principales definiciones en la planificación de Largo Plazo es la estimación de reservas mineras. Para esto se utiliza un criterio de optimización que incorpora los conceptos de costo de oportunidad. Una serie de parámetros operacionales, tanto de la mina como de la planta concentradora, son incorporados en este proceso de modo de alcanzar un resultado aplicable a las condiciones actuales de operación. Como resultado de este proceso, se entrega el volumen de reservas a extraer en cada periodo, caracterizado por tonelaje y ley.

Sin embargo, en el momento que la extracción se va a realizar, los parámetros y condiciones operacionales suelen diferir de aquellas consideradas inicialmente en la planificación de Largo Plazo. De esta manera, la operación minera se ve obligada a extraer el mineral de un volumen cuya geometría es diferente a la definida en el plan de Largo Plazo. Esto motiva la generación de planes de Corto Plazo cuyo objetivo es minimizar las diferencias con el plan de Largo Plazo dada las condiciones actuales de operación de la mina.

Como se dijo anteriormente, las diferencias radican principalmente en la geometría del macizo de roca disponible para realizar la extracción, lo que normalmente motivará a modificar las leyes del mineral que se alimentará a la planta concentradora.

Dicho lo anterior, lo que motiva el presente estudio es la definición de una metodología para la estimación de recursos a incorporar en los planes de Corto Plazo que permitan minimizar la varianza entre la meta propuesta por el plan de Largo Plazo con la situación operacional actual de la mina, tales como área disponible, infraestructura y recursos disponibles.

1.1 Objetivos

El objetivo general de esta memoria es desarrollar una metodología de estimación y análisis de recursos mineros a incorporar en los planes de producción de corto plazo, de modo de

minimizar la varianza entre la promesa productiva de largo plazo con la situación operacional actual de la mina.

Los objetivos específicos de esta memoria se listan a continuación;

- Estimación de recursos incorporando leyes de muestreo de puntos de extracción.
- Calibración y validación del método de estimación de recursos.
- Estimación de alturas económicas incorporando el nuevo modelo económico de Corto Plazo
- Implementación de la metodología propuesta en la planificación de corto plazo para la generación de planes anuales y proyecciones trimestrales.

1.2 Alcances

El alcance de este trabajo es implementar una nueva metodología de evaluación de recursos mineros denominada LSQ (Less Square), el cual utiliza una regresión lineal de las muestras obtenidas en la operación para la estimación de aquellos recursos a incorporar en el plan anual minero.

Esta metodología se implementará en la Mina Esmeralda de División El Teniente, en un plan de producción del año 2005.

La validación se realizará con los resultados obtenidos durante el año 2005 concordante con el plan de producción generado.

1.3 Metodología

Se comenzará con una revisión bibliográfica de los conceptos de planificación minera, para luego describir los criterios y metodologías de los diferentes horizontes de planificación utilizados en División El Teniente.

Identificar y describir la problemática de la planificación de largo plazo cuyos efectos se observan en la planificación de corto plazo.

Se identificarán las vulnerabilidades y los espacios de mejora en la planificación de corto plazo, proponiendo una metodología para abordar y presentar una solución a estas

vulnerabilidades. En esta etapa, se realizará un análisis teórico de los conceptos utilizados en la metodología propuesta en el presente trabajo.

Se realizará una calibración del estimador de ley de CuT para cada una de las unidades productivas involucradas en el plan minero, contrastando el ajuste de este estimador con datos reales de producción del año 2004.

Finalmente, se utilizará esta metodología para la elaboración del plan de producción del año 2005, utilizando las herramientas PC-BC y LSQ de Gemcom.

2 Enfoque conceptual de la planificación minera

La planificación minera se define como el proceso de ingeniería de minas mediante el cual se define el cómo, cuándo y qué minerales se extraerán de la mina de modo de cumplir con los lineamientos estratégicos de la compañía (Trout, 1995). Varios autores han establecido que el plan minero, como resultado del proceso de planificación, es un documento bancable que permite establecer el valor de un determinado proyecto minero (Rubio, 2005; Page, 2000). Por lo tanto, el plan minero debe reflejar las características intrínsecas del negocio, tanto desde el punto de vista de las características financieras como tecnológicas.

En el caso de la industria minera, la planificación debe tener en cuenta ciertas características, tales como:

- Recursos finitos y no renovables.
- Alto costo de capital.
- Largo tiempo en la concreción y desarrollo de un proyecto minero.
- El negocio se beneficia sobre las características propias del recurso.
- Constante innovación en tecnología y gestión.
- El precio de los recursos es de características cíclicas en el tiempo.
- Incertidumbre en cuanto a calidad y cantidad de los recursos.

La estrategia de consumo de recursos, que en definitiva caracteriza un determinado plan de producción minero, se basa en modelos fundamentales de comportamiento del macizo rocoso al interior del sistema minero (Hustrulid, 2000). Algunos de los modelos utilizados en el proceso de planificación minera son: modelo de recursos geológico, modelo geotécnico, modelo de comportamiento ambiental, y modelo financiero. La integración de estos modelos fundamentales con los objetivos estratégicos de la compañía define en el plan minero los siguientes aspectos relacionados con el negocio minero:

- Métodos de explotación
- Métodos metalúrgicos
- Infraestructura de producción
- Programa de producción
- Otras.

A continuación se describirán con mayor detalle los modelos que sustentan el proceso de planificación minera.

2.1 Planificación minera estratégica.

La Planificación minera estratégica es una planificación conceptual mediante la cual se definen las variables de decisión que determinan en gran medida el valor del negocio minero. Su objetivo es determinar el máximo valor económico del negocio a través del análisis de diferentes alternativas de explotación. De esta manera, las variables más relevantes a definir son el método de explotación, ruta de proceso, escala de operación, límite final, secuencia minera y variables de selección. Estas definiciones deben ser revisadas en el tiempo de acuerdo a los cambios internos y externos en las condiciones del negocio.

El resultado del proceso de Planificación Minera Estratégica es un conjunto de macro decisiones que son controlables por el planificador y que inciden en el valor del negocio. El conjunto de estas decisiones se les denomina estrategia de consumo del recurso. Este nombre es congruente con el hecho de que estas decisiones permiten definir el como y cuando será extraída cada porción del recurso dado los objetivos estratégicos de la empresa.

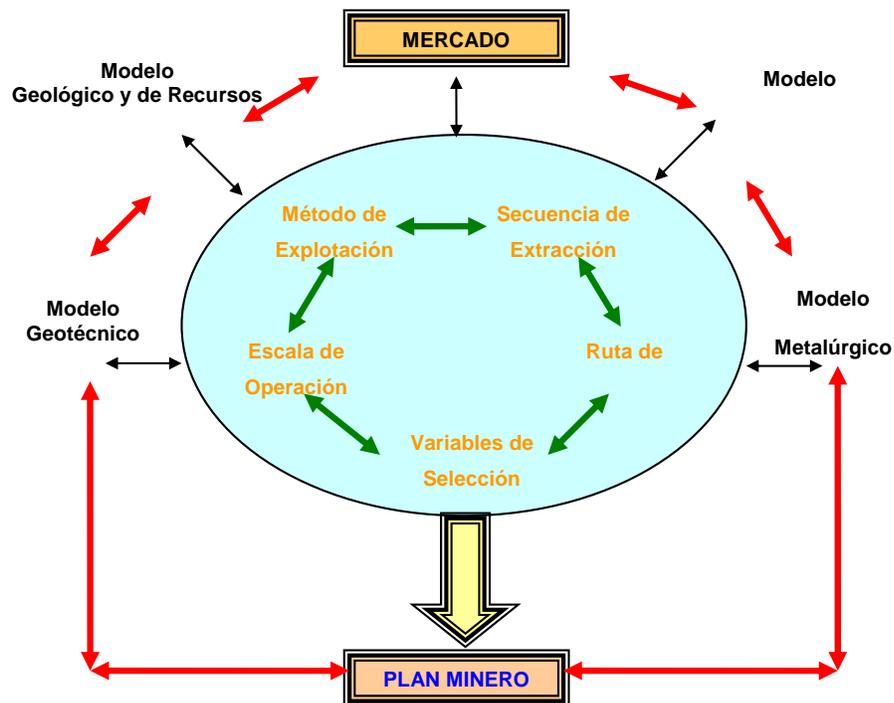


Figura 1. Proceso de Planificación Minera Estratégica¹.

¹ Fuente: Guías Corporativas de Planificación Minera 2003.

2.2 Planificación minera táctica.

Es la instancia en la que se materializa la planificación estratégica en acciones concretas definidas en el tiempo. Incorpora constantes revisiones y optimizaciones de las operaciones unitarias y procesos que mejoran los resultados planificados en la etapa estratégica.

El objetivo de la Planificación Minera Táctica es concretar las definiciones hechas en la etapa estratégica. Para ello, se desarrollan líneas de acción que hagan posible la planificación en periodos de tiempos fijos la extracción del recurso, en base a las condiciones de borde impuesta en la etapa anterior.

El esfuerzo en la planificación táctica radica en incorporar mejoras en las operaciones unitarias y de apoyo, tanto en la mina como en la planta, mejorando la eficiencia de las operaciones y sus costos asociados. El impacto en la rentabilidad del negocio no es tan alto como en la etapa estratégica, pero despliega los recursos existentes de manera eficiente.

El estado de información con que cuenta la planificación táctica permite construir planes mineros con cálculos más precisos en cuanto a costos y rendimientos de los equipos e instalaciones. En el corto plazo, las estimaciones de precio del producto e insumos serán más cercanas a la realidad. Por lo tanto, al definir periodos de planificación de distinta duración, es posible trabajar con la información más precisa para los primeros años del plan y estimaciones más holgadas para los años finales. Esta división en el horizonte de planificación trabaja con el grado de reconocimiento del recurso comprometido, acotando la variabilidad del resultado.

2.3 Horizontes de planificación de minas.

La Planificación de Minas puede tener tres enfoques. Se asocia a la flexibilidad con que se cuenta, el grado de incertidumbre respecto a la calidad de información de los recursos, el nivel de ingeniería que se ha desarrollado, o el ámbito de acción en que se encuentra la planificación.

El paso del tiempo se asocia a la flexibilidad con que se pueden variar y estructurar las distintas decisiones que se toman en la planificación. En este contexto, se definen la Planificación de Corto, Mediano y Largo Plazo.

- Planificación de Largo Plazo: toma en cuenta un horizonte de planificación que abarca toda la vida de la mina. El análisis es más flexible al considerar los parámetros de diseño como variables en el tiempo. Por lo mismo, es posible corregir las fechas

definidas previamente a medida que la información mejora la precisión de las estimaciones.

- Planificación de Mediano Plazo: está inserto en el Plan de Largo Plazo y comprende un periodo de tiempo acotado. Debe ajustarse a aquellas definiciones hechas anteriormente y aquellos objetivos del periodo. Existen parámetros fijos que han sido definidos anteriormente y otros que son variables, entre ciertos rangos, acotados por la Planificación de Largo Plazo.
- Planificación de Corto Plazo: la flexibilidad de este plan es la menor de los tres, ya que una cantidad de recursos está comprometida por los planes anteriores. Además que el tiempo que los define condiciona el tipo de decisiones y acciones que se pueden tomar.

2.4 Atributos del proceso de planificación minera.

Para asegurar que el proceso de planificación minera esté acorde con la realidad, ésta debe ser:

- Coherente: en cuanto a estar en armonía plena y permanente entre la estrategia de producción (Corto, Mediano y Largo Plazo) y el marco estratégico de la empresa. En consecuencia, los planes mineros deben considerar, para llegar al objetivo, las restricciones técnicas y económicas que imponga el mercado (precio, productos), las que definan los propietarios de la empresa (Disponibilidad de recursos humanos, tecnológico) y finalmente las condiciones del yacimiento (geología, geomecánica, geometría).
- Sistémico: el Plan Minero de producción es el resultado de un proceso iterativo y que se retroalimenta continuamente. Para ello es necesario verificar las diferentes instancias relacionadas con el proceso al interior de la empresa. Las interacciones entre las variables de decisión se deben tener en cuenta para lograr un resultado coherente con la misión empresarial. Este atributo se refiere especialmente a la relación entre la Planificación Estratégica y Táctica.
- Dinámico: las tareas realizadas por la planificación están soportadas en la estimación de numerosas variables relevantes para un periodo de tiempo dado, siendo necesario revisar su generación constantemente, de manera que asegure su validez, teniendo

en cuenta los diferentes horizontes de planificación que se discuten y deciden durante el proceso.

2.5 **Carácter iterativo e interactivo del proceso de planificación minera.**

Una cualidad del proceso de planificación es su carácter iterativo e interactivo. El carácter iterativo del proceso se observa en:

- Ideas iniciales que se usan para fijar ciertos parámetros y para obtener resultados que posteriormente son evaluados para decidir su implementación o no.
- Otras veces, se decide estudiar alguna variable en particular y observar su efecto en el conjunto. Dependiendo de los resultados se puede rechazar o enviar a las etapas de estudio siguiente.

Mientras que su carácter interactivo se observa en dos ámbitos:

- El ajuste de alguna variable que afecta la definición del conjunto y el resultado.
- A medida que el estudio es más detallado será necesario revisar constantemente los supuestos que definen el plan propuesto para ser consistente con él.

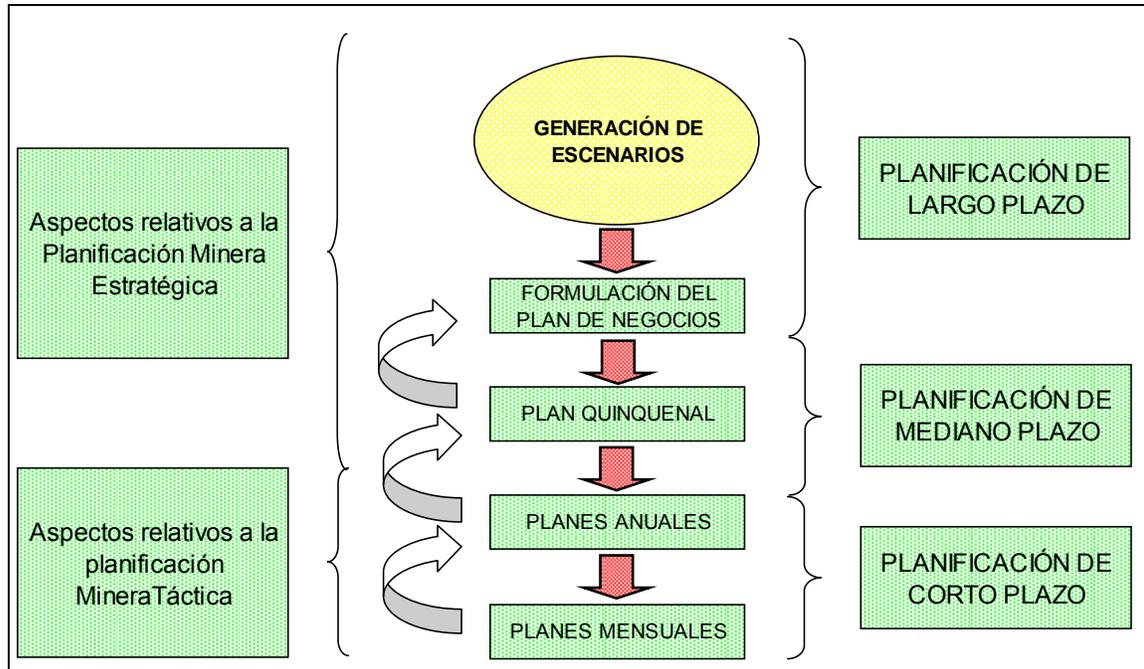


Figura 2. Proceso de Planificación Minera²

² Fuente: Elaboración Propia.

Determinar el valor económico del recurso y su variabilidad requiere de información cada vez más precisa, tanto del propio recurso minero como del diseño de ingeniería. Sin embargo, la variabilidad del resultado siempre permanece, debido a que las variables que determinan su valor son en función del tiempo. Por ejemplo, el nivel de reconocimiento de un cuerpo mineralizado se irá haciendo más preciso a medida que se ejecuten las distintas tareas de exploración que se programen, por lo que se traduce en tiempo. Por esta razón, es vital la retroalimentación que puede aportar la Planificación de Corto Plazo con respecto a la información de la calidad de los recursos obtenida de los muestreos periódicos y las condiciones actualizadas de la operación en la mina. Esta retroalimentación es recibida por la Planificación de Mediano Plazo que a su vez retroalimenta a la Planificación de Largo Plazo estableciendo un proceso iterativo para generar los planes mineros.

Definir buenos conceptos implica tiempo y estudio de la realidad del recurso, el ambiente en que se desarrolla la actividad y las tecnologías disponibles, entre otros. De esta manera, la combinación que de ellas se haga permitirá perfeccionar las ideas iniciales, ver su factibilidad y acotar sus resultados.

2.6 ¿Por qué se planifica una mina?

Se planifica una mina para poder transformar un yacimiento en un negocio de acuerdo a las políticas estratégicas del dueño. Para cumplir con estos lineamientos se elabora un plan que establezca una secuencia de acciones que apunte a conseguir los objetivos estratégicos del dueño, denominado "Plan Minero".

Sin embargo, como el nivel de incertidumbre de la calidad de los recursos y el precio del metal varía en el tiempo, es necesario realizar este plan en distintos horizontes de tiempos y de ahí se generan las planificaciones de corto, mediano y largo plazo.

La planificación que mejor interpreta los intereses establecidos por el dueño es la Planificación de Largo Plazo y su criterio al planificar es el de Costo de Oportunidad; o sea, "lo que se puede dejar de ganar al no explotar determinados recursos".

Como los primeros años representan entre el 30 a 40% del valor económico del plan, es necesario que se planifique con un mayor nivel de certeza en lo que respecta a precios del metal e información de calidad de los recursos. Por esto, es necesario realizar una Planificación de Mediano Plazo en donde sus parámetros y variables más relevantes tiene que ver con la infraestructura y capacidad.

Existe un margen entre metas establecidas en la Planificación de Mediano Plazo y lo que produce diariamente un yacimiento, debido a que en la Planificación de Mediano Plazo las variables más relevantes no son de tipo operacional debido al horizonte de tiempo en el que se enmarca dicha planificación. Por esta razón es necesario realizar una Planificación de Corto Plazo que considere a las variables operacionales como las más relevantes y que construya planes de producción más cercanos a la real capacidad productiva, pero siempre apuntando a las metas establecidas por la Planificación de Mediano Plazo.

3 Planificación minera en División El Teniente

La planificación de minas de la División El Teniente es desarrollada en sus distintas instancias en la Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo, específicamente en las superintendencias de Planificación Minero-Metalúrgica y Gestión Producción.

La planificación de Largo y Mediano Plazo es desarrollada en la Superintendencia de Planificación Minero-Metalúrgica. En cambio, la planificación de Corto Plazo es desarrollada en la Superintendencia de Gestión Producción.

En el Área de Planificación de Corto Plazo se realizan los planes anuales y en la Unidad de Control Producción se realizan los Planes Mensuales, ambas pertenecientes a la Superintendencia de Gestión Producción.

3.1 Planificación minera de largo plazo.

Es aquella que se hace cargo de definir una estrategia productiva que permita “la maximización y uso eficiente de los recursos minerales de acuerdo a las estrategias del dueño”. En este caso, el objetivo del dueño es maximizar los excedentes económicos para el estado de Chile.

Entre sus responsabilidades se pueden mencionar las siguientes:

- Definir la envolvente económica del yacimiento.
- Definir una macro secuencia ordenada de la extracción de los sectores productivos durante la vida útil de la mina (incorporación de área, cierre de área agotada).
- Elaborar el plan de preparación para la vida útil de la mina como estrategia.
- Elaborar y definir el plan de producción para la vida útil de la mina como resultado de la estrategia.
- Evaluación económica del plan.

3.1.1 Horizonte de planificación

El horizonte de planificación del área planificación mina largo plazo es igual a la vida útil de la mina. Según el PND 2004 (Plan de Negocios y Desarrollos) este horizonte alcanza los 50 años, pero puede ir variando a través del tiempo de acuerdo a:

- Exploraciones que pueden encontrar nuevos cuerpos mineralizados que pueden aumentar la vida útil de la mina.
- Variaciones de los precios de los metales pueden aumentar o disminuir la vida útil de la mina.

3.1.2 Variables y parámetros de planificación más relevantes

- Orientaciones comerciales (precio, tasa de descuento, costos, etc.).
- Restricciones geomecánicas (velocidad de extracción, distancias y ángulos permisibles).
- Condiciones geológicas (litología, estructuras).
- Estado inicial de los procesos productivos (diseño).
- Restricciones ambientales.
- Tasa de crecimiento.
- Tasa de incorporación de área.

3.1.3 Información de salida de los planes mineros

- Programa de producción (Leyes de Cu, Mo, As; tonelajes anuales por sector; tonelaje de fino).
- Programa preparación de las minas (construcciones y fortificaciones).
- Programa de plantas de procesamiento (WI, recuperaciones, tonelaje procesado por planta, leyes de concentrado).

3.2 Planificación minera de mediano plazo

Es aquella que se focaliza en los primeros cinco años del plan de largo plazo en donde éste debe ser soportado y optimizado. Entre sus responsabilidades se pueden mencionar las siguientes:

- Recepción y actualización de información de la mina.
- Realizar proyecciones de preparación mina.
- Proponer, producto del Plan de Preparación Mina, el Plan de Producción.
- Elaborar un plan de estudio de Ingeniería de los diseños y parámetros de planificación, donde se analizan los compromisos de largo plazo v/s las proyecciones de producción. En este punto resulta la toma de decisiones en cuanto a sectores de contingencia.
- Comprometer un plan para el largo plazo.

Horizonte de planificación

El horizonte de planificación del área Planificación Mina Mediano Plazo es igual al primer quinquenio del plan minero de largo plazo. Esto se debe a decisiones corporativas dado que los primeros cinco años sustentan económicamente entre un 30-40% del valor económico del plan.

Variables y parámetros de planificación más relevantes:

- Tasa de incorporación de área (m²/mes).
- Velocidad de extracción.
- Disponibilidad y utilización de área.
- Tasa de producción máxima.

Planes y documentos emitidos

El plan anual de preparación mina (REV. A) es el que sustenta al programa anual de producción (REV.0) .Ambos son emitidos por Planificación Mina Mediano Plazo y entregan parámetros que pueden definir el presupuesto anual para la División. Además, el plan de

producción asume los compromisos de venta con la Vicepresidencia de Comercialización en Santiago.

	REV. A	REV. 0	Plan Quinquenal
CONTENIDO	Plan Anual de Preparación Mina Incluye: -Metros desarrollados. -Construcciones Mineras tales como (chimeneas piloto, bateas, carpetas de rodado, fortificación, pilares a socavar). -Parámetros que pueden definir presupuesto.	Plan Anual de Presupuesto Incluye: -Cartera de productos a la venta(cantidad de ánodos, cantidad de RAF, cantidad de cátodos, cantidad de concentrado de Cu y Mo, cantidad de H2SO4. -Parámetros que pueden definir presupuesto.	Incluye el Plan de Preparación Mina y de Producción para los primeros cinco años del Plan de Largo Plazo.
FECHA EMISION	Septiembre de cada año.	Septiembre de cada año.	No se emite y pasa directamente a formar parte del PND.

Tabla 1. Planes y documentos Planificación Mediano Plazo.

Información de salida

- Programa de producción (Leyes de Cu, Mo, As; tonelajes mensuales por sector; tonelaje de fino).
- Programa preparación de las minas (construcciones y metros desarrollados).
- Programa de plantas de procesamiento (WI, recuperaciones, tonelaje procesado por planta, leyes de concentrado, ley de especies mineralógicas).

3.3 Secuencia de planificación de Largo-Mediano Plazo.

1. La primera etapa consiste en la recopilación de las bases de planificación con el objetivo de actualizar los modelos que intervienen en el proceso, tales como:
 - a. Misión Corporativa y orientaciones comerciales dictadas por la Casa Matriz.
 - b. Directrices divisionales (misión, visión y objetivos), además de las políticas ambientales, calidad y seguridad dictadas por la Gerencia General.
 - c. El Modelo de Recursos Geológicos (Insitu) aportado por la Superintendencia de Geología a través de una base de datos llamada ORACLE.

- d. El Modelo de Bloques del material quebrado.
 - e. El Modelo Geotécnico que incluye parámetros y consideraciones geomecánicas que es aportado por la Superintendencia de Geomecánica perteneciente a la Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo.
 - f. Los modelos de tratamiento de mineral y productos comerciales aportados por Planificación Planta y Fundición Largo Plazo, perteneciente a la Superintendencia Minero-Metalúrgica.
 - g. La Gerencia de Plantas y de Fundición colabora con el plan de mantenciones, restricciones operacionales y la base de datos de operación.
 - h. Información actualizada de muestreos y de la producción en cuanto al estado e incorporación de áreas. Esta información es otorgada por la Superintendencia Gestión Producción a Planificación Mediano Plazo.
 - i. Información de los nuevos proyectos divisionales otorgada por la Gerencia de Proyectos.
 - j. Información actualizada de índices operacionales otorgados por la Gerencia de Minas.
2. Se comienza a elaborar el PEX en donde se analizan todos los posibles escenarios de negocio y explotación, definiendo la envolvente de explotación y la secuencia de extracción mina.
- a. En primer lugar se toma la base de datos proveniente de Geología (ORACLE) para hacer una caracterización del Modelo de Bloques, considerando el material insitu y quebrado mediante el software GEMCOM, limitando de esta manera los sectores a explotar durante la vida útil de la mina.
 - b. Posteriormente se somete la información, mediante el software Minescape, a un cambio de soporte desde una malla de UBC (unidades básicas de cubicación) a una malla de polígonos de extracción.
 - c. Luego el software X-SIP, mediante una de sus subrutinas, aplica el modelo de dilución a las reservas insitu.
 - d. El siguiente paso es determinar la altura económica extraíble de las columnas mediante el algoritmo de Lane o el modelo de la Universidad de Chile.

- e. A continuación se genera el plan de preparación mina que a su vez sustentará el plan de producción generado mediante el software X-SIP. En esta etapa es fundamental el Plan Quinquenal y el Plan Anual entregados por el plan de Mediano Plazo, que le dan forma a los primeros cinco años del Plan Minero.
 - f. Estimación de recursos, equipos y dotación.
 - g. Ajuste del Plan Minero con el plan preliminar de producción plantas generado por Planificación Planta y fundición Largo Plazo.
 - h. Evaluación económica preliminar de los escenarios de explotación y negocio.
 - i. Selección del escenario de explotación y negocio más favorable que contiene el PEX y que será la base del PND.
3. Generación y consolidación del Plan Minero Metalúrgico.
 - a. Someter el escenario de explotación y negocio escogido en el PEX a una rigurosa evaluación económica y de factibilidad para posteriormente consolidar el Plan Minero-Metalúrgico.
 - b. Se crea un archivo físico que contenga el Plan Minero Metalúrgico consolidado, llamado PND (Plan de Negocios y Desarrollo) y se hace un registro magnético de éste.
 - c. Difusión del PND a clientes (Vicepresidencia Comercialización).

Resumiendo, los tres contenidos más importantes generados en el PEX y el PND por la planificación de largo y mediano plazo en conjunto, son el Modelo de Reservas Extraíbles, el Plan de Producción y Preparación Minera para la vida útil de la mina.

3.3.1 Planificación minera de corto plazo.

Es aquella que tiene por objetivo implementar o llevar a la práctica la planificación de mediano y largo plazo para un periodo de tiempo que generalmente es un año.

Entre sus responsabilidades se pueden mencionar las siguientes:

- Generar los planes de producción anuales.
- Aplicar conocimiento para proyectar el cumplimiento programado.
- Verificar el cumplimiento del plan de producción anual.
- Generar tableros de control y contratos de extracción.

Horizonte de planificación

El Horizonte de planificación del área Planificación Mina Corto Plazo corresponde a un año. Esto se debe a una decisión corporativa, dado que el presupuesto fiscal anual del país depende de las producciones obtenidas durante el año por cada División perteneciente a Codelco-Chile.

Variables y parámetros de planificación más relevantes

- Secuencia de extracción.
- Secuencia de Incorporación de área.
- Secuencia de avance del frente de hundimiento.
- Leyes.
- Velocidades de extracción permitidas.
- Distancias permisibles.
- Capacidad de acarreo.
- Capacidad de procesamiento de planta.

Planes y documentos emitidos:

	REV. B	REV. 2
Contenido	Plan Anual de Preparación Mina Incluye: -Metros desarrollados. -Construcciones Mineras tales como (chimeneas piloto, bateas, carpetas de rodado, fortificación, pilares a socavar).	Plan Anual de Producción. Incluye: -Producción mensual Mina por sector productivo. -Producción mensual Planta.
Fecha Emisión	Diciembre de cada año.	Diciembre de cada año.

Tabla 2. Planes y documentos Planificación Corto Plazo.

Los planes anuales de preparación (REV. B) y producción (REV. 2) son elaborados por las áreas Preparación Mina y Planificación Mina Corto Plazo, pertenecientes a la Superintendencia Gestión Producción. Representan una actualización y ajuste de los planes generados por Planificación Mina Mediano Plazo, dado que se emiten en Diciembre y cuentan con información más real y acabada en comparación con los otros planes que se emiten en Septiembre. Los planes de Planificación Mina Corto Plazo y Preparación Mina

representan un compromiso interno de la producción, desarrollos y construcciones mineras a nivel divisional.

La información de salida de los planes entrega los siguientes datos:

- Programa de producción (Leyes de Cu, Mo, As; tonelajes mensuales por sector; tonelaje de Fino).
- Programa preparación de las minas (construcciones y metros desarrollados).
- Programa de plantas de procesamiento (WI, recuperaciones, mantenciones, tonelaje procesado por planta, leyes de concentrado, ley de especies mineralógicas).

3.3.2 Control producción mina.

Corresponde a una actividad de control, seguimiento y medición, cuyo propósito es asegurar la cantidad y calidad de los minerales que alimentan las plantas de procesamiento. Esto incluye todos sus parámetros: ley de Cu, dureza, granulometría, factor K (mineral no sulfurado), impurezas y otros; de manera de mantener la estabilidad del proceso metalúrgico y que se cumplan los resultados planificados en cuanto a sus variables claves, cantidad y calidad del producto final que son los concentrados de cobre y molibdeno.

Entre sus responsabilidades se pueden mencionar las siguientes:

- Muestreo de los puntos de extracción en cuanto a leyes de Cu, Mo, As, Cu insoluble, dilución, granulometría.
- Seguir el cumplimiento en cuanto al plan de producción mensual y a la carta de tiraje en lo que respecta a leyes y a tonelajes.
- Mantención de bases de datos (CPM 98, X-Plan).
- Elaboración del Plan de Producción Mensual Mina
- Elaboración de los informes de gestión de producción mensual, semanal y diario

Horizonte de planificación

El horizonte de planificación de la Unidad de Control Producción Mina corresponde a un mes. Esto se debe a una decisión corporativa, dado que existen bonos de producción, pagos, incentivos que abarcan un periodo mensual.

Variables y parámetros de planificación más relevantes:

- Estimadores de ley (Cu, Mo, As)

- Estado de la Infraestructura minera (piques de traspaso, cámaras de picado, cruzados de acarreo).
- Estado del área (puntos de extracción hundidos, colapsados, colgados, operativos, etc.)
- Velocidades de extracción permitidas.
- Distancias permisibles
- Tonelajes a cumplir de acuerdo a las metas.
- Capacidad de acarreo
- Capacidad de procesamiento de planta

Planes y documentos emitidos:

- Plan mensual tentativo: fecha límite de emisión hasta el día 25 de cada mes.
- Plan mensual definitivo: fecha límite de emisión entre los días 25 y 28 de cada mes.
- Informe de gestión de la producción diaria: se emite todos los días y contiene los resultados reales de la producción.
- Informe de gestión de la producción semanal: se emite todas las semanas y contiene los resultados reales de la producción.
- Informe de gestión de la producción mensual: se emite todos los meses después del ajuste y contiene los resultados reales de la producción.

Las salidas de los planes muestran los siguientes datos:

- Ley de Cu, Ley de Mo, Ley de As.
- Recuperaciones.
- Programas de mantención.
- Tonelaje por sector, tonelaje por punto de extracción, tonelaje por día.
- Tonelaje de fino.

3.3.3 Secuencia de planificación de corto plazo (situación actual).

1. La primera etapa consiste en la recopilación de antecedentes, tales como:
 - a. Los modelos geológicos son aportados por la Superintendencia de Geología perteneciente a la Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollos.
 - b. El Modelo Geotécnico es aportado por la Superintendencia de Geomecánica perteneciente a la Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollos.

- c. La Gerencia de Minas carga en las bases de datos CPM98 y Dispatch la información con respecto a mantenciones, rendimientos operacionales diarios y mensuales, información diaria de producción, incidentes operacionales, desarrollos de mina, modelo hidrogeológico.
 2. Utilizando el software X-sip se procede a la confección del plan anual de producción (REV. 2) que se emite en Diciembre por el área de Planificación Mina Corto Plazo, tomando en consideración la recopilación de antecedentes mencionadas en el punto 1, además de los siguientes inputs:
 - a. Información de los nuevos proyectos divisionales entregada por la Gerencia de Proyectos.
 - b. El Plan de Presupuesto Anual (REV. 0) que se emite en Julio, el PND (Año 1) que se emite en Octubre de cada año y el modelo de reservas extraíbles son facilitados por la Superintendencia Minero-Metalúrgica.
 - c. La información de mantenciones, Informes de incidentes operacionales, indicadores y rendimientos operacionales son entregado por la Gerencia de Plantas al área de Planificación Planta Corto Plazo, y ésta a su vez confecciona un documento con la capacidad de molienda anual de la planta que viene mensualizada al área Planificación Mina Corto Plazo.
 - d. La información de mantenciones, informes de incidentes operacionales, rendimientos operacionales, fijaciones de As y S, Cobre a moldear es entregada por la Gerencia de Fundición a Planificación Planta Corto Plazo, y ésta entrega un informe con la capacidad productiva de la Fundición para el año en cuestión detallada mensualmente a Planificación Mina Corto Plazo y a la Vicepresidencia Comercial.
 - e. Información de la capacidad de acarreo.
 3. Confección del Plan Anual (REV. B) que se emite en Diciembre por el área de preparación mina y que considera los antecedentes de la producción real del año anterior, las metas de áreas a incorporar propuestas por el plan anual de preparación mina (REV. A) y el plan anual de presupuesto y producción (REV.0) ambos generados en Planificación Mediano Plazo. El Plan REV. B contiene los planes anuales de construcciones y desarrollos y cumple una función de ajuste y

actualización del REV. A sustentando además el Plan anual de producción elaborado por Planificación Mina Corto Plazo (REV. 2).



Figura 3. Diagrama Plan Anual Preparación, Preparación Mina³.

4. La confección de los planes mensuales de producción es realizada mediante el software PPM por la Unidad Control Producción Mina, la que toma los siguientes antecedentes:
 - a. El Plan de Producción Anual (REV.2), confeccionado por el área de Planificación Mina Corto Plazo, entrega las metas a cumplir en cuanto a leyes y tonelajes.
 - b. El área de Planificación Planta Corto Plazo entrega la capacidad de molienda de la planta mensual detallada por día a Control Producción Mina, y ésta a su vez retroalimenta con los datos de leyes del muestreo que es determinado del

³ Curso "Planificación Modulo Programas de Producción, MINCO", 2002

promedio aritmético de las últimas dos muestras tomadas por punto de extracción, de un total de diez, que son las últimas guardadas por la base de datos.

- c. El área de Planificación Planta Corto Plazo entrega la capacidad productiva mensual de la Fundición, detallada por día a Control Producción Mina.
 - d. Información de la capacidad de acarreo.
 - e. Datos geomecánicos actualizados entregados por el Software PPM GUIA.
 - f. Control Producción Mina elabora el Plan de Producción Mensual tentativo, para luego enviarlo a revisión y si existe conformidad al respecto se procede a la consolidación de este plan difundiendo a las Gerencias de Minas y Planta. De no existir conformidad se revisa el plan tentativo mensual.
5. Elaboración del informe Gestión de Producción Mensual por parte de Control Producción Mina, que trae los datos de la producción real y es difundido después de los ajustes.
 6. Confección del plan de producción semanal por parte de Control Producción a partir de las metas del plan mensual consolidado. En esa etapa se utiliza la herramienta computacional PPS.
 7. Elaboración del Informe Gestión Producción Semanal por parte de Control Producción Mina, que trae los datos reales de la producción semanal.
 8. Confección del Plan de Producción Diario por parte de Control Producción Mina a partir de las metas del Plan Semanal de Producción. En esa etapa se utiliza la herramienta computacional SANT.
 9. Elaboración del informe Gestión de Producción Diario por parte de Control Producción que trae los datos reales de la producción diaria.
 10. Alimentación de las bases de datos CPM98 y Dispatch por parte de los planes de producción e informes de gestión de producción antes mencionados. La información de las bases de datos es controlada por el área Control Producción Mina y es difundida a la Gerencia de Minas.

3.4 Dilema de la planificación de corto plazo.

La Planificación de corto plazo tiene que llevar a operación las metas de producción e incorporación de áreas que son establecidas por el plan anual de presupuesto (REV 0) generado por la Planificación de Mediano Plazo. Este plan estima un programa de producción anual que consiste en la base fundamental del presupuesto de operaciones del año y se basa en la secuencia de hundimiento, capacidades de acarreo y estados operacionales definidos por el Plan Quinquenal que corresponde a los primeros cinco años del Plan Minero de Largo Plazo, el cual tiene como objetivo cumplir con las estrategias del dueño del negocio que en este caso es la maximización de los recursos.

El Plan de Largo Plazo se sustenta en el criterio de “Costo de Oportunidad”, que se refiere a lo que puede dejar de ganar el dueño del negocio por no extraer una determinada cantidad de toneladas de mineral o no incorporar tantos metros cuadrados en determinados periodos de tiempo. Considerando lo anterior, y además de que sus variables más relevantes no son las operacionales sino mas bien las económicas y comerciales debido al horizonte de tiempo que éste proyecta, el Plan Minero de Largo Plazo resulta muy optimista respecto a sus metas productivas y por consiguiente la mayoría de las veces es inviable.

Lo anterior se explica porque la planificación de corto plazo, al momento de llevar a la práctica dicho plan, se encuentra con inconvenientes tales como atrasos en los metros desarrollados de galerías y piques, en las carpetas de rodados, construcciones de puntos de extracción, fortificación de pilares y calles, perforación y tronadura de zanjas y pilares. Algunas de las causas de estos atrasos son la falta de equipos y dotación, daños producto de eventos sísmicos, eventos de lluvia y nieve que provocan el ingreso de agua a las galerías y cierre de puntos por dilución. Pero la consecuencia más relevante es el déficit de producción que no permite cumplir con los compromisos establecidos por la División en el Plan de Largo Plazo con el dueño del negocio.

Dado que la producción de cobre fino sustenta el negocio y el presupuesto de operaciones, la cantidad de cobre fino comprometida en el plan anual (REV 0) debe ser cumplida, de lo contrario el presupuesto de operaciones queda sin sustento.

El déficit de producción provoca que la planificación de corto plazo oriente todos sus recursos para tratar de cumplir la promesa del Plan Anual (REV 2), una meta difícil de alcanzar si se considera la menor disponibilidad de área respecto a lo esperado.

Para mitigar el déficit de producción la planificación de corto plazo recurre a la “sobre extracción”, material que se encuentra por sobre la altura económica de columna definida en el Modelo de Reservas Extraíbles por la planificación de largo plazo. Esta es la diferencia más notable entre la planificación de mediano y corto plazo, y se debe a la distinta información del material quebrado respecto a su calidad y la posterior diferencia de criterios al momento de elaborar los respectivos planes de producción. Esto se explica porque el modelo usado para el largo plazo estima de manera conservadora el material quebrado (al no tener ninguna estimación certera de éste basada en sondajes); en cambio, el de corto plazo lo estima con mejores leyes de acuerdo a la información de los muestreos. Lo anterior genera reservas insitu que, al momento de diluirlas, contienen un error al aplicar el algoritmo de Laubscher, el cual se incrementa al momento de calcular la altura económica (techo) mediante Lane o el modelo de la Universidad de Chile, generándose alturas de columnas económicas que no representa fielmente a la realidad de la explotación.

De acuerdo a la problemática descrita anteriormente, se puede observar un déficit en el proceso de planificación minera respecto a la retroalimentación desde la planificación de corto a la de largo plazo. Este empalme debiera ser una de las misiones fundamentales de la planificación de mediano plazo, que consistiría en acoger la información de la calidad del material quebrado y la condición operacional de los sectores productivos con la que cuenta la planificación de corto plazo para poder retroalimentar a la planificación de largo plazo, de modo que ésta pueda elaborar planes más aterrizados y el compromiso de producción con los dueños del negocio sea más cercano a la realidad.

Conscientes de esta diferencia y deficiencia se pretende dar un primer paso aplicando una nueva metodología para re-estimar el material de sobre extracción con el objetivo de regenerar reservas extraíbles en el corto plazo.

Esta metodología permitirá exponer una mayor cantidad de recursos mineros al momento de elaborar los planes de corto plazo, de modo de realizar optimizaciones económicas o geomecánicas que permitan cumplir con las metas productivas de cobre fino. Esta medida persigue disminuir el stress de la planificación de corto plazo y dar más flexibilidad a operaciones para lograr mejoras y optimizaciones del proceso productivo.

Por lo tanto, será necesario desarrollar una metodología que permita estimar la ley de puntos de extracción que se encuentren con sobre extracción y definir el volumen de recursos que

serán aportados al plan de corto plazo de modo de cumplir con la meta de fin establecida en la planificación de mediano plazo.

4 Metodología de estimación recursos marginales – Corto Plazo

Para minimizar la brecha existente entre la planificación de largo plazo con la del corto plazo, la cual genera incertidumbre en el cumplimiento de los planes y en la auditabilidad del inventario de reservas, se pretende incorporar aquellos recursos que han sido dejados fuera en la planificación de largo plazo, denominados recursos de sobre extracción. Para incorporar en la planificación estos recursos marginales es necesario primero estimarlos. La metodología propuesta se basa en realizar una regresión lineal con los valores de leyes de las muestras obtenidas de cada punto de extracción y con ella realizar una extrapolación para estimar las leyes en altura.

4.1 Metodología para la estimación de leyes en puntos con sobre extracción

La metodología para estimar los recursos marginales dejados fuera del inventario de reservas en la planificación de largo plazo se basa en realizar una regresión lineal de las muestras obtenidas de los puntos de extracción de modo de proyectar la ley en altura a través de una extrapolación.

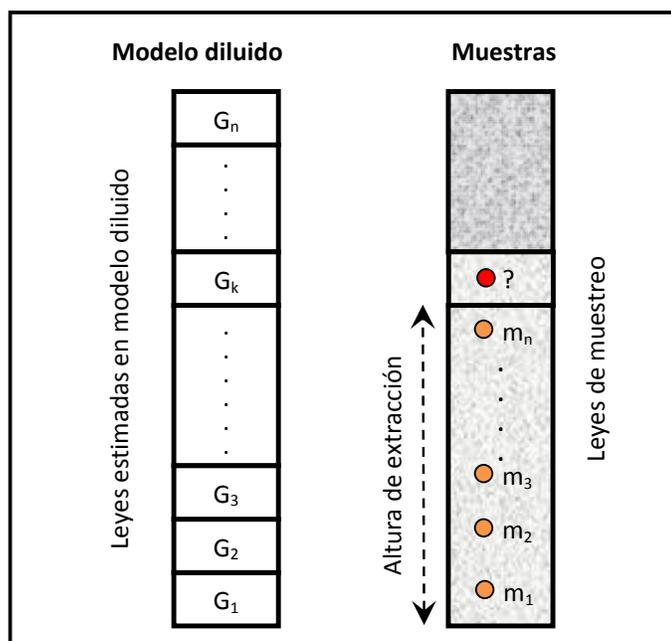


Figura 4. Esquema de comparación de leyes entre muestras y modelo diluido para una columna.

El proceso utilizado por el software LSQ considera las siguientes etapas:

- Carga de extracción histórica de tonelajes y leyes por mes. Esta etapa consiste en cargar al sistema LSQ los datos de extracción histórica compositas en forma mensual. Una muestra del formato de cómo se realiza este proceso se muestra a continuación:

Year	Month	Tons	CU
2001	12	AcumDic01	Cu2001_12
2002	1	T2002_01	Cu2002_01
2002	2	T2002_02	Cu2002_02
2002	3	T2002_03	Cu2002_03
2002	4	T2002_04	Cu2002_04
2002	5	T2002_05	Cu2002_05
2002	6	T2002_06	Cu2002_06
2002	7	T2002_07	Cu2002_07
2002	8	T2002_08	Cu2002_08
2002	9	T2002_09	Cu2002_09
2002	10	T2002_10	Cu2002_10
2002	11	T2002_11	Cu2002_11
2002	12	T2002_12	Cu2002_12
2003	1	T2003_01	Cu2003_01
2003	2	T2003_02	Cu2003_02
2003	3	T2003_03	Cu2003_03
2003	4	T2003_04	Cu2003_04
2003	5	T2003_05	Cu2003_05
2003	6	T2003_06	Cu2003_06
2003	7	T2003_07	Cu2003_07
2003	8	T2003_08	Cu2003_08

Figura 5. Ejemplo formato carga información.

- Estimación de la posición de las muestras en la columna de extracción. Este proceso se lleva a cabo a partir de la geometría de la columna, la densidad de la columna mezclada y el tonelaje extraído a la fecha. Para un punto de extracción, dado el tonelaje acumulado a la fecha, se integra verticalmente en la columna diluida de modo de estimar la posición de la muestra en la columna.
- Compósito de muestras en la columna en tamaños equivalentes a los bloques del modelo diluido. Este proceso consiste en regularizar el intervalo de muestreo de modo de hacerlo compatible con el modelo diluido.
- Cálculo de la covarianza normalizada. La covarianza normalizada se utiliza como un indicador de dispersión entre el modelo diluido y las muestras compositas.

$$CovNorm(X, Y) = \frac{Cov(X, Y)}{\bar{X} \cdot \bar{Y}} = \frac{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X}) \cdot (y_i - \bar{Y})}{\bar{X} \cdot \bar{Y}}$$

donde

X corresponde a las muestras compositadas

Y corresponde a las leyes del modelo diluido

El cálculo anterior se realiza para cada punto de extracción, considerando un alcance de tiempo definido. Típicamente, se realiza un análisis de extracción de 1 a 2 años para evitar la influencia de muestras muy antiguas en la estimación del indicador de dispersión.

- Cálculo de una regresión lineal a partir de las muestras compositadas. Esta regresión se calcula incorporando un rango de muestras definidas por el usuario. Normalmente el número de muestras compositadas a utilizar para la construcción de la regresión debería estar relacionado con la variabilidad de las muestras en la columna.
- Selección de puntos de extracción que se desea ajustar con el sistema LSQ. Ajuste del modelo de columnas reemplazando aquellas columnas que presentan una covarianza normalizada mayor al umbral definido como aceptable. A continuación se presenta un gráfico que muestra el efecto del sistema LSQ en la estimación del modelo de recursos de corto plazo.

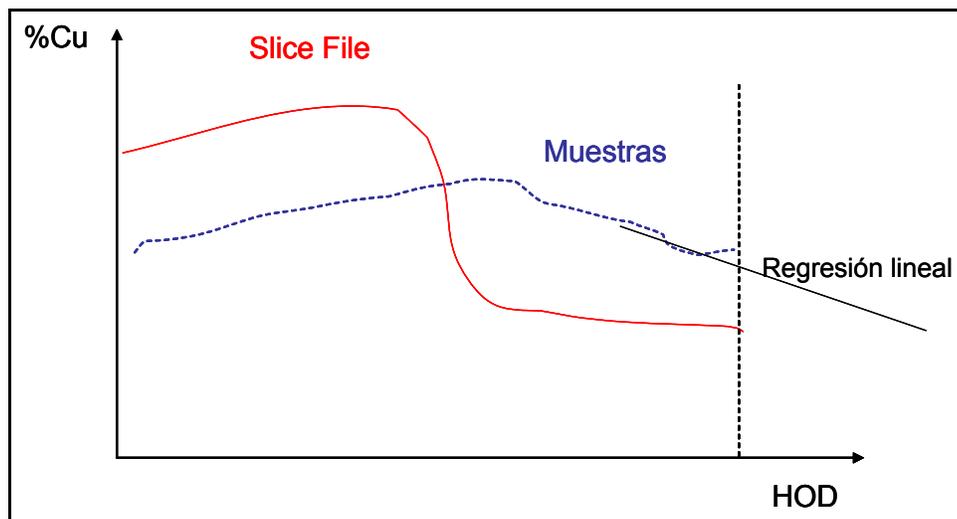


Figura 6 Esquema de estimación de leyes basado en una regresión lineal de las muestras compositadas.

Una aplicación del sistema LSQ para una columna de extracción se muestra a continuación. En este caso, se utilizaron 4 muestras históricas para la construcción de la regresión lineal y se estiman 3 bancos de la columna a partir de la altura extraída a la fecha.

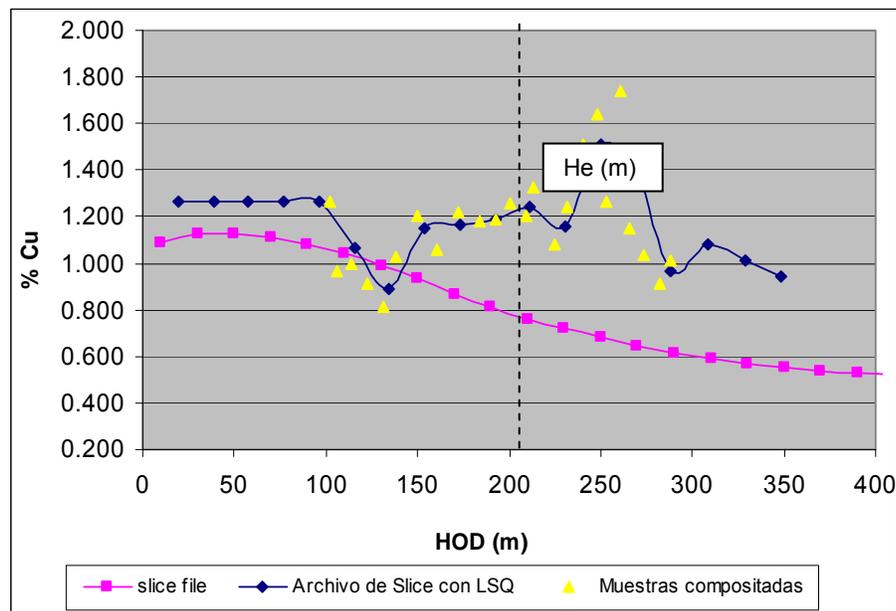


Figura 7. Aplicación de LSQ para una columna de extracción.

En la figura anterior se muestra la reconstrucción de la columna a partir de las muestras históricas correspondientes a 3 bancos utilizando una regresión lineal. A su vez, es posible observar que el ajuste entre el modelo diluido y el modelo LSQ difiere en forma significativa.

La covarianza normalizada es el estimador de dispersión que controla qué puntos deben ser re-estimados con la regresión lineal y cuales debiesen permanecer con la ley contenida en el modelo diluido inicial. Por lo tanto, es un parámetro que debe ser calibrado y analizado, dependiendo de la máxima dispersión aceptada para una determinada operación minera. El segundo parámetro de interés tiene que ver con el número de bancos a estimar. Este parámetro debiese estar avalado por un análisis variográfico de las muestras históricas. Este análisis permitirá definir el alcance máximo que podemos dar a las muestras para la construcción de un estimador de ley.

Existen tres parámetros en LSQ que permiten acotar la re estimación de la ley para una determinada columna. Básicamente estos parámetros definen la razón máxima y mínima entre el estimador y las muestras utilizadas en la construcción de la regresión lineal.

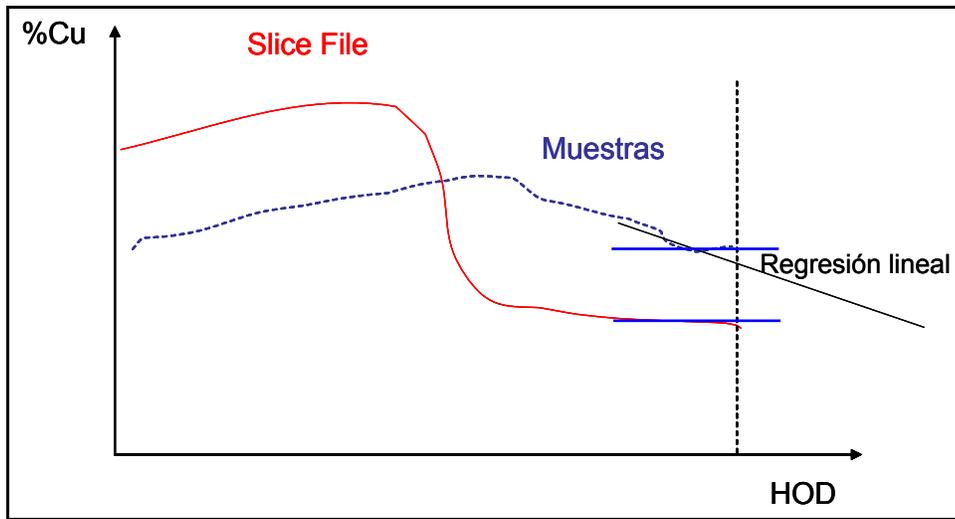


Figura 8. Cotas mínimas y máximas para la re estimación de bancos basado en la regresión lineal.

4.1.1 Calibración inicial

Para la estimación de la covarianza normalizada a utilizar como umbral para la re estimación del modelo diluido, se genera una comparación entre una desviación simple del modelo diluido con respecto a las muestras y la covarianza normalizada. A continuación se presenta el gráfico de desviación simple con la covarianza normalizada del sector Esmeralda analizado para los periodos 2002 y 2003. A partir de este gráfico es posible establecer que una covarianza normalizada de 0,02 representa una desviación de hasta un 10% entre el modelo diluido y las muestras compositas a la altura de banco.

También es posible cuantificar el número de columnas a re estimar como función del umbral de covarianza normalizada. La siguiente tabla muestra el número de columnas re estimadas como función de la covarianza normalizada. En el caso de la mina Esmeralda, con una covarianza normalizada de 0,02, 274 columnas son re-estimadas de modo de obtener una desviación menor a 10% entre el modelo y las muestras a nivel de punto de extracción.

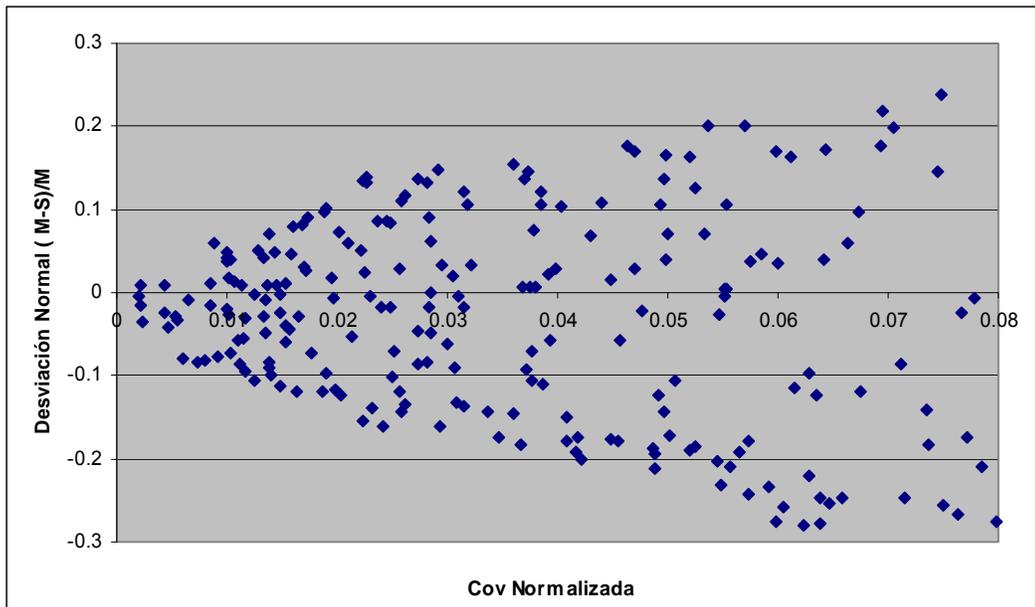


Gráfico 1. Análisis de la desviación simple como función de la covarianza normalizad

>0.01	324
>0.02	274
>0.03	234
>0.04	205
>0.05	179
>0.06	154
>0.07	135
>0.08	120
>0.09	109
>0.10	98
>0.11	90
>0.12	87
>0.13	79
>0.14	74
>0.15	69
>0.16	67
>0.17	67
>0.18	62
>0.19	61
>0.20	60
>0.21	56
>0.22	52
>0.23	49

Tabla 3. Covarianza normalizada umbral y número de columnas re estimadas.

4.1.2 Aplicación de alcance y validación

Se realizó un análisis de modo de cuantificar el alcance y la validez del sistema LSQ para la estimación de la ley de corto plazo, que consistió en procesar la extracción histórica utilizando el sistema LSQ. En el gráfico siguiente se muestra una reconciliación del modelo diluido (utilizando los parámetros de mezcla de 150-3) comparándolo con las muestras de cobre.

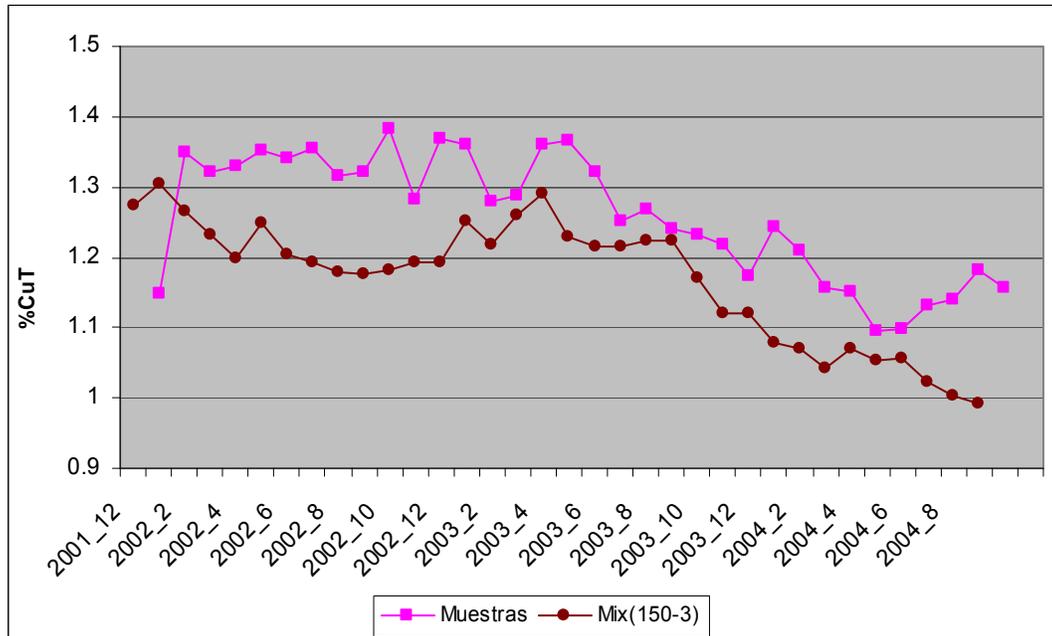


Gráfico 2. Extracción histórica de los periodos 2001-2004

Se observa del gráfico anterior una gran dispersión entre el modelo diluido y las muestras. En estas condiciones se decide aplicar el método LSQ extrayendo los años 2001, 2002 y 2003; y realizar una estimación del archivo de columnas para la extracción del año 2004. El gráfico de validación se muestra a continuación.

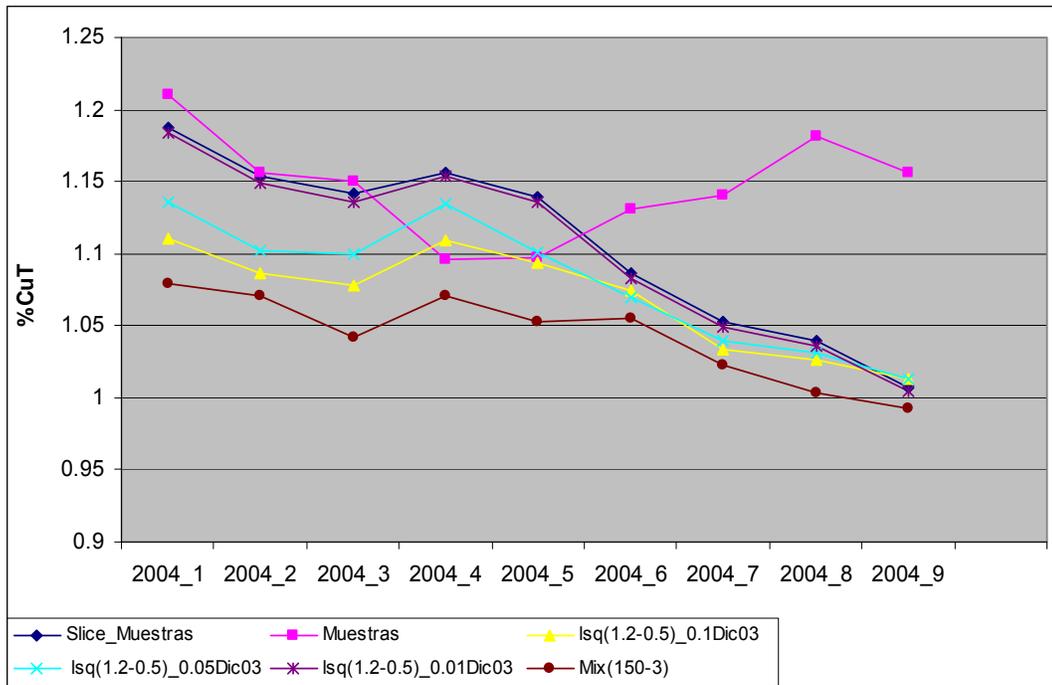


Gráfico 3. Validación del método LSQ para la estimación de la ley para el año 2004 del sector Esmeralda.

Se observa del gráfico anterior que el alcance de estimación de la ley para el año 2004 es de 6 meses como máximo. Si bien todas las estimaciones de LSQ siguen la misma tendencia, existe un espectro de estimación que cubre un perfil de leyes desde el modelo diluido (Mix (150-3)) hasta el modelo que reemplaza todo con las muestras (Slice_Muestras).

Se desprende del análisis anterior que la estimación a realizar por LSQ debiesen estar restringidas a 6 meses lo cual equivale aproximadamente a 30 m o 2 bancos de la columna diluida. Por otro lado, la covarianza normalizada a utilizar debiese estar en el intervalo 0,05-0,01. Basándose en el análisis de covarianza normalizada y desviación simple mostrado en el capítulo anterior, se desprende que 0,02 como umbral de covarianza normalizada cumple con las condiciones de estimación del sector Esmeralda.

El uso de la subrutina LSQ es capaz de aportar con lo siguiente:

- Comparación a nivel de bancos de la ley definida por el modelo de largo plazo y la ley observada histórica.

- Estimación de aquellos bancos que se encuentran sobre la altura de extracción actual, basándose en una recta de regresión lineal de las muestras históricas compositadas a nivel de banco.

4.1.3 Reconstitución de la columna extraída banco a banco

En esta etapa se “alimenta” con información necesaria a la aplicación para generar una muestra equivalente por banco. Para conseguir este objetivo los pasos a seguir son los siguientes.

Recopilación de antecedentes

Para generar una re-estimación de leyes en el corto plazo utilizando la subrutina LSQ es necesario, en primer lugar, que el usuario realice una recopilación de antecedentes con el objeto de conformar una base de datos que contenga los tonelajes y leyes de cada punto de extracción y por mes. Para ello se debe recurrir a la base de datos histórica CPM 98, para obtener las leyes y tonelajes involucrados en los muestreos periódicos realizados a los sectores productivos a nivel de puntos de extracción. Según los procedimientos de la División, los muestreos se realizan en forma periódica, donde cada punto es muestreado cada 1.500 a 2.000. Luego, todos los muestreos realizados durante un mes a cada punto de extracción son ponderados por el tonelaje entre muestreos para obtener una muestra equivalente mensual. Esta muestra equivalente se denominara “muestra observada en el mes” y para estimar su posición en altura y/o banco en la columna de extracción es necesario integrar verticalmente el tonelaje acumulado a la fecha, de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$P = \frac{1}{\delta} \times \frac{T}{A}$$

Fórmula 1. Cálculo de la posición de la muestra.

Donde:

P : Posición de la muestra observada en el mes en altura de columna (m).

δ : Densidad de la columna diluida (T/m³).

T : Tonelaje acumulado a la fecha (T).

A : Área basal de la columna de extracción (m2).

La ley de la muestra observada en el mes j-ésimo se define por la siguiente fórmula:

$$M_j = \frac{(t1 * m1 + t2 * m2 + \dots + ti * mi + \dots + tn * mn)}{(t1 + t2 + \dots + ti + \dots + tn)}$$

Fórmula 2. Ley de la muestra observada.

Donde:

i: 1..n: N° de muestreos realizados durante el mes j-ésimo a un determinado punto de extracción

ti: Tonelaje entre los muestreos realizados durante el mes j-ésimo a un determinado punto de extracción

mi: Ley de los muestreos realizados durante el mes j-ésimo a un determinado punto de extracción

Mj: Ley de la muestra observada en el mes j-ésimo

j: Número de mes del año (1..12)

El objetivo es generar una base de datos que contenga la información histórica de leyes, además de los tonelajes en formato mensual por punto de extracción para todo el sector productivo.

Generación de la muestra compositada por banco

La base de datos generada por el usuario mediante la recopilación de antecedentes es un input en el PC-BC, para que éste a su vez genere una muestra compositada por banco. La ley de la muestra compositada es calculada por el software mediante la ponderación de la ley de las muestras observadas en los meses j-ésimos contenidas al interior del mismo banco, con los correspondientes tonelajes mensuales. El software realiza este cálculo para todos los bancos contenidos en los diversos puntos de extracción hasta la actual altura de columna extraída.

La ley de la muestra compositada por banco se define por la siguiente fórmula:

$$MB_k = \frac{(T1 * M1 + T2 * M2 + \dots + Tj * Mj + \dots + Tn * Mn)}{(T1 + T2 + \dots + Tj + \dots + Tn)}$$

Donde:

J : N° de mes del año (1...12).

Tj : Tonelaje entre las muestras observadas en los meses j-ésimos y contenidas en el banco k-ésimo en un determinado punto de extracción.

Mj : Ley de las muestras observadas en los meses j-ésimos y contenidas en el banco k-ésimo en un determinado punto de extracción.

MBk : Ley de la muestra compositada por banco k-ésimo.

k:1..n : N° de banco contabilizado desde abajo hacia arriba en la columna de extracción.

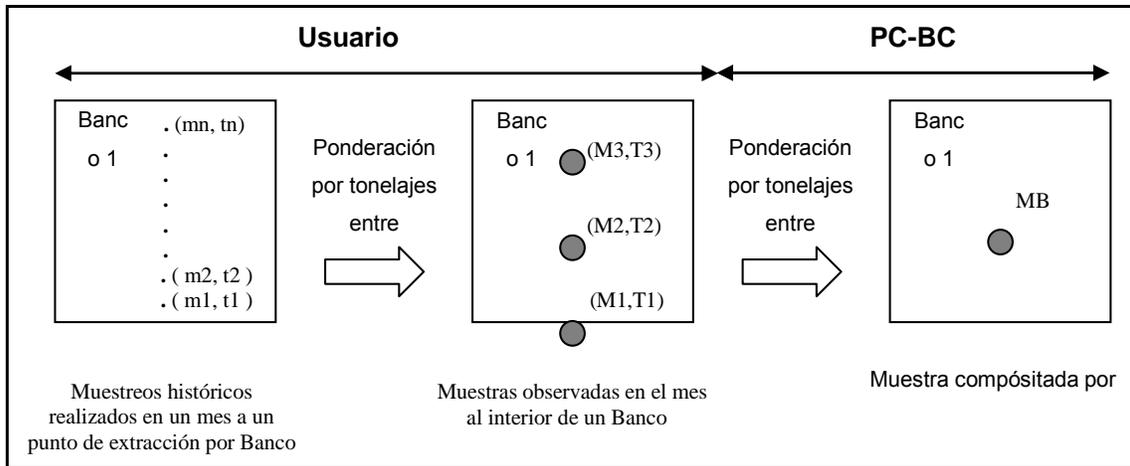


Figura 9. Cambio de formato de los muestreos históricos mediante ponderación por tonelajes.

4.1.4 "Columna Ajustada" según los muestreos históricos

Esta etapa consiste en ajustar el modelo de columnas extraídas, en donde el software reemplaza aquellas columnas que presentan una covarianza normalizada (CN) en valor absoluto mayor a una cierta tolerancia, que es determinada considerando la desviación simple (%D) observada de las leyes extraíbles o modelo diluido con respecto a las leyes extraídas.

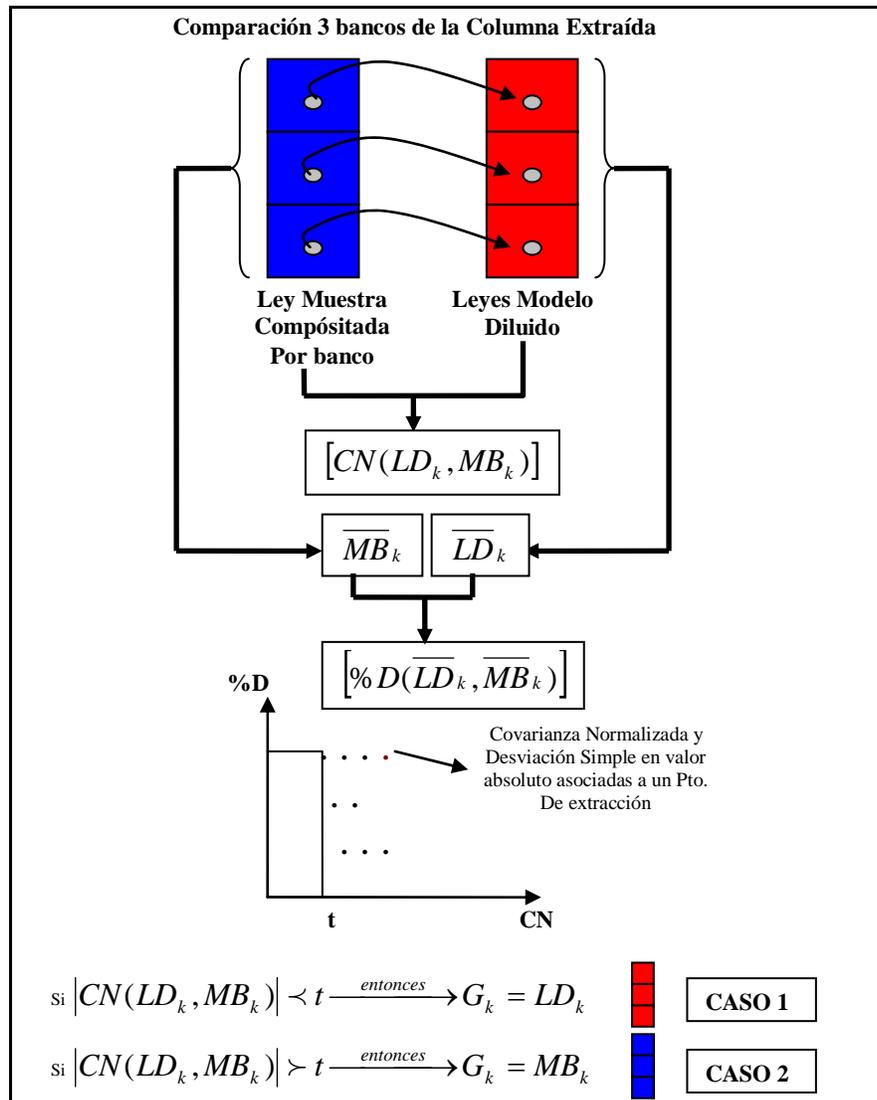


Figura 10. Comparación y posterior ajuste de la columna extraída.

Si la covarianza normalizada en valor absoluto, es menor a la tolerancia, como muestra el caso 1, la columna extraída queda definida por el modelo diluido del largo plazo. En el caso contrario (caso 2), la columna extraída queda definida por la ley de las muestras históricas o extraídas, las cuales han sido compositadas por banco. Solo para aquellas columnas que hayan sido ajustadas, la subrutina LSQ estimará la ley de los bancos por sobre la altura actual extraída.

A continuación, se presentan los análisis necesarios para la definición de los parámetros usados en la rutina LSQ.

Desviación simple

La desviación simple de las leyes extraíbles respecto a las leyes extraídas se realiza comparando la ley de los muestreos periódicos (leyes extraídas) contenidas en el banco k-ésimo con la ley extraíble del mismo banco k-ésimo (modelo diluido). Este cálculo se realiza para cada punto de extracción según la siguiente fórmula:

$$D\% = \frac{(m_{i,k} - LD_k)}{LD_k}$$

Fórmula 3. Desviación simple con respecto a la ley extraída.

En donde:

D% : Desviación simple de la ley extraíble con respecto a la extraída.

$m_{i,k}$: Leyes de los muestreos periódicos i-ésimos contenidos en los bancos k-ésimos.

LD_k : Leyes extraíble por banco k-ésimos. (Modelo diluido).

Se generó así un gráfico de reconciliación de ley de Cu según altura extraída, para el sector Esmeralda a nivel de puntos de extracción, según la extracción histórica a noviembre del año 2004.

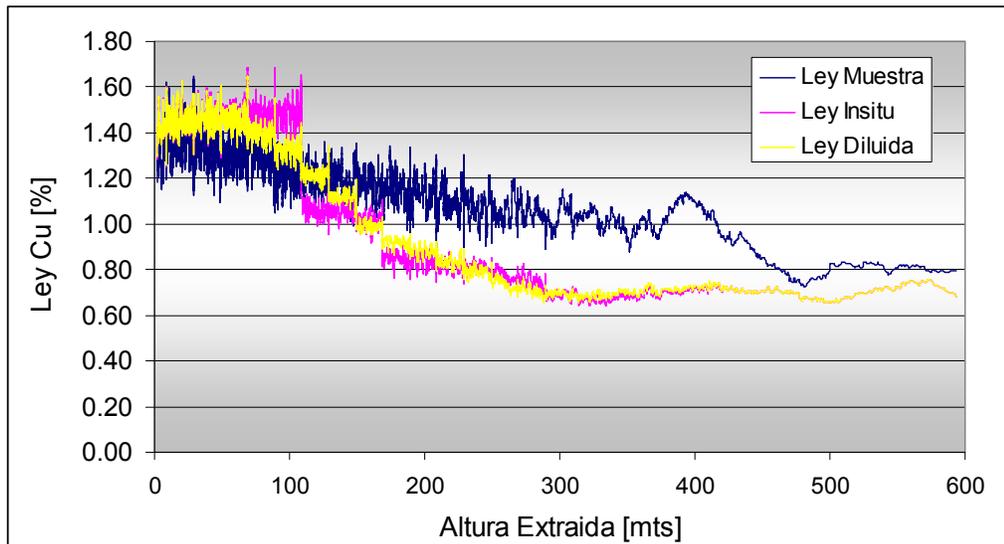


Gráfico 4. Reconciliación ley de Cu

Para una mejor interpretación, se grafica la desviación simple entre la ley observada o de muestreo y la ley del modelo de largo plazo o diluida.

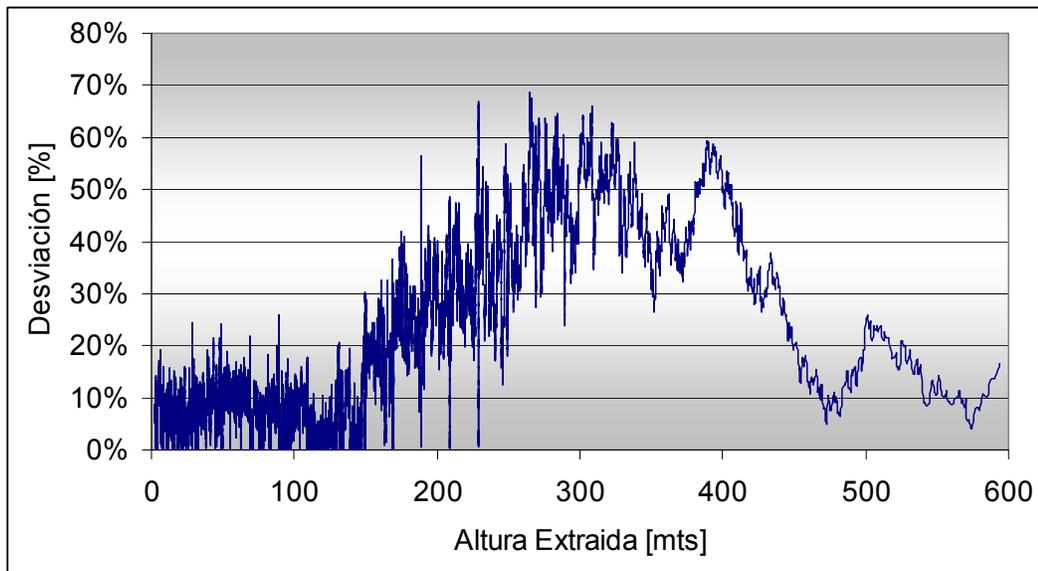


Gráfico 5. Grafico de desviaciones simples.

De este gráfico se observa una desviación máxima inferior a 20% hasta los 150 m de altura extraída, asociado a la presencia mayoritaria de mineral insitu. Sobre esta altura, la desviación presenta un incremento mayor, asociándose a una subestimación del material remanente de explotaciones anteriores (mineral quebrado).

Se puede concluir que las leyes extraíbles (modelo diluido) respecto a las extraídas (leyes reales), debieran tener una desviación promedio en valor absoluto menor a un 20%, definido por el comportamiento del mineral insitu. Esto justifica la re-generación de las columnas extraídas, ajustando el modelo de leyes extraíbles, según corresponda.

Covarianza normalizada

El ajuste de la columna extraída la realiza la subrutina LSQ, que trabaja con el parámetro estadístico llamado Covarianza Normalizada, parámetro numérico que actúa como un estimador de dispersión entre las leyes extraíbles por banco y las leyes compositas por banco (leyes extraídas), que se define por la siguiente fórmula para cada punto de extracción:

$$CN(LD, MB) = \left| \frac{C(LD_k, MB_k)}{\overline{LD_k} * \overline{MB_k}} \right|$$

Fórmula 4. Covarianza normalizada.

Donde:

CN(LDk, MBk): Covarianza normalizada.

C(LDk, MBk) : Covarianza. (Ver fórmula en Anexo A).

$\overline{MB_k}$: Promedio leyes de las muestras compositadas por banco (ley extraída).

$\overline{LD_k}$: Promedio leyes extraíble por banco (modelo diluido).

Dado que el usuario, en este caso el planificador, maneja el parámetro de desviación simple como estimador de dispersión de las leyes extraíbles respecto a las leyes extraídas, es necesario que el usuario construya un grafico de desviaciones simples v/s covarianzas normalizadas para poder correlacionar ambos parámetros.

La desviación simple a ocupar en este grafico es una desviación calculada para cada punto de extracción, en valor absoluto y en base a los promedios de las leyes de muestras compositadas por banco y las leyes extraíbles por banco, según la siguiente fórmula:

$$D\% = \left| \frac{(\overline{MB_k} - \overline{LD_k})}{\overline{LD_k}} \right|$$

Fórmula 5. Desviación simple de la ley extraíble con respecto a la extraída

Donde:

D% : Desviación simple de la ley extraíble con respecto a la extraída.

$\overline{MB_k}$: Promedio de las leyes de las muestras compositadas por banco (Ley extraída).

$\overline{LD_k}$: Promedio de las leyes extraíble por banco (modelo diluido).

Una vez generado el gráfico de porcentaje de desviaciones simples promedio v/s covarianzas normalizadas (Gráfico 6), se procede a trazar una curva de tendencia que sea representativa de la nube de puntos. De esta manera se pudo determinar que, para una

desviación simple de un 20%, la covarianza normalizada correspondiente es de 0,03, valor que se asignó a la “tolerancia” a utilizar en este ejercicio.

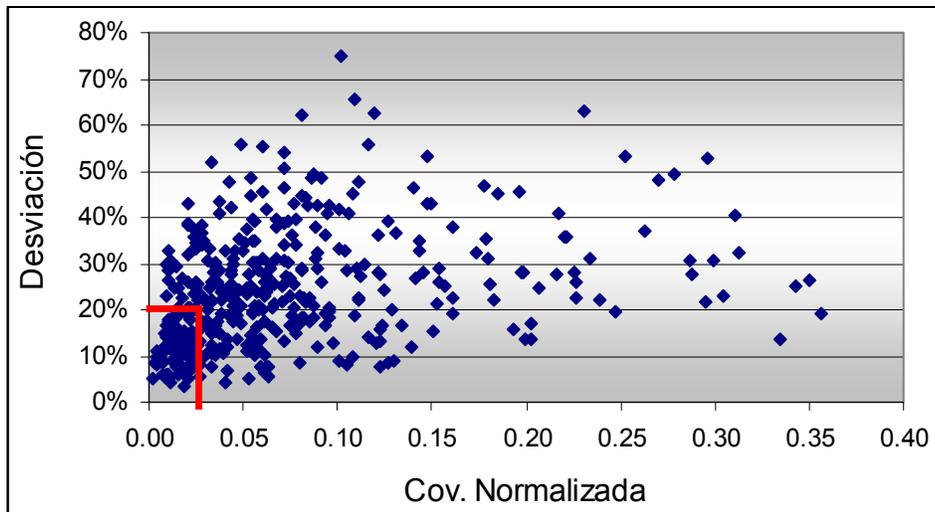


Gráfico 6. Análisis de la desviación simple como función de la covarianza normalizada.

Tolerancia

La tolerancia tiene como finalidad definir que columnas extraídas deben ser ajustadas según el muestreo histórico y cuales debiesen permanecer con la ley definida en el modelo diluido inicial.

Solamente las columnas ajustadas, en la que sus leyes serán reemplazadas por la ley de las muestras compositadas por banco hasta la altura extraída, son las que se ocuparan para la estimación de los bancos superiores con el método de mínimos cuadrados inserto en la subrutina LSQ.

4.1.5 Algoritmo (Asignación de ley a los bancos futuros a extraer)

Una vez ajustadas las columnas hasta la actual altura extraída, y solamente para aquellas columnas en que sus leyes hayan sido ajustadas a partir de las muestras históricas, la subrutina LSQ procede a construir la recta de regresión lineal basada en el Método de Mínimos Cuadrados, que permitirá predecir las leyes en alturas futuras a extraer.

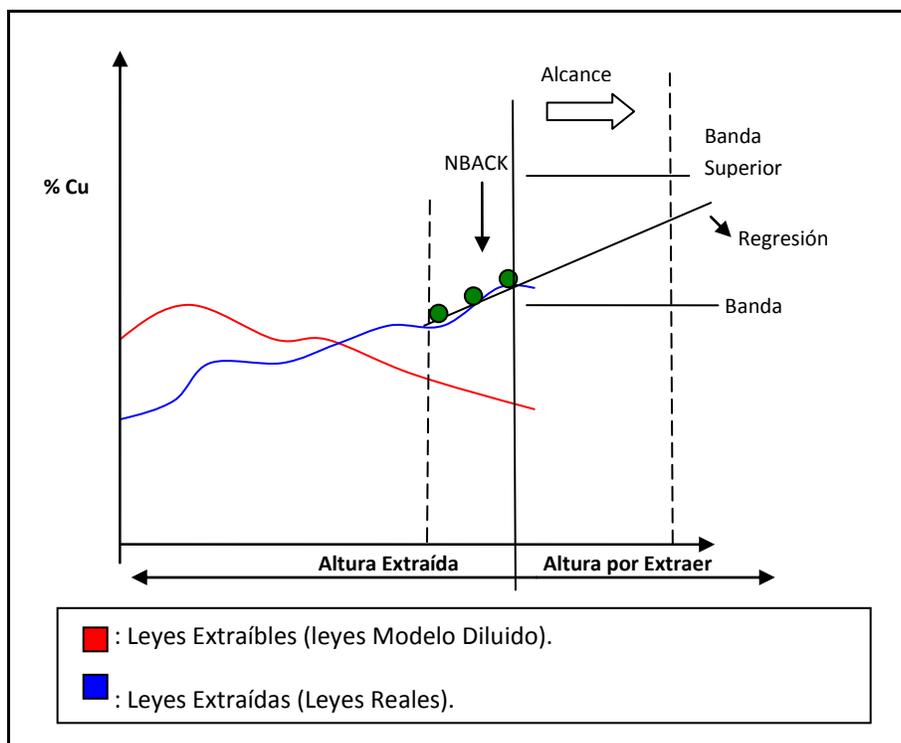


Figura 11. Esquema de la regresión lineal y sus condiciones de borde.

El algoritmo para predecir las leyes, presentado en la Figura 11, necesita tener en cuenta ciertas condiciones de borde o restricciones, las cuales son explicadas a continuación.

- a) NBACK: se refiere al número de muestras compositas por banco de la columna extraída, consideradas para que la subrutina LSQ genere la recta de regresión lineal según el método de Mínimos Cuadrados. Las muestras compositas por banco a considerar deben ser las últimas en haber sido extraídas, para tener datos más recientes y próximos a la estimación.

Para la definición de este parámetro se realizó un análisis de sensibilidad tomando valores de 3 a 5 muestras compositas a nivel de banco como NBACK. En esta ocasión se consideró información hasta diciembre del 2003, ajustando y re-estimando las columnas con los escenarios propuestos, con una tolerancia de 0,03, procediendo a comparar con el resultado real del año 2004.

	4 NBACK	5 NBACK	6 NBACK
COEF. MIN. CUAD.	0,026	0,028	0,030

Tabla 4. Sensibilización del N° de muestras compositas por banco.

Con esto se puede concluir que tomar más de 4 muestras compositadas por banco provoca un aumento de la dispersión respecto a las leyes extraídas u observadas en el mes.

- b) Banda superior: representa una condición de borde que restringe la estimación de la ley para una columna de extracción, de tal forma que si la ley es sobre estimada en un margen o porcentaje mayor al promedio de las muestras de la columna, la estimación no corre y la ley asignada es el promedio de las muestras más dicho porcentaje.
- c) Banda inferior: representa una condición de borde que restringe la estimación de la ley de una columna de extracción, pero en este caso si la ley es sub-estimada bajo cierto porcentaje o margen del promedio de las muestras de la columna, la ley asignada es el promedio de las muestras menos dicho margen. Estos márgenes de sobre y sub estimación son ingresados como inputs por el planificador para que la subrutina LSQ re estime las leyes en el corto plazo.

Al igual que en el ejercicio anterior, se reconstruyó la historia del sector Esmeralda hasta el año 2003, ajustando las columnas, las cuales servirán como estimador para predecir las leyes del año 2004, con una tolerancia de 0,03.

A continuación se procede a sensibilizar las bandas inferiores y superiores, analizando tres alternativas.

- I. CUT (t=0.01_115-85): se estimaron las leyes con una banda superior de un 15%, que quiere decir que la estimación de las leyes no sobrepase el 15% del promedio de las muestras; y una banda inferior de un 15%, que quiere decir que la estimación de las leyes no esté por bajo el 15% del promedio de las muestras.
- II. CUT (t=0.01_120-50): se estimaron las leyes con una banda superior de un 20%, que quiere decir que la estimación de las leyes no sobrepase el 20% del promedio de las muestras; y una banda inferior de un 50%, que quiere decir que la estimación de las leyes no esté por bajo el 50% del promedio de las muestras.
- III. CUT (t=0.01_140-60): se estimaron las leyes con una banda superior de un 40%, que quiere decir que la estimación de las leyes no sobrepase el 40% del promedio de las muestras; y una banda inferior de un 40%, que quiere decir que la estimación de las leyes no esté por bajo el 40% del promedio de las muestras.

De acuerdo a la Tabla 5, la simulación de las leyes estimadas para el año 2004 en el sector Esmeralda que más se ajusta a las leyes reales o extraídas por mes es la simbolizada por CUT (t=0.01_140-60), debido a que posee el menor coeficiente de mínimos cuadrados, lo que indica una menor variabilidad entre la simulación y las leyes observadas en el mes.

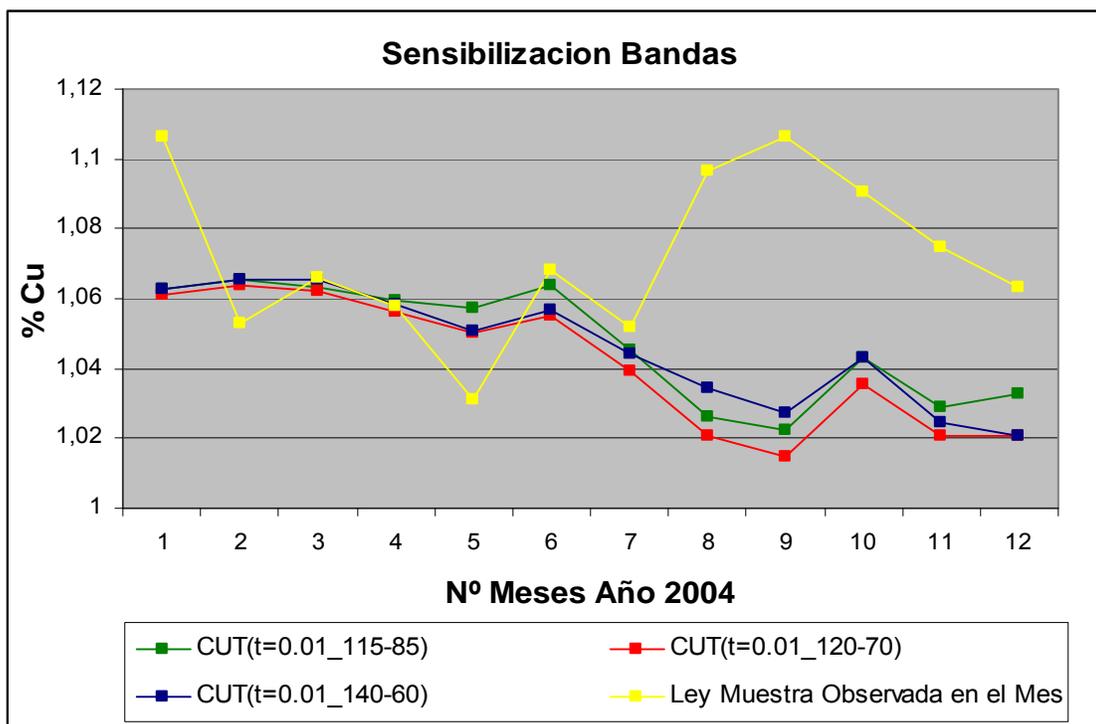


Gráfico 7. Sensibilización del ancho de bandas para el sector Esmeralda.

	CUT(t=0.01_115-85)	CUT(t=0.01_120-50)	CUT(t=0.01_140-60)
COEF. MIN. CUAD	0,020	0,027	0,019

Tabla 5. Simulación de Leyes estimadas año 2004.

4.1.6 Alcance de la estimación

Se refiere al número de bancos que la subrutina LSQ es capaz de estimar con un cierto grado de certeza, mayor que el modelo diluido.

Para tener una idea preliminar del alcance de la estimación de leyes, se puede observar la estimación global del sector Esmeralda durante el año 2004, donde se puede apreciar que la estimación es bastante buena durante todo el año (ver gráfico 8).

En la Tabla 6 se muestra que la estimación generada con LSQ se ajusta más que el modelo diluido a las muestras observadas en el mes durante todo el año 2004, debido a que posee un menor coeficiente de mínimos cuadrados. Pero esta diferencia es más notable aún, a favor de la estimación generada con LSQ, en los 10 primeros meses del año.

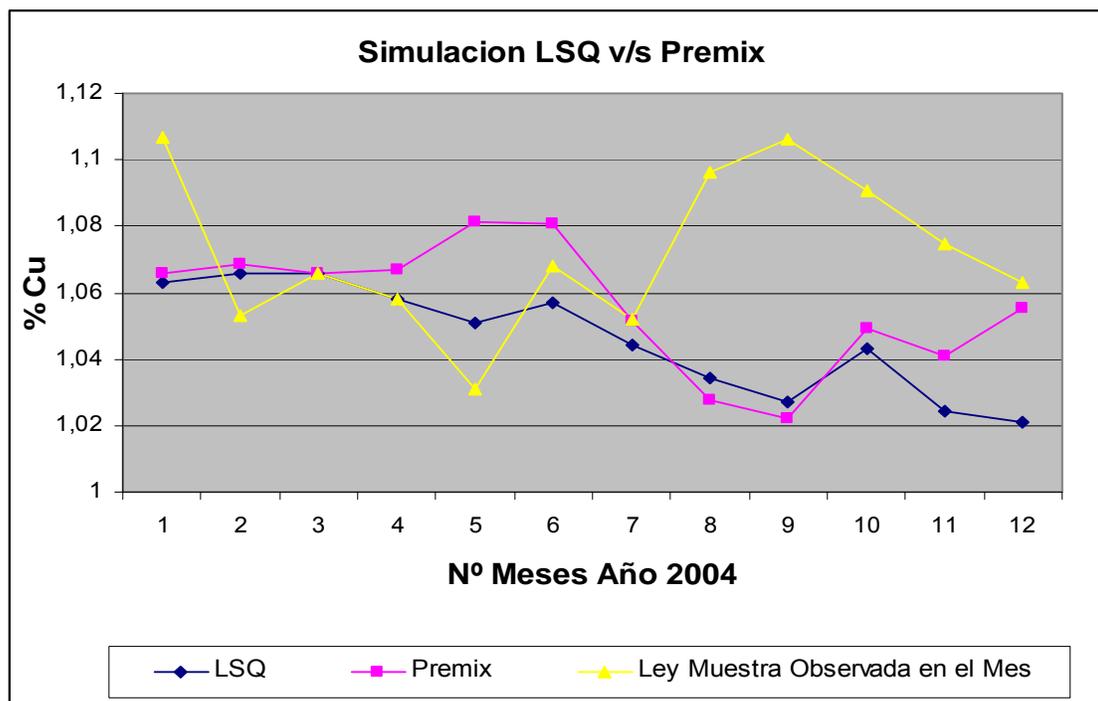


Gráfico 8. Alcance preliminar observado de la estimación del sector Esmeralda, Año 2004.

COEF. MIN. CUAD.	LSQ	PREMIX
5 primeros meses	0,0025	0,0045
6 primeros meses	0,0026	0,0046
7 primeros meses	0,0026	0,0046
8 primeros meses	0,0065	0,0094
9 primeros meses	0,0127	0,0164
10 primeros meses	0,0150	0,0182
11 primeros meses	0,0175	0,0193
12 primeros meses	0,0193	0,0194

Tabla 6. Alcance Preliminar observado de la estimación del sector Esmeralda, Año 2004

Mediante la velocidad de extracción se puede determinar indirectamente la altura hasta la cual la subrutina LSQ es capaz de predecir la ley, o dicho de otra manera, cuantos bancos es posible estimar por punto de extracción.

Para clasificar el consumo anual de bancos y poder asociarlo con el alcance por punto de extracción, se generó un gráfico de frecuencias que se muestra a continuación:

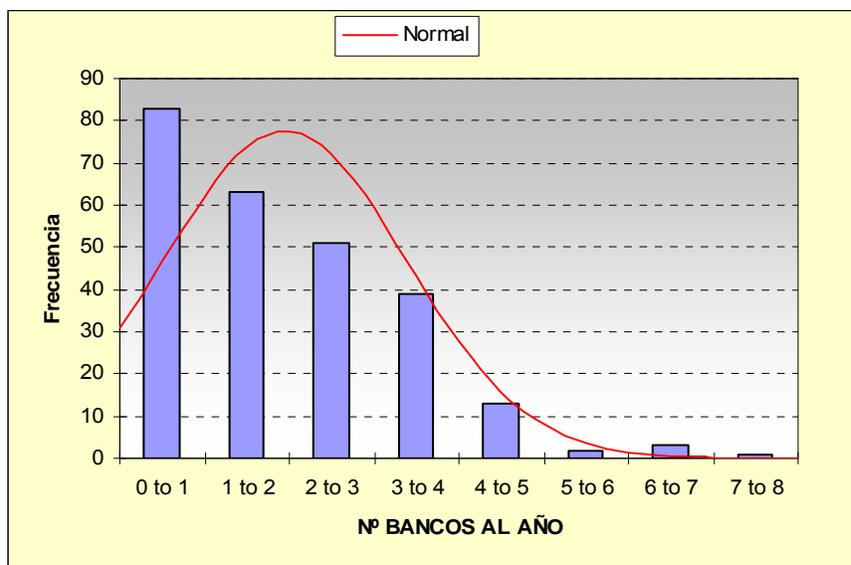


Gráfico 9. Frecuencias consumo de bancos anual de los puntos de extracción.

Nº Bancos al año	Frecuencia	Porcentaje	Porcentaje Acumulado
0 to 1	83	32,55%	32,55%
1 to 2	63	24,71%	57,25%
2 to 3	51	20,00%	77,25%
3 to 4	39	15,29%	92,55%
4 to 5	13	5,10%	97,65%
5 to 6	2	0,78%	98,43%
6 to 7	3	1,18%	99,61%
7 to 8	1	0,39%	100,00%

Tabla 7. Frecuencias consumo de bancos anual de los puntos de extracción.

Se observa que en el sector Esmeralda la clase más representativa, dentro de un universo de 255 puntos de extracción operativos durante el año 2004, es la que extrajo entre 0 a 1 banco durante el año 2004, equivalentes a 83 puntos de extracción, los que representan un 32,55% de los puntos operativos. Le sigue la clase con frecuencia de 63 puntos de

extracción, que extrajeron entre 1 a 2 bancos durante el año 2004 y que representan un 24,71% de los puntos operativos. Continúa la clase con 51 puntos de extracción, que extrajeron entre 2 a 3 bancos durante el año 2004, que representan un 20% de los puntos operativos. En cuarto lugar, se ubica la clase con 39 puntos de extracción, que extrajeron entre 3 a 4 bancos durante el año 2004, que representan un 15,29% de los puntos operativos.

Por último y en quinto lugar, se destaca la clase con una frecuencia de 13 puntos de extracción, que extrajeron entre 4 a 5 bancos durante el año 2004, que representan un 5,10% de los puntos operativos.

Para este estudio es necesario analizar puntos de extracción donde se hayan extraído sobre dos bancos por año, los cuales representan, aproximadamente, un 42% del total de puntos operativos durante el año 2004. Esta restricción se debe a que los puntos donde se han extraído menos de dos bancos durante el año poseen poca altura extraída, lo cual no permite generar la recta de regresión lineal por mínimos cuadrados, que necesita como mínimo una altura extraída de 80 metros o 4 bancos. Además, estos puntos con poca altura extraída generalmente son bien representados por el modelo diluido de largo plazo, lo que implica que la subrutina LSQ no ajusta sus leyes de columna de acuerdo a la información de los muestreos históricos, y por consiguiente no las estima.

Los puntos que han producido menos de dos bancos por año están en una condición de restricción geomecánica; o sea, con velocidades de extracción restringidas hasta 0.65 (Ton/m²-día), debido a que la altura extraída es menor al 30% de la altura de la columna de mineral primario.

Los puntos que han consumido entre dos a cuatro bancos por año están sobre el 30% de altura primaria y bajo el 100% de la altura económica, por lo tanto su condición es en régimen, o sea, con velocidades de extracción entre 0,65 y 0,80 (Ton/m²-día).

Los puntos que han consumido sobre 4 bancos durante el año están en una condición de sobre extracción, que es cuando se ha extraído sobre el 100% de la altura económica, donde las velocidades permitidas varían entre 0,8 y 1,0 (Ton/m²-día), pudiendo incluso superar este límite.

Por esta razón se escogieron 3 puntos de extracción para analizar su alcance, que están dentro de las clases más representativas del gráfico de frecuencias, según el intervalo de interés a analizar. Estos son el 2 33H, 4 32F y el 6 28 H.

La metodología de análisis es la siguiente:

- En primer lugar se obtienen las velocidades de extracción (V.E.), de la base de datos X-PLAN, la cual viene expresada en la siguiente unidad: (Ton/ m²-día).
- Luego se multiplica la V.E. por los días de cada mes, para obtener (Ton/ m²). A continuación este factor se divide por la densidad insitu que en este caso es 2.7 (T/m³), para de esta manera obtener los metros extraídos por mes.
- Posteriormente se obtienen los metros acumulados por mes, que al dividirlo por 20 m., que es la altura del banco, se obtiene la fracción del banco en forma acumulada que se consume por mes.

El análisis del alcance, de los puntos de extracción seleccionados, es el siguiente:

Pto 2 33H		
Toneladas Banco	14040	t
Altura Inicial	89	m
Altura Final	150	m
Altura Primario	320	m
30% Primario	96	%
Condición	Régimen tipo	

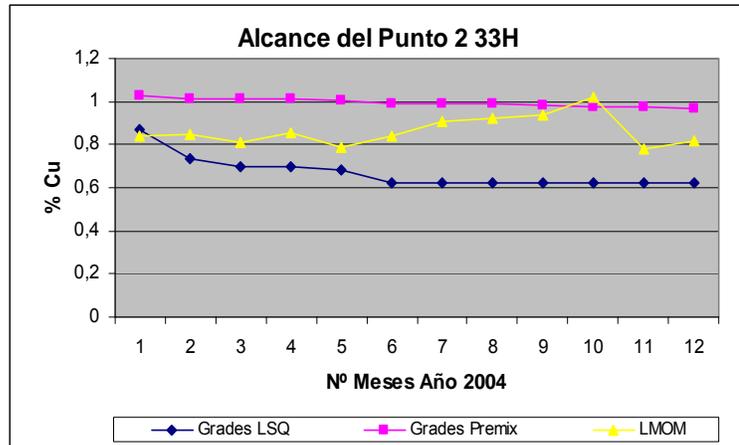


Figura 12. Punto 2 33H.

El Punto 2 33H presenta una estimación de la ley con mínimos cuadrados (LSQ), que se ajusta mejor a la ley de las muestras observadas en el mes (LMOM) que el modelo diluido (premix) durante los primeros 6 meses del año, en donde se extrajo una altura de columna de 32,26 m, equivalente a 1,61 bancos.

Pto 2 33H												
Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Veloc. Extracc.	0,53	0,40	0,30	0,62	0,67	0,37	0,49	0,53	0,68	0,48	0,58	0,44
Ton/m ²	15,78	11,69	9,21	18,57	20,80	11,07	15,25	16,46	20,28	14,73	17,28	13,61
m/mes	5,84	4,33	3,41	6,88	7,70	4,10	5,65	6,10	7,51	5,45	6,40	5,04
m. Acumulados	5,84	10,17	13,58	20,46	28,16	32,26	37,91	44,01	51,52	56,97	63,37	68,41
Bancos Acumulados	0,29	0,51	0,68	1,02	1,41	1,61	1,90	2,20	2,58	2,85	3,17	3,42

Tabla 8. Velocidad de extracción punto 2 33H.

El Punto 4 32F presenta una estimación de la ley con mínimos cuadrados (LSQ), que se ajusta mejor a la ley de las muestras observadas en el mes (LMOM) que el modelo diluido (premix) durante los primeros 7 meses del año, en donde se extrajo una altura de columna de 26,55 m, equivalente a 1,33 bancos.

Pto 4 32F		
Toneladas Banco	14040	t
Altura Inicial	93	m
Altura Final	142	m
Altura Primario	300	m
30% Primario	90	%
Condición	Régimen tipo	

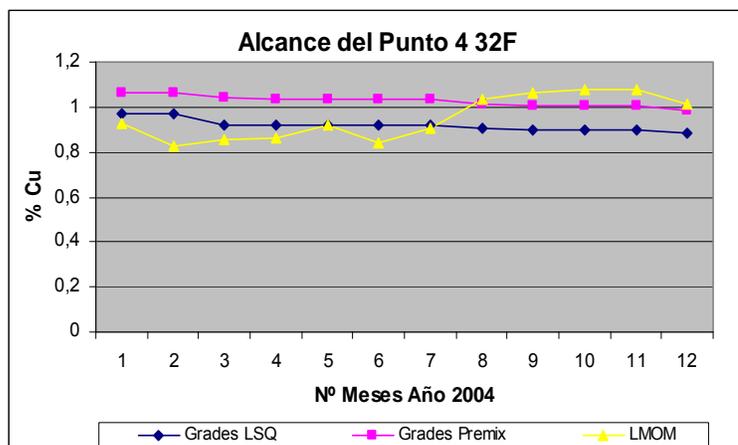


Figura 13. Punto 4 32F.

Pto 4 32F												
Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Veloc. Extracc.	0,37	0,31	0,32	0,25	0,32	0,37	0,44	0,56	0,43	0,42	0,44	0,56
Ton/m ²	10,98	9,02	9,77	7,59	9,77	10,98	13,58	17,45	12,78	12,87	13,20	17,33
m/mes	4,07	3,34	3,62	2,81	3,62	4,07	5,03	6,46	4,73	4,76	4,89	6,42
m. Acumulados	4,07	7,41	11,02	13,84	17,45	21,52	26,55	33,01	37,75	42,51	47,40	53,82
Bancos Acumulados	0,20	0,37	0,55	0,69	0,87	1,08	1,33	1,65	1,89	2,13	2,37	2,69

Tabla 9. Velocidad de extracción punto 4 32F.

El Punto 6 28H presenta una estimación de la ley con mínimos cuadrados (LSQ), que se ajusta mejor a la ley de las muestras observadas en el mes (LMOM) que el modelo diluido (premix) durante todo el año, en donde se extrajo una altura de columna de 97,05 m, equivalente a 4,85 bancos.

Pto 6 28H		
Toneladas Banco	14040	t
Altura Inicial	268	m
Altura Final	382	m
Altura Primario	200	m
30% Primario	60	%
Condición	Sobre Ext tipo	

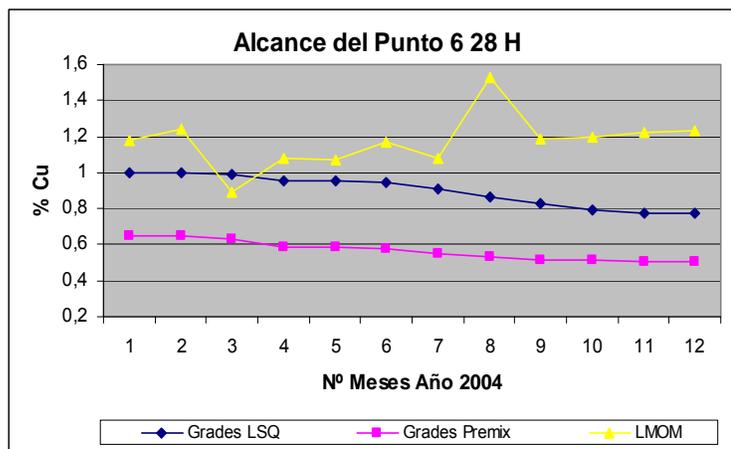


Figura 14. Punto 6 28H.

Pto 6 28H												
Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Veloc. Extracc.	0,45	0,51	0,60	0,47	0,29	0,71	1,18	1,32	1,36	0,68	0,39	0,64
Ton/m^2	13,29	14,76	18,72	14,01	9,11	21,15	36,43	41,04	40,80	21,20	11,67	19,84
m.	4,92	5,47	6,93	5,19	3,38	7,83	13,49	15,20	15,11	7,85	4,32	7,35
m. Acumulados	4,92	10,39	17,32	22,51	25,89	33,72	47,21	62,41	77,53	85,38	89,70	97,05
Bancos Acumulados	0,25	0,52	0,87	1,13	1,29	1,69	2,36	3,12	3,88	4,27	4,49	4,85

Tabla 10. Velocidad de extracción punto 6 28H.

Se puede concluir que para los puntos que se encuentran en una condición de régimen, la estimación es más acertada que el modelo diluido de largo plazo, durante los primeros 6 a 7 meses del año, en los cuales se extrae entre 1 a 2 bancos, que equivalen a un alcance de entre 20 a 40 metros.

En cambio, para los puntos que se encuentran en una condición de sobre extracción, la estimación es notablemente más acertada que la del modelo diluido de largo plazo durante todo el año, periodo en el cual estos puntos consumen sobre 4 bancos, que equivalen a un alcance superior a los 80 metros.

5 Incorporación de recursos marginales en la planificación de corto plazo

A continuación se realiza la validación de uno de los métodos presentados en el capítulo anterior. El método escogido será el de “mínimos cuadrados”, debido a que está inserto en una subrutina llamada “LSQ” incorporada en el módulo PC-BC del GEMS, software que dispone actualmente la División El Teniente, en particular la Superintendencia Gestión de Producción, y que es usada en la generación del programa anual Revisión – 2.

La subrutina LSQ es de reciente implementación en la División, específicamente a partir del año 2004, fundamentada en incorporar las leyes observadas (muestreo) en los programas de corto plazo, con horizonte máximo de planificación de un año.

5.1 Alcance del estudio

El desarrollo del análisis se enfocará en el sector productivo Esmeralda, y sus resultados durante el año 2005. La elección de este sector obedece principalmente a la problemática de crecimiento que ha presentado, reflejada en un incumplimiento de los programas de incorporación de área nueva a producción, obligando a la extracción de un mineral no considerado en los planes de largo plazo, con el fin cumplir las metas del corto plazo. Este material en general presenta una baja caracterización en los modelos de bloques, por lo cual se hace necesario incorporar las leyes observadas o de muestreo para una mejor estimación de su comportamiento.

Los antecedentes históricos se obtuvieron de la base de datos CPM98, disponible para consultas y “alimentación” a la aplicación computacional usada. El periodo de análisis será el año 2005, centrándose en la comparación de los resultados reales con respecto de los planificados en el Programa de Producción del año.

Sectores antiguos explotados: dado las características propias del yacimiento El Teniente, explotado desde 1910, se trabaja simultáneamente en varios sectores. Por tal razón, es fundamental conocer la posición espacial del sector productivo Esmeralda con respecto a los sectores que ya han sido explotados, y que tienen alguna relación con sus recursos, ya que estos son los que aportan el material quebrado a la zona en estudio y que generan dilución.

Sector que Diluye	Cota UCL
Tte. FN	2947
Tte. DN	2847
Tte. BN	2749
Tte. 1	2627
Tte. SB	2528
Tte. 4 SUR	2372

Tabla 11. Diluyentes de sectores agotados sobre Esmeralda.

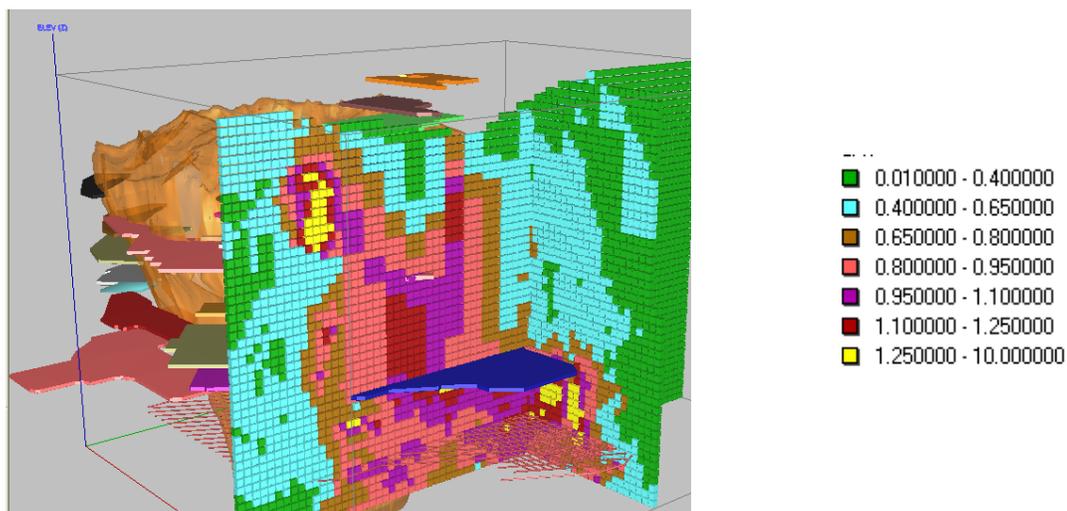


Figura 15. Sectores agotados sobre Esmeralda.

5.2 Introducción a la subrutina LSQ

La sigla “LSQ” significa Less Square, que traducido al español quiere decir Mínimos Cuadrados, y que corresponde al nombre de la subrutina incorporada en el módulo PC-BC del Software GEMCOM, que es el que actualmente se utiliza para la Planificación Minera de Corto Plazo en La División El Teniente.

5.2.1 Definición de reservas extraíbles para el corto plazo

Luego de haber re estimado los recursos mineros en el corto plazo, es necesario generar una evaluación económica con el PC-BC, para que éste a su vez determine las nuevas alturas de columna económica para el corto plazo. El software, en primer lugar, analiza diversos casos en los que es necesario o no calcular las nuevas alturas económicas para el corto plazo.

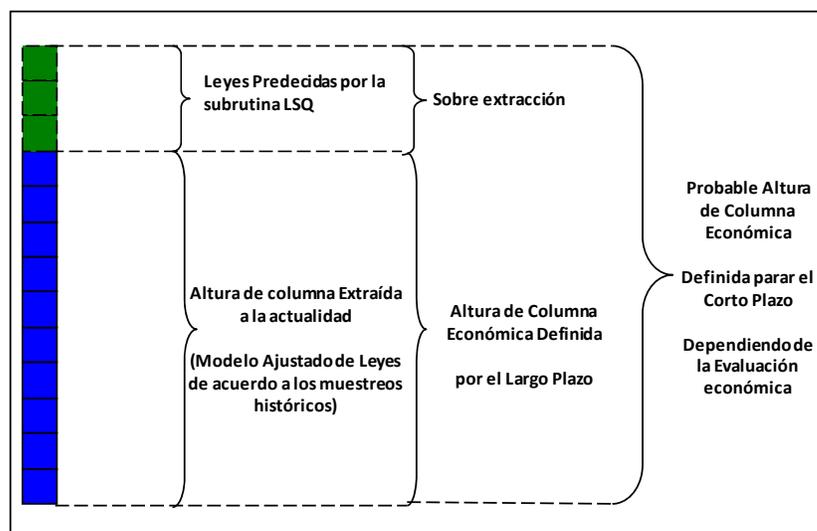


Figura 16. Caso N° 3.

Un tercer caso podría darse cuando a partir de la actual altura extraída se re-estiman un número de bancos, superando algunos de estos la altura económica extraíble definida por el largo plazo. En este caso, el software genera la evaluación económica considerando en la altura de columna a evaluar los bancos re-estimados; y si esta evaluación reporta un mayor beneficio, esta nueva altura pasa a ser la económica extraíble definida para el corto plazo. De lo contrario, sería la definida por el largo plazo.

En resumen, se puede decir que las reservas extraíbles en el corto plazo son generadas por una combinación de columnas económicas definidas en el largo plazo y otras determinadas con la evaluación económica generada en el corto plazo con la herramienta PC-BC, según corresponda.

5.2.2 Evaluación económica columnas de extracción

La evaluación económica utilizada por el PC-BC para determinar si es económica o no la extracción de los bancos estimados por sobre la altura extraíble definida en el largo plazo, puede ser generada mediante la siguiente alternativa.

Optimización directa: esta alternativa permite realizar una evaluación económica de los bancos que se encuentran por sobre la altura de columna económica extraíble definida por el largo plazo, donde es necesario conocer el detalle de los costos variables de la mina y la planta para determinar el costo Minco.

6.5.2.- Metodología para determinar las alturas de columnas económicas para el corto plazo

Las fórmulas a ocupar en esta metodología son las siguientes:

$$(1) RF = R_p * (P_{Cu} - C_{FR}) * f$$

$$(2) CM = (\sum_{i=1}^n C.Mina + \sum_{i=1}^n C.Planta)$$

$$(3) U_{i,j} = RF * L_{i,j} - CM$$

$$(4) V_i = \sum_{j=1}^n \frac{U_{i,j}}{(1+\alpha)^{\frac{HOD(j)}{F}}}$$

$$(5) \alpha = HOD(j) * 0.001$$

$$(6) BHOD = MAX \{V_i\}$$

Donde:

RF	: Revenue factor. (US\$/ (T*%Cu))
R _p	: Recuperación planta (%/100)
P _{Cu}	: Precio del cobre (US\$/Lb)
C _{FR}	: Costo fundición y refinación (US\$/T)
f	: Factor conversión de unidades (2204.6 Lb/T)
CM	: Costo Minco (mina-concentradora) (US\$/T)
C.Mina	: Costo mina variable (US\$/T)
C.Planta	: Costo planta variable (US\$/T)
U _{i,j}	: Valor económico del banco j-ésimo (US\$/T)
L _{i,j}	: Ley del banco j-ésimo correspondiente a la columna i-ésima (%Cu)
V _i	: Valor actualizado Neto de la columna i-ésima (US\$/T)
α	: factor de incremento de altura.
HOD	: Altura extraída correspondiente a la posición del banco j-ésimo (m)
F	: Velocidad de extracción (m/periodo analizado)
BHOD	: Altura Económica Corto Plazo (m)
j: 1...n	: N° de bancos a evaluar.

En primer lugar se debe calcular el Revenue Factor, que corresponde al ingreso económico de un banco en función del precio del cobre, la recuperación planta y el costo de fundición-refinación. Una vez calculado el Revenue Factor y conociendo el detalle de los costos de la mina y la planta según la alternativa, es posible calcular el costo Minco.

Posteriormente, se procede a generar una curva de número de bancos v/s el valor actualizado neto de la columna obtenido por la extracción de estos bancos. Debe considerarse que a medida que se extrae un banco ubicado a mayor altura, llegará un momento en que la ley tendrá una tendencia decreciente y por ende el valor económico del banco también disminuirá, llegando incluso a valores negativos. Además, debe considerarse

el factor $(1 + \alpha)^{\frac{HOD}{F}}$, que está en función de la altura extraída, el cual tiende a disminuir el valor actualizado neto de la columna a medida que se extrae un banco a mayor altura. Por estas dos razones, la curva mencionada anteriormente llegará a un punto de inflexión, que representa el máximo valor actualizado neto de la columna antes de que este tienda a la baja. De esta manera, la altura económica extraíble para el corto plazo queda definida por el punto máximo de la curva (Figura 17). Debe considerarse que esta metodología para calcular las alturas económicas para el corto plazo, solo es aplicable a aquellas columnas que están en condiciones similares a las descritas en el Caso 3 (Figura 17).

El resto de las alturas económicas de columnas quedan definidas por el largo plazo.

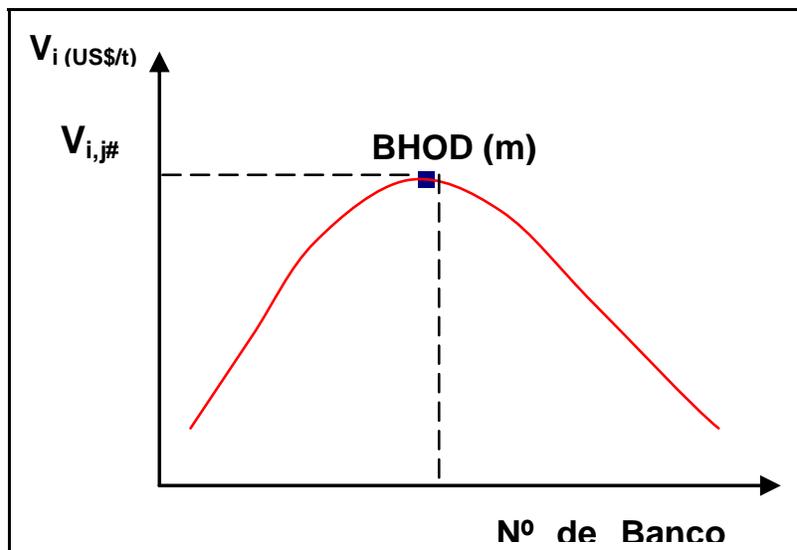


Figura 17. Gráfico de valores actualizados netos por punto de extracción v/s número de bancos

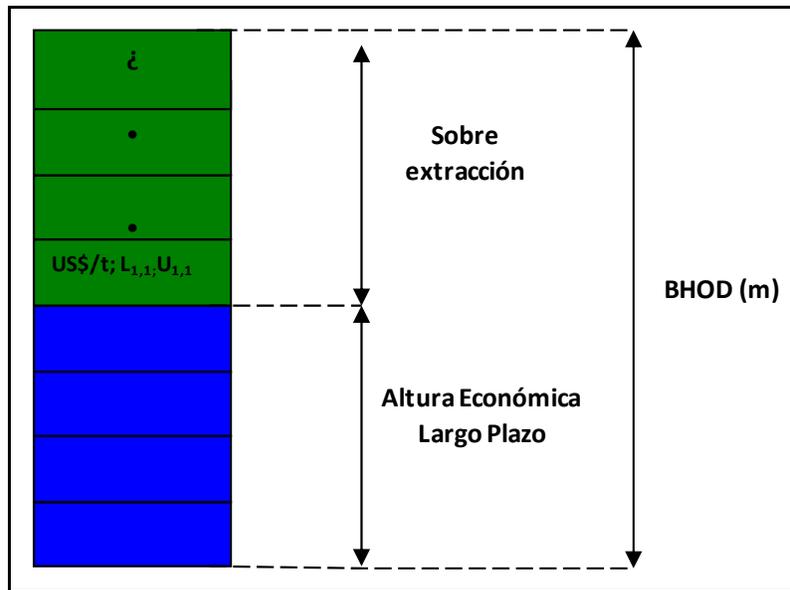


Figura 18. Esquema explicativo determinación altura económica extraíble para el Corto Plazo.

Para el caso del Esmeralda, los datos son los siguientes:

$$R_p = 89.44\%$$

$$P_{Cu} = 1.20$$

$$C_{fr} = C_f + C_r = 0.03 + 0.07 = 0.10$$

$$CM = C.Mina + C.Planta = 3 + 4 = 7$$

Cabe señalar que no fue necesario calcular el detalle de los costos variables de la mina y de la planta, debido a que los resultados finales fueron obtenidos de la documentación interna de las gerencias de mina y planta.

Ahora se procede a calcular el Revenue Factor, que es el primer input en los parámetros económicos del PC-BC.

$$RF = \frac{89.44}{100} * (1.2 - 0.1) * 2204.62 = 2169 \left(\frac{US\$}{T * \% Cu} \right)$$

El otro input correspondiente a los parámetros económicos en el PC-BC es el Costo Minco. Con estos dos inputs, y la estimación de leyes generadas por la subrutina LSQ, el PC-BC es capaz de calcular las alturas económicas para el corto plazo.

Conclusiones y recomendaciones

Para simplificar el análisis del resultado global de la mina Esmeralda, estos incrementos de alturas económicas fueron reportados como tonelajes o sobre-extracción.

Aporte y ley de mineral de sobre-extracción

No obstante el mayor aporte de sobre-extracción respecto a lo comprometido (un 109% de mayor aporte), la ley de sobre-extracción presenta una buena correlación respecto de la promesa hecha en el programa Revisión- 2, por lo cual se concluye que la estimación de la ley del material de sobre extracción, generada con la subrutina LSQ, es muy asertiva durante todo el año.

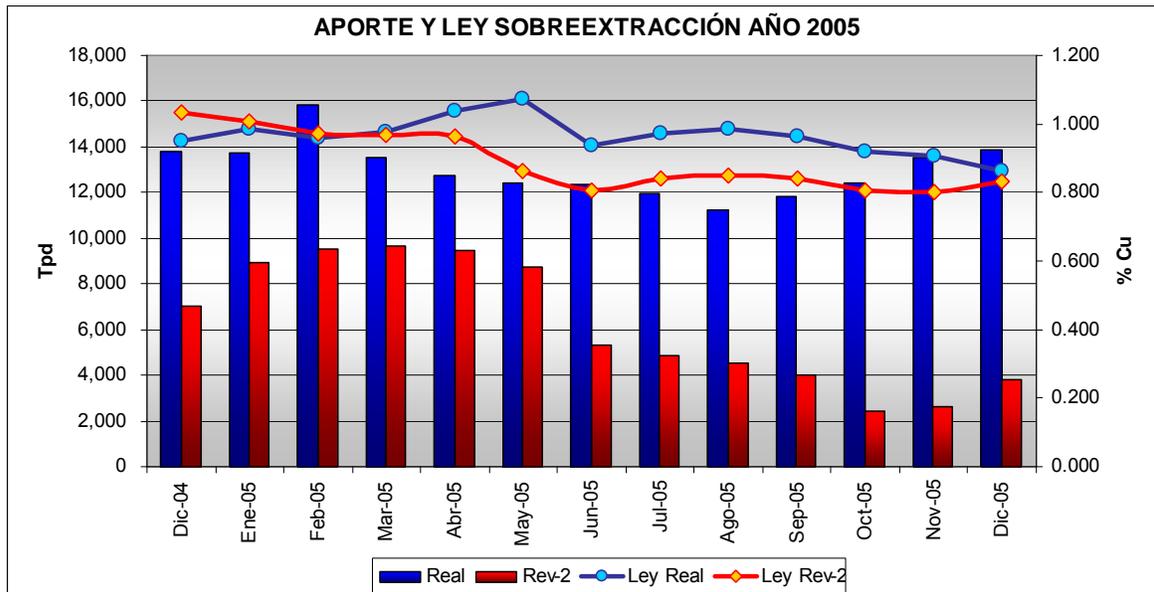


Gráfico 10. Aporte sobre extracción sector Esmeralda, Año 2005.

Los resultados reales muestran, por si solos, que el material que se encuentra por sobre la columna definida en la planificación de largo plazo, es económico en un horizonte de planificación corto plazo. Por esta razón, se justifica la incorporación de este material en los planes de producción de corto plazo, en donde sus leyes son estimadas mediante la metodología propuesta, cuyos resultados se acercan bastante a los de la extracción real.

Esta aseveración se valida al reproducir la extracción real del año 2005 de todo el sector (tonelaje por punto extraído realmente durante el año 2005), calculando la ley de Cu con los modelos de estimación definidos para el largo y corto plazo.

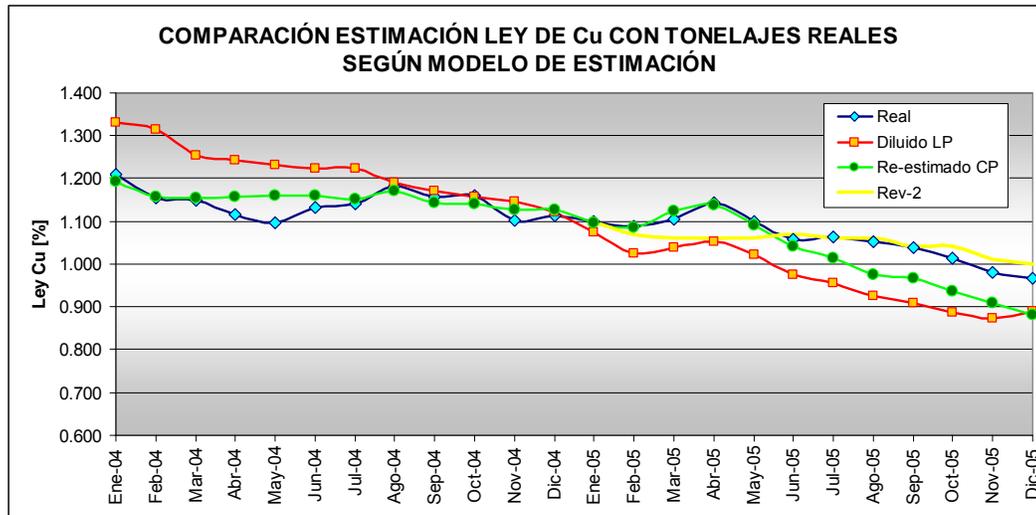


Gráfico 11. Ley calculo ley Cu con modelos de estimación, tonelaje real 2005

Del grafico anterior se observa que el modelo re-estimado para el corto plazo, reproduce de mejor forma la ley real observada.

Gráficamente se observa un déficit de producción en el área que presenta reservas remanentes, siendo suplido por el mayor aporte de sobre-extracción.

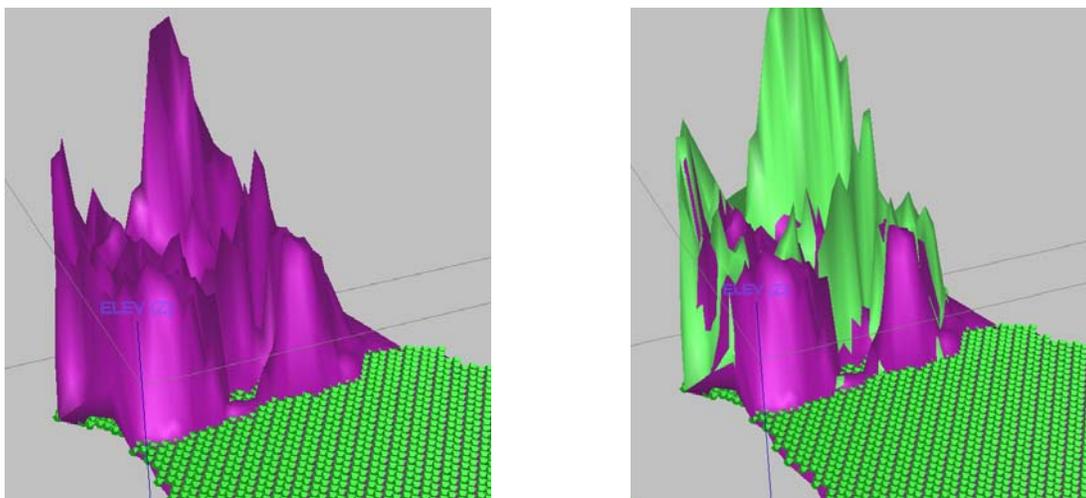


Figura 19. Déficit de producción de área.

En magenta se observa el sólido comprometido en el programa Rev-2, y en verde lo que realmente se extrajo, destacando que el mayor aporte está en la zona altamente explotada o en sobre-extracción.

6 Bibliografía

- Trout L P, (1995). Underground Mine Production Scheduling Using Mixed Integer Programming, in proceeding APCOM XXV, Brisbane, pp 395-400
- Araneda O., Gaete S., 2004. Continuous Modeling for Caving Exploitation. In Proceedings, MassMin 2004, Santiago, pp. 415-420. (Ed: A Karzulovic and M Alfaro).
- Barraza M. and Crokan P., 2000. Esmeralda Mine Exploitation Project. In Proceedings, MassMin 2000, Brisbane, pp. 267-278. The Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne.
- Barraza M., San Martin J. F., Montecinos M., 2004. Mine Technology and its
- Implementation and Control Reservas Norte – Sub 6, El Teniente. In Proceedings, MassMin 2004, Santiago, pp. 681-685. (Ed: A Karzulovic and M Alfaro).
- Diering T, 2000. PC-BC: A Block Cave Design and Draw Control System. In Proceedings, MassMin 2000, Brisbane, pp301-335.. The Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne
- Diering T, 2004. Computational Considerations for Production Scheduling of Block Cave Mines. In Proceedings, MassMin 2004, Santiago, Chile. (Ed: A Karzulovic and M Alfaro).
- Heslop T. G. and Laubscher, D. H., 1981. Draw Control in Caving Operations on Southern African Chrysotile Asbestos Mines. In Design and Operation of Block Caving and Sub Level Stoping Mines (Ed: D R Steward), pp. 755-774. Soc Min Engrs, AIME: New York.
- Kazakidis, V.N., and Scoble, M., 2003. Planning for Flexibility In Underground Mine Production Systems, SME Publications Dept. prior to Nov. 30, 2003.

7 Anexos

7.1.1 Generación del modelo de reservas.

Modelo de bloques

El modelo de bloques es generado por la Superintendencia de Geología y esta constituido por unidades denominadas UBC (Unidades Básicas de Cubicación) que son bloques de 20 m. de alto x 20 m. de ancho x 20 m. de largo.

La información que entrega el Modelo de Bloques a la Superintendencia Minero-Metalúrgica es la siguiente:

- Leyes de Cu, Mo, e impurezas como el Arsénico.
- Tipos de roca insitu (Primaria, secundaria, transición), material quebrado(activo o inactivo) y material desconocido.
- Densidades de los tipos de roca.
- Contenido de especies mineralógicas como (Bornita, Pirita, Calcopirita, Calcosina, Covelina, Molibdenita, Etc.).
- Wi (Work index [kwh/t]).
- CuNS (% de Cu no sulfuro con respecto al Cu Total).

El modelo de bloques contiene la información antes mencionada de los sectores que se encuentran en explotación, los que se explotaran a futuro y los que ya no están en producción. Además incorpora el aire asignándole valores de leyes igual a cero. El modelo de bloques de todo el yacimiento, que corresponde al Inventario de Recursos, se actualiza cada año incorporando las nuevas estimaciones de estos sectores.

En la actualidad se trabaja con dos modelos de bloques, estos son:

- Modelo de Bloques Insitu: se refiere a aquellos recursos que están fuera de las zonas hundidas. La zona hundida se define como el volumen dado por la proyección vertical desde el nivel de hundimiento hasta la superficie del polígono minero (minas ya explotadas o en explotación).

- Modelo de Bloques Quebrado: se refiere a aquellos recursos en los cuales ya no existe extracción minera y han pasado a formar parte del material “diluyente” de nuevos y futuros sectores productivos.
- Modelo de Reservas Extraíbles: el modelo de reservas extraíbles es generado en la Superintendencia Minero Metalúrgica, específicamente por planificación largo plazo, y la principal información que contiene son las alturas económicas extraíbles de columnas.

En primer lugar se consideran los modelos de bloque de material insitu y de material quebrado, siendo este último el que diluye al primero. La estimación de la dilución se hace mediante el modelo volumétrico de Laubsher (Heslop y Laubsher, 1981) y la posterior determinación de columnas económicas se hace mediante el algoritmo de Lane (De la Huerta, 1994) o el Modelo de la Universidad de Chile.

El resultado de esta secuencia de operaciones es un modelo de reservas extraíbles que no representa fielmente los techos de columnas observados en operaciones debido a que considera de manera conservadora las leyes el material quebrado. Esto genera un error al diluir las reservas y éste se incrementa al calcular las alturas económicas extraíbles.

Los muestreos periódicos demuestran que las leyes por sobre las alturas extraíbles siguen siendo altas, situación contradictoria de acuerdo a lo que dice el modelo de reservas extraíbles. Esta diferencia de alturas entre el modelo de reservas extraíbles y las alturas de columnas observadas en operaciones es denominada “sobre extracción”.

- Sobre extracción: se define como el material que se encuentra por sobre la altura económica de columna definida en el modelo de reservas extraíbles y puede estar compuesta por material insitu, quebrado o combinación de ambos, pero el caso que mas predomina es el de material quebrado.
- Dilución: mezcla de los distintos materiales presentes en la columna de mineral y sobre ella durante la extracción minera de un yacimiento explotado por hundimiento de bloques. Se pueden dar las siguientes situaciones de Dilución:
 - Columna de mineral insitu, con material de cráter de ley inferior a la ley de cierre.

- Columna de mineral insitu, con dos tipos de materiales de cráter. El primero con ley superior a la ley de cierre y sobre éste, material de cráter con ley inferior a la ley de cierre.
- Columna de mineral insitu, con material insitu de ley inferior a la ley de cierre sobre el mineral.
- Metodología de estimación de Dilución: D. H. Laubscher estudió el efecto de flujo de material diluyente y su incorporación en el tiempo como contaminación del mineral insitu en los puntos de extracción, estableciendo un Modelo de concepción empírica para predecir el comportamiento de las leyes en explotaciones mineras por Hundimiento de Bloques.

Su modelo anticipa el momento de aparición de la dilución, conocido como “Punto de Entrada de Dilución” (PED) expresado como porcentaje de la columna de mineral a extraer según la fórmula:

$$PED(\%) = \frac{A * f_e - B}{A * f_e} * C * 100$$

Fórmula 6. Punto de entrada de dilución.

Donde:

A: altura de la columna extraíble, que corresponde a la distancia vertical entre el nivel de hundimiento y la topografía.

f_e: factor de esponjamiento, el que está dado por un incremento de volumen al propagarse el hundimiento y es función de la fragmentación.

f _e	Fragmentación
1,16	Fina
1,12	Media
1,08	Gruesa

Tabla 12. Factor de esponjamiento de acuerdo al tipo de fragmentación⁴.

⁴ Fuente: Taller “Flujo Gravitacional en minería subterránea”, CIMM-CODELCO, 1995.

B: altura zona de interacción. Es la altura de la zona sobre el punto de extracción en la cual ocurre la mezcla de material y sobre la cual el tiraje es uniforme. Depende de la fragmentación del material hundido, del máximo espaciamiento entre los puntos de extracción y de la forma y dimensiones de los puntos de extracción. El espaciamiento entre los puntos de extracción también depende de la fragmentación.

C: factor de corrección: Es función de la regularidad del tiraje y está dado por la razón entre la media y la desviación estándar de las toneladas extraídas durante un período de tiempo dado, para un conjunto de puntos de extracción (independiente de su estado operacional) de un área abierta.

Este modelo reasigna leyes a las unidades básicas de cubicación (UBC) pertenecientes a una columna de extracción, considerando la ley insitu de las UBC's de esa misma columna, las leyes del material extraño a la columna insitu y el punto de entrada de la dilución.

Criterio ley de corte

La ley de corte es determinada por el largo plazo mediante el criterio de costo de oportunidad a través del algoritmo de Lane o el Modelo de la U. Chile.

El algoritmo de Lane, no se basa en una ley de corte marginal (ingresos=Costos), sino mas bien en una estrategia de ley de corte óptima variable en el tiempo que tiene como objetivo maximizar el VAN de los flujos involucrados en el negocio minero.

En un Block Caving la estrategia de ley de corte se traduce a las alturas de columnas que pueden estar formadas por varios bloques o UBC (Unidades básicas de cubicación). Estas alturas de columna extraíble pueden contener bloques con menor ley con respecto a la ley de corte óptima, pero si el VAN total de esta columna es el máximo que se puede obtener, no hay inconvenientes en que esta columna contenga bloques de baja ley. Esto se debe a la casi nula selectividad propia de los métodos de explotación de Hundimiento por Gravedad.

Se calcula un costo de oportunidad asociado a cada punto de extracción de un sector productivo sobre la base de una secuencia dada de puntos de extracción al interior de la envolvente marginal del sector, en el escenario en que la planta de proceso limita la capacidad productiva del negocio minero.

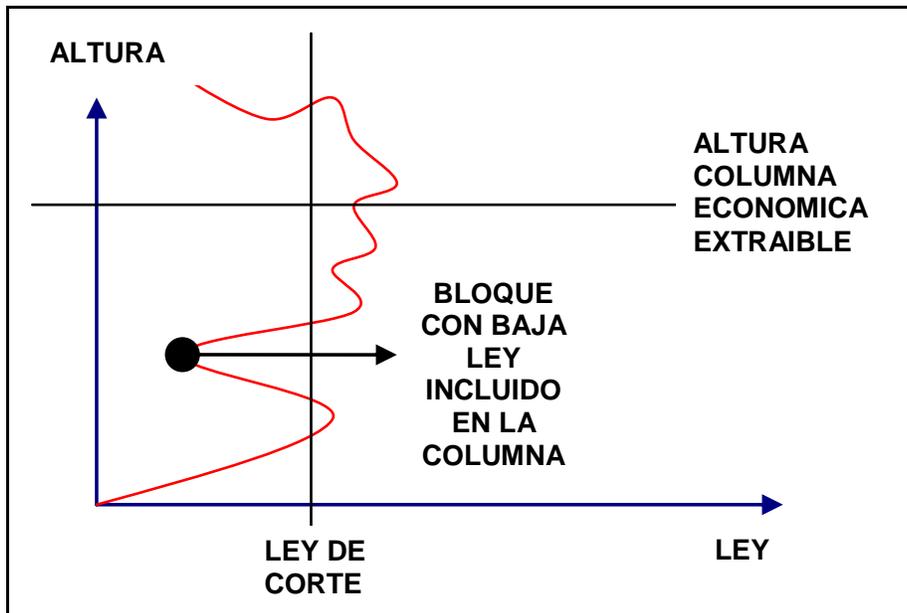


Figura 20. Variación de Leyes en la Columna Económica Extraíble.

De acuerdo a lo anterior Lane propone maximizar la siguiente ecuación:

$$\text{MAX } vi = \text{MAX} \left(\sum_{i=1}^n bi - V * r * t \right)$$

Fórmula 7. Maximización Lane.

vi : Incremento del valor presente.

bi : beneficio por extraer un bloque de la columna (Beneficio Marginal).

r : Tasa de descuento.

t : Tiempo en años.

V : VAN de las reservas remanentes a extraer.

La interpretación matemática de la ecuación propuesta por Lane es la diferencia entre el beneficio por extraer un número determinado de bloques de la columna i y el costo de oportunidad por no comenzar la extracción de las columnas subsiguientes en un mismo sector productivo.

La aplicación del algoritmo supone partir con un valor para V (típicamente $V=0$) y calcular v_i para las distintas alturas y elegir aquella en la cual dicho valor es máximo (para $V=0$, la solución es la marginalista). Con esta configuración de alturas para la secuencia, se calcula un nuevo valor de V y se repite el ejercicio hasta que converja. El costo de oportunidad calculado con la metodología descrita evalúa el efecto de la postergación de extracción de reservas al interior de la envolvente marginal de cada sector productivo.

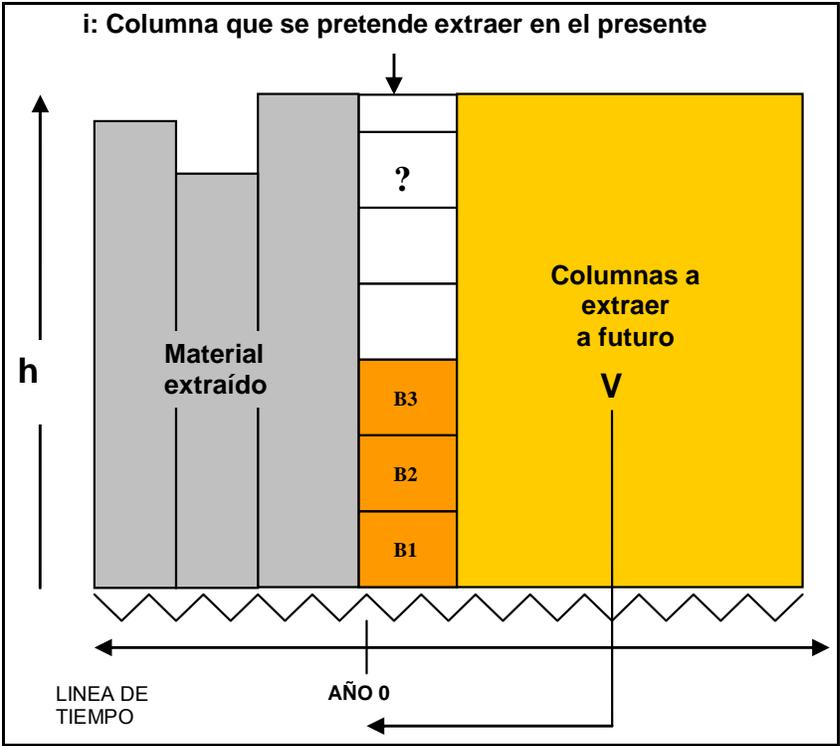


Figura 21. Explicación del algoritmo de Lane.

Por otro lado el Modelo de la Universidad de Chile es un algoritmo basado en programación lineal que también se utiliza para obtener una ley de corte óptima expresada mediante la determinación de la altura de columna extraíble.

Pero en su esencia significa utilizar la capacidad máxima en las distintas instancias del proceso productivo o en otras palabras nos dice cuánto y de que sectores productivos extraer para copar los cuellos de botella con el fin de maximizar el VAN.

En primer lugar se cargan los parámetros económicos y técnicos en una interface llamada Delphis. Estos parámetros son: precio del metal, costos variables, capacidad de malla de flujo, aumento secuencial de la producción hasta llegar a una capacidad régimen.

Posteriormente se hace una programación lineal en un lenguaje llamado Gams que toma los datos cargados en la interface y los lleva a un sistema de ecuaciones lineales de gran dimensión.

El Sistema de ecuaciones es gigante y es solucionado por un solver industrial externo que entrega soluciones lineales continuas (todos los números). Estas soluciones se devuelven en un proceso de re iteración a la programación lineal que a través de un proceso heurístico arroja una solución óptima mixta (números 0 y 1) que se traduce en alturas de columnas económicas suavizadas y óptimas. De todas maneras la solución óptima mixta debe ser sometida al criterio del planificador.

Las diferencias entre el algoritmo de Lane y el Modelo de la Universidad de Chile son las siguientes:

- *Tipo de competencia:* en el algoritmo de Lane los bloques que se pretenden extraer compiten por el aporte de producción con los bloques que se encuentran a continuación de éste dentro de un mismo sector productivo. En cambio en el Modelo de la Universidad de Chile la competencia por el aporte de producción es entre bloques de todos los sectores.
- *Capacidad reservada:* se refiere a que en el caso del algoritmo de Lane la planta se compromete a procesar una cantidad de tonelaje proveniente de cada sector productivo. En cambio el Modelo de la Universidad de Chile busca copar los cuellos de botella con el aporte de producción de todos los sectores, en donde no existen reglas de crecimiento, seguimiento y decrecimiento de la cantidad de tonelaje aporta cada uno de ellos.

Criterio agotamiento de puntos

A través del algoritmo de Lane o el Modelo de la Universidad de Chile se determina la altura de columna económica de los puntos de extracción. Una vez alcanzado el 100% de ésta altura se procede a declarar los puntos de extracción como agotados. El algoritmo de Lane y el Modelo de la Universidad de Chile entregan una política de leyes de corte que la División El Teniente la adopta para determinar la altura de columna extraíble con el objetivo de maximizar el VAN.