

MODELOS DE CORTO Y MEDIANO PLAZO

Mario Rossi

GeoSystems International, Inc., Estados Unidos

Mario Baudino

Universidad Nacional de San Luis, Argentina

RESUMEN

Los modelos de recursos y reservas de factibilidad o de Largo Plazo no son finales, si no que se deben considerar estimaciones intermedias y parciales en el tiempo, que son rápidamente reemplazadas por nueva información de sondajes o de producción. El objetivo y las tareas de estimación de recursos y reservas en momentos inmediatamente previos o durante el minado cambian radicalmente con respecto a los objetivos y metodologías aplicadas en la estimación de largo plazo (estudios de factibilidad, por ejemplo).

Definimos como modelos de recursos y reservas de “Largo Plazo” aquellos modelos utilizados en la planificación mina de Largo Plazo, que incluye típicamente planificación para períodos mayores a un año y hasta la vida útil de la mina. Estos Modelos de Largo Plazo (MLP) se utilizan para la predicción de flujos de caja, como es el caso de Estudios de Factibilidad, e incluyen una secuencia de minado, estimaciones de leyes y toneladas a ser recuperadas por volúmenes significativos pero variables. Aunque los MLP se construyen utilizando bloques de volúmenes relativamente pequeños, no se puede esperar que tengan la misma exactitud cuando se analiza la estimación bloque a bloque. A menudo la exactitud global se consigue por compensación de errores a pequeña escala (bloque a bloque), suponiendo que no existen sesgos significativos.

Es común que cuando se comienza la explotación del yacimiento, se requiera información de mayor detalle, gradualmente relleno los sectores o espacios con poca información para mejorar las primeras estimaciones de recursos y reservas “locales”. Esto es el caso cuando se realizan planificaciones mensuales, donde el presupuesto anual o semestral está basado en el detalle mensual. La adición de información de relleno y la correspondiente actualización de los modelos de recursos y reservas resultan así en una predicción más confiable para la producción en el corto plazo.

La definición de Modelos de “Mediano” y “Corto” Plazo varía mucho según las operaciones y compañías mineras, y también por región geográfica. Para este trabajo, definimos Modelos de Mediano Plazo a aquellos modelos que se utilizan en la planificación mina mensual, trimestral, o semi-anual. Un Modelo de Corto Plazo se construye para servir de base a la planificación semanal, y más comúnmente diaria; esto es, incluye los Modelos de Control de Leyes, construidos a diario para definir la selección mineral/estéril.

SHORT AND MEDIUM TERM MODELS

Mario Rossi

GeoSystems International, Inc., USA

Mario Baudino

Universidad Nacional de San Luis, Argentina

ABSTRACT

Most mineral resource estimates are not final. They are interim estimates pending more information and actual mining. At the time of actual mining, or just before mining, the nature of estimation is different. Results that are unbiased over a longer time scale are no longer sufficient, as more local estimates are required.

Resource models are said to be long-term when they are used for long term mine planning and Life of Mine (LOM) plans. The LOM plan is based on a reserve model, in turn converted from the resource model that provides estimates of tonnage and grade for the periods involved. Often, the LOM plan is scheduled according to variable units of time.

Long-term models are based on widely-spaced drilling, which is gradually infilled as mining advances. Since long-term models are by construction designed to provide global estimates with acceptable accuracy when considering volumes equivalent to a year or longer, it cannot be expected to perform well on small planning volumes.

For monthly planning, it may be necessary to increase the long-term model's reliability through infill drilling. The additional drilling is usually targeted in areas to be mined in the near-term. Thus, updating the long-term model with the new data often results in less uncertainty about the predicted cash flows.

In this paper, a medium-term model is meant to provide estimates on much smaller volumes than the long-term model. It generally implies a one to three months production volume. The models developed for daily ore/waste selection are called here short-term or grade control models.

MODELOS DE MEDIANO PLAZO

La actualización de un Modelo de Largo Plazo (MLP) utilizando sondajes de relleno o información de mayor detalle es básicamente el mismo proceso requerido para cualquier trabajo de modelamiento de recursos y reservas. Hay, sin embargo, algunas consideraciones importantes que distinguen a estos Modelos de Mediano Plazo (MMP) y que simplifican su obtención.

La actualización del modelo geológico cuando existen múltiples variables de interés que definen los dominios de estimación suele ser la tarea más onerosa. Típicamente se escogen zonas limitadas que definen el mes o trimestre a ser modelado (por ejemplo, volúmenes trimestrales móviles estimados mensualmente). El definir el modelo de Mediano Plazo sólo para los volúmenes relevantes permite limitar el alcance del trabajo. Para esas zonas relevantes, se considera la nueva información geológica proveniente de sondajes de relleno, descripciones de los cuttings de los pozos de tronadura, y mapeos de banco o de frentes de producción.

Como ejemplo de aplicación se describe brevemente un Modelo Trimestral para una mina de Cu-Au. En este caso, el ciclo de planificación de la mina ocurre a intervalos de 13 semanas, pero actualizado mensualmente. De hecho, entonces, se planifica todos los meses los volúmenes y leyes a ser extraídas en las siguientes 13 semanas. La metodología de trabajo prescripta incluyó:

Definición del volumen a ser minado en el próximo trimestre, junto con la creación del modelo de bloques de reserva contenido en ese sector. Los bloques del modelo pueden ser más pequeños con respecto a los del MLP, lo que se justifica si existen sondajes adicionales y/o pozos de tronadura.

El modelo geológico se actualiza cada mes utilizando los mapeos de bancos, frentes, y detrito de los pozos de tronadura. Esto implica modificar los polígonos y/o sólidos de cada una de las variables geológicas utilizadas en el modelamiento de reservas. reas de interés.

Las estimaciones de leyes se actualizan utilizando la nueva información disponible para los 3 meses. Es común utilizar la misma metodología que se aplica en el MLP, excepto que se aprovecha la mayor cantidad de información para incrementar la resolución del modelo a través del uso de bloques más pequeños. En todos los casos, y para facilitar comparaciones, la geometría y estructura de los Modelos de Largo y Mediano Plazo deben ser coincidentes, de manera tal de poder hacer comparaciones directas entre ambos.

Los nuevos modelos de leyes se comparan con el MLP y las reconciliaciones de mina para unos seis meses anteriores, para evaluar las diferencias con la producción y la predicción del MLP y facilitar el control sobre las predicciones y los planes de mediano plazo.

Este esquema de trabajo es tal que el nuevo MMP no debe consumir más de 3 o 4 días de trabajo y sin requerir recursos humanos adicionales. Este objetivo se logra después de una curva de aprendizaje que suele involucrar un trabajo inicial de seteo del sistema, desarrollo del protocolo o procedimiento de trabajo específico, y un poco de experiencia adicional en el manejo y la evaluación de los resultados.

La Figura 1 muestra un ejemplo de los dominios de estimación de cobre total (CuT) para una vista parcial de un banco, que corresponde al volumen a ser minado en el siguiente trimestre. Los bloques de mayor tamaño corresponden al MLP, mientras que los pequeños corresponden al MMP. La definición de dominios de estimación no cambia, y está basada en una combinación de litología, mineralización, alteración, y dominio estructural. Nótese que hay una coincidencia general entre ambos modelos, pero las diferencias en los contactos son significativas.

Las leyes de CuT y Au fueron estimadas utilizando la misma metodología que en el MLP, esto es, Krigeage Ordinario (KO) utilizando los mismos planes de kriging. Los datos (compósitos) utilizados fueron todos los disponibles, incluyendo datos utilizados para estimar el MLP, además de sondajes de relleno y pozos de tronadura. Las diferencias más significativas de leyes están en los contactos de las distintas zonas, lo que es en esencia el objetivo de un MMP: lograr una mejor

definición local y de borde. Las diferencias pueden ser ganancia o pérdida de mineral, pero generalmente con mejor delineación de las zonas de altas y bajas leyes.

La Figura 2 muestra la comparación de los errores relativos para las estimaciones mensuales de CuT de los dos modelos (MLP y MMP) con un modelo de referencia, construido utilizando simulaciones condicionales, y calibrado a la información de producción. En el eje Y se muestran los Errores Relativos, calculados como porcentaje con respecto al modelo de referencia. Errores negativos implica que la ley de CuT fue subestimada. En todos los casos se observa que hay una subestimación de leyes, pero salvo por los dos primeros meses, el MMP predice mejor las leyes del Modelo de Referencia para casi todos los meses. Incluso en el caso de Abril, la ley es muy similar a la del modelo de referencia.

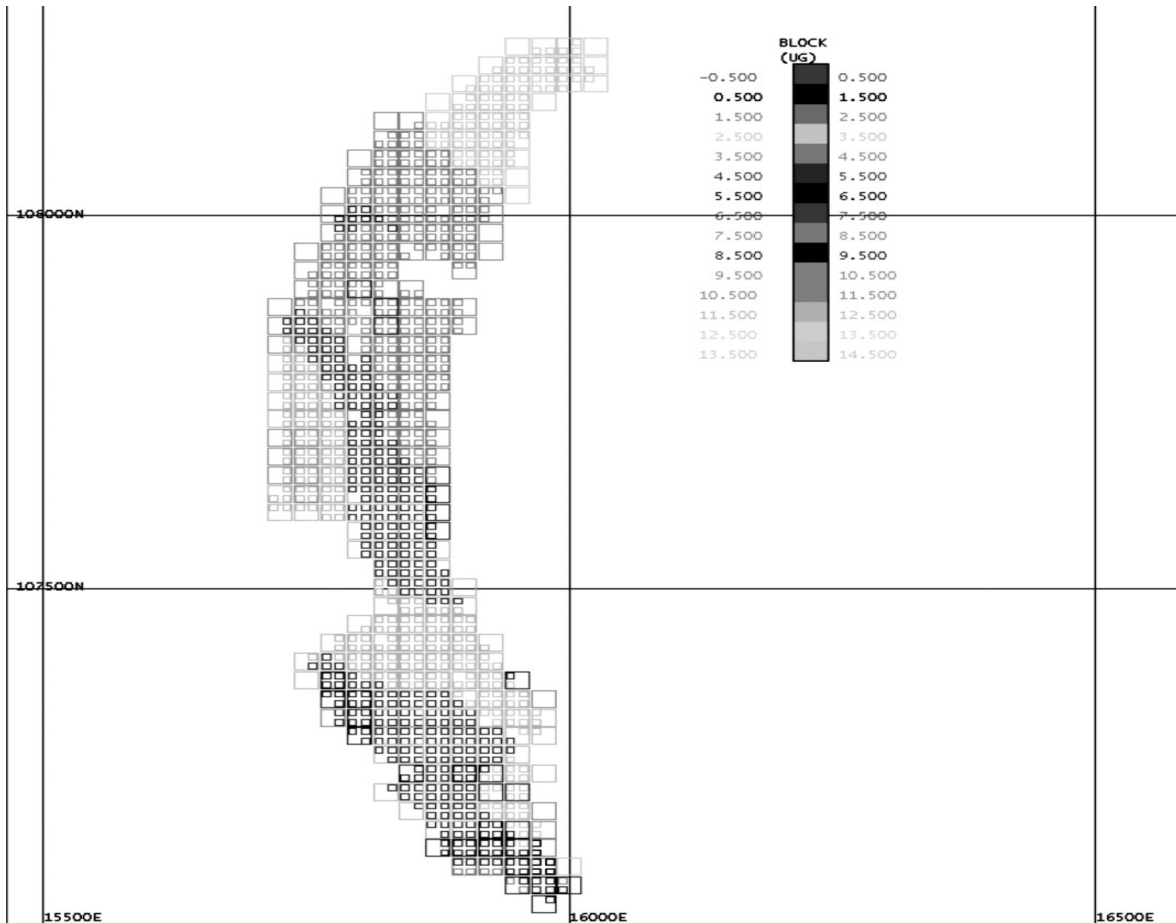


Figura 1: Dominios de estimación de CuT para los MLP (bloques grandes), MMP (bloques pequeños)

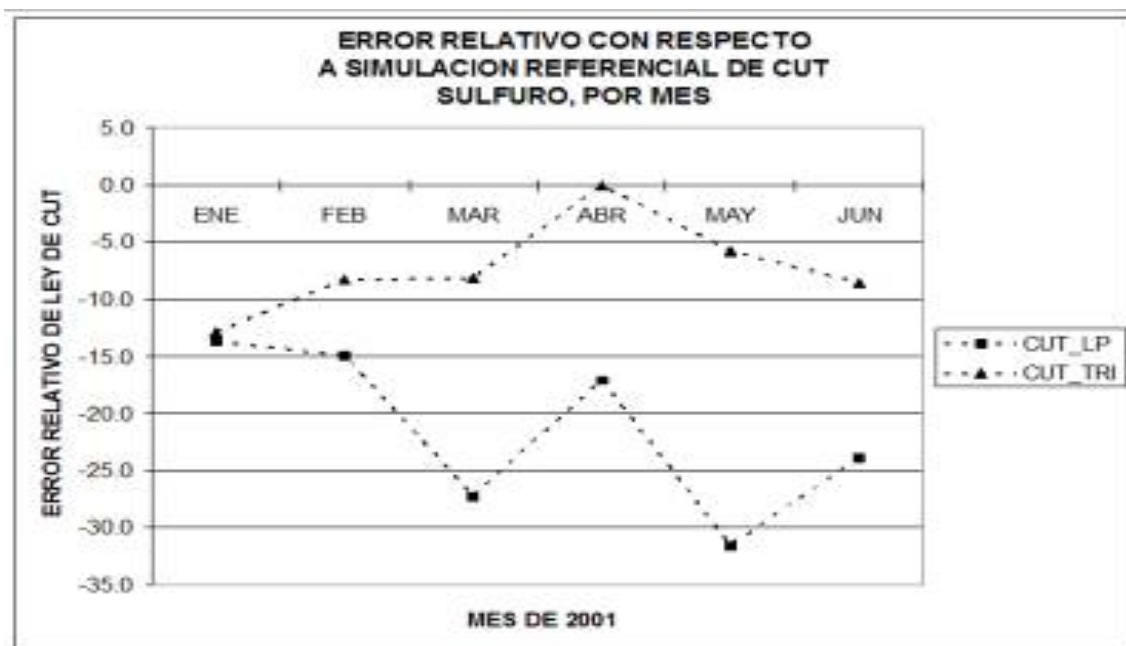


Figura 2: Errores relativos, modelos MLP y MMP vs. modelo de referencia, calibrado con datos de producción

CONTROL DE LEYES

El proceso de selección mineral/estéril (o control de leyes) en una operación tanto subterránea como a cielo abierto es el punto de decisión más crítico en la mina. Esta decisión, que es típicamente irreversible e irrevocable, es la que define la viabilidad final de la operación. Hacer un buen trabajo en el control de leyes ha salvado el cierre a muchas operaciones y ha llevado al éxito a muchas otras. Los errores cometidos en este proceso no puede ser compensados, además, por otro tipo de errores, como puede ser el caso de la estimación de recursos.

En el caso de operaciones de cielo abierto, ésta es generalmente una decisión diaria, y comúnmente basada en los análisis de las muestras de pozos de tronaduras, o de sondajes de aire reverso. En el caso de las minas subterráneas, esta decisión se toma cuando se completa el diseño de los sectores a ser explotados, que, salvo pocas excepciones, son clasificados como mineral o estéril semanas o meses antes de ser extraídos.

El control de leyes es clave para:

- Maximizar la recuperación del recurso: una vez que se llega a una determinada posición en la mina, la única decisión que resta es el destino del material, no si se saca o no.
- Optimizar el valor económico recuperado: sin ser necesariamente excluyente del punto anterior, se utiliza el control de leyes como una herramienta de optimización de resultados económicos.
- La planta de procesamiento comúnmente trabaja mejor cuánto más limitadas son las variaciones en leyes, tanto de los minerales económicos como de los nocivos.

Hay cuatro aspectos principales a considerar en el proceso de control de leyes: clasificación del material; ley(es) de corte; funciones de pérdida; y el grado de selectividad, o la habilidad de la operación para acercarse lo más posible a una selección libre.

La clasificación es la decisión de llevar cada *lote* de material a su destino. Un bloque o camionada es seleccionado como mineral si las ganancias que resultan de procesarlo superan los costos correspondientes de minarlo como estéril. Existen muchas definiciones de los costos marginales (o de procesamiento), una de las cuales se puede escribir como:

$$z_c = \frac{c_t + (c_o - c_w)}{pr} \quad \left[z_c = \frac{c_t}{pr} \right]$$

Donde c_t es el costo unitario (por tonelada) de tratamiento, c_o es el costo unitario de minado del lote como mineral, c_w es el costo unitario de minar el mismo lote como estéril, r la recuperación metalúrgica (generalmente en porcentaje), p es el precio unitario de venta del metal, y z_c es la ley que convierte la ganancia en cero (ley de corte). En esta Ecuación, los costos Generales y Administración (G&A) y de minado en general no se consideran, sólo los costos diferenciales de minarlo como mineral o estéril.

La minimización de los errores en la clasificación del material se muestra en la Figura 3. El esquema muestra, en una situación hipotética, los valores estimados en el eje X, mientras que en el eje Y se muestran los valores verdaderos pero desconocidos al momento de hacer la estimación. Una ley de corte relevante, 2.0 gpt en este ejemplo, define 4 cuadrantes en el gráfico.

En los Cuadrantes I y IV no existe error; si el bloque se estimó como mineral (eje X, mayor a 2.0 gpt) y el valor verdadero (eje Y) es mayor a 2.0 gpt, el bloque se clasifica correctamente como mineral. Si la estimación y el valor verdadero están por debajo de 2.0 gpt, el bloque se clasifica correctamente como estéril. Obsérvese que no importan los errores (diferencias entre los valores estimados y verdaderos) si es que la clasificación es correcta.

En el caso de los Cuadrantes II y III, se comete un error de clasificación; en el primer caso se estima el bloque como mineral, cuando en realidad era estéril, y por lo tanto se envía dilución a la planta; todos los bloques del Cuadrante III se estiman como estéril y se envían a los botaderos, cuando en realidad debieron haber sido procesado en la planta.

El modelo de Control de Leyes (CL) se puede obtener con distintas metodologías de estimación. No todos los métodos son adecuados para minimizar los errores de clasificación, que son una de las fuentes de pérdidas económicas más grandes en una mina en operación.

Los métodos de estimación se clasifican aquí en convencionales, basados en alguna forma de krigeage, y basados en simulaciones condicionales geoestadísticas. Métodos basados en simulaciones condicionales resultan generalmente en una mejor clasificación de los bloques, con una correspondiente mejora económica que puede ser significativa. Esto es porque los métodos convencionales y el kriging sufren por su característica de suavizar los valores estimados, sin poder reproducir la variabilidad geológica evidenciada por los datos utilizados.

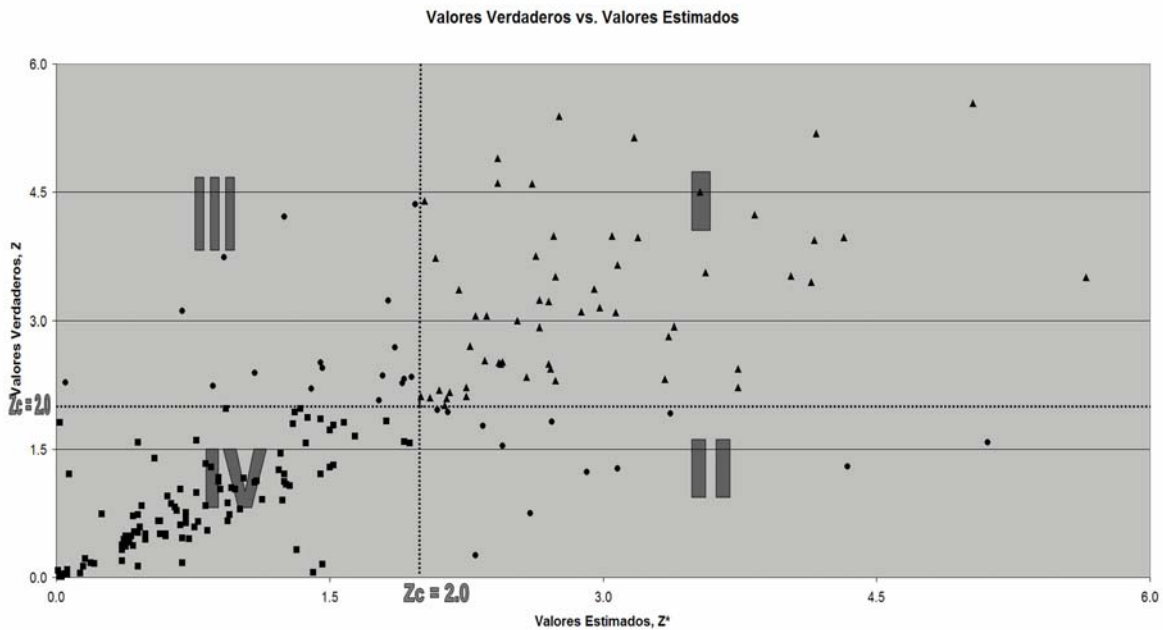


Figura 3: Errores de clasificación de material

Métodos Convencionales

Algunos de los métodos convencionales comúnmente utilizados incluyen promedio aritmético de leyes de pozos de tronadura, estimación por inverso de la distancia, y estimación por vecino más cercano. Desafortunadamente, y a pesar de grandes avances tecnológicos disponibles, muchas operaciones no aprecian la importancia de esta tarea diaria, y como consecuencia de esto implementan métodos por demás simplistas y sub-óptimos, dedicándoles menos recursos, tiempo, y planificación al proceso de control de leyes. La flexibilidad operacional que muchas minas a Cielo Abierto tienen no es aprovechada, y no hay conciencia de las posibles mejoras con muy poco esfuerzo adicional. Como razón o excusa principal, se escucha el típico *¡siempre lo hemos hecho así!*. Esto también es cierto para minas subterráneas, pero en menor grado, por la falta de flexibilidad operacional referida.

En el proceso de control de leyes en un Rajo se define inicialmente un modelo de bloques en el sector a ser volado, con bloques de tamaño similar al espaciamiento nominal de los pozos de tronadura. La ley predicha es el promedio aritmético de los pozos que caen adentro del bloque. Existen muchas variantes, incluyendo tomar el promedio de los 4 pozos de tronadura que están en los vértices de los bloques, métodos bastante populares en algunas minas de Au en Nevada [2].

Además de simples promedios, en algunos casos se implementan métodos de estimación sencillos, incluyendo el vecino más cercano y alguna variante del Inverso de la Distancia. Pero en todos los casos, dos características que sobresalen es que a) el estimador utilizado es simplista, se aplica sobre leyes, y puede ser sesgado dependiendo de la característica de la mineralización; y b) que el tamaño de los bloques definidos es injustificablemente grande con relación a la densidad de información disponible.

Métodos Basados en Krigeage

Principalmente durante la década de los '80, métodos de control de leyes basados en kriging comenzaron a ser más populares. Aunque se utilizan distintos tipos de kriging, los más comunes son el kriging ordinario (KO) y el de indicadores (IK).

En el caso del KO, la aplicación es similar a lo descrito para los métodos convencionales. El KO se utiliza para estimar las leyes, y basado en las leyes de corte relevante, se definen los paneles de mineral y estéril. La motivación para utilizar el KO está relacionada con ser un método de mínimos cuadrados que busca minimizar la varianza de estimación. Sin embargo, en la práctica, esta ventaja teórica se desdibuja por el efecto de suavización natural en todos los estimadores ponderados, y en algunos casos por implementaciones poco cuidadosas. Pero principalmente porque la minimización de la varianza de estimación no debiera ser el criterio de optimización utilizado en el control de leyes [6].

Muchas variantes de IK se han intentado también, siendo la lista demasiado larga para detallar aquí. La más sencilla es la aplicación de un indicador de ley único, correspondiente a la ley de corte, que estima la probabilidad de cada bloque de estar por encima o por debajo de la ley de corte.

Una de las variantes más sofisticadas y que se ha probado con éxito para cierto tipo de yacimiento es el Método del Indicador de Equilibrio (Breakeven Indicator, o BEI por sus siglas en inglés), según se describe en Douglas *et al.* (1994). Fue implementado primero en los rajos de la operación Jerritt Canyon, al Norte de Elko, Nevada, (EEUU), a principios de la década de los '90.

El BEI utiliza una combinación de krigeages de indicadores y de leyes. Primero se estima un indicador de mineral/estéril que predice la probabilidad de mineral para un bloque determinado $P_o(x)$. Los pozos de tronadura con leyes de mineral se utilizan entonces para calcular la ley de mineral de ese mismo bloque, $Z_o(x)$. Por otra parte, los pozos de tronadura con leyes de estéril se utilizan para estimar la ley del estéril correspondiente, $Z_w(x)$. Luego, la ganancia esperada se estima ponderando por la probabilidad de mineral/estéril estimadas:

$$E(R) = P_o \cdot R(Z_o) + (1 - P_o) \cdot R(Z_w) \quad (1)$$

La función de ganancias se calcula tradicionalmente como $R = (\text{precio}) * (\text{recuperación metalúrgica}) * (\text{ley}) - (\text{costos})$, con los costos incluyendo solamente los costos de procesamiento. Esta es la misma Ecuación que define la ley de corte marginal y no incluye los costos de extracción, generales y administración, y otros, considerados como costos ya consumidos o *hundidos* (*sunk costs*, por su terminología en inglés).

La selección de mineral/estéril se toma en el valor dólar por tonelada, estimado con la Ecuación (1). La ponderación por probabilidades resulta indirectamente en un análisis de riesgo/beneficio. Si la ley de la porción (probabilidad) de mineral es alta, entonces con una probabilidad baja la Ecuación (1) se hace positiva. Esto es lo mismo que decir que leyes altas pagan por mayor cantidad de dilución, por el mayor valor intrínseco de la mineralización; por el contrario, si la ley de la porción mineralizada del bloque es baja, entonces la probabilidad de que sea mineral debe ser correspondientemente alta para que la Ecuación (1) sea positiva, y el bloque sea enviado a planta. Este análisis se puede ver calculando la probabilidad que corresponde a la ley de corte, por la cual $E(R)=0$:

$$P_o(BE) = \frac{-R(Z_w)}{R(Z_o) - R(Z_w)} \quad (2)$$

Por tener implícita una estimación de cuánta dilución paga la ley de mineral para cada bloque, el método está diseñado para mejorar la selección de mineral/estéril a lo largo de los contactos. Si los paneles a ser minados son de volumen grande, la razón de superficie contacto por tonelada de mineral es baja. Lo opuesto es cierto si las zonas mineralizadas son más pequeñas. Para este último tipo de mineralización, característica de yacimientos de Au, el BEI ha probado ser muy efectivo.

La Figura 4 muestra un ejemplo de cortes de selección y destino en un Rajo Abierto obtenidos utilizando dos métodos, un Inverso de la Distancia al cubo (ID3), y el BEI. Los cortes sombreados corresponden al ID3, mientras que los polígonos sobreimpuestos corresponden al BEI. Los distintos colores y sombreados representan los distintos destinos de material (10 en total, incluyendo estéril). Los destinos de mineral están sub-divididos por rangos de leyes y presencia o no de elementos nocivos.

Obsérvese como existen diferencias significativas entre ambos métodos, tanto en el volumen como en la orientación y distribución espacial de los cortes. Según producción, el BEI fue claramente superior. Pero más allá de cuál método sea el que resulta mejor, lo que se pretende ilustrar acá es que las diferencias entre un método de modelamiento y otro pueden ser muy significativas.

Además de los posibles beneficios económicos, hay que considerar que la operación no tiene el flujo de selección libre, como suponen todos estos métodos. Esto significa que el carguío depende de la dirección de minado, geometría del panel a ser extraído, y cómo se ha volado (tronado) el sector. En el caso del BEI, se obtiene el beneficio adicional de suavizar las esquinas de los paneles, disminuyendo la cantidad de esquinas de ángulo agudo o recto, que son áreas de alta dilución. Por lo tanto, el BEI resulta en menor cantidad de dilución y pérdida de mineral no planificada, porque puede extraer más fielmente los paneles delineados.



Figura 4: Comparación de paneles de control de ley utilizando ID3 (sombreados) y BEI (polígonos sin sombreado)

Métodos Basados en Simulación Condicional

El objetivo de este tipo de método es de separar mineral de estéril según un criterio de optimización diferente y más flexible. Esto se hace considerando que, además de existir típicamente más de un destino de mineral, también puede incluir la necesidad de mezclar materiales con respuestas metalúrgicas diferentes.

Los algoritmos de kriging, que minimizan la varianza de estimación, no son necesariamente los más adecuados. En toda mina en operación, el criterio básico de optimización debe ser maximización del valor económico recuperado. En ciertas circunstancias y regiones del mundo, se aplica una combinación de beneficio económico y maximización del aprovechamiento del recurso, dos conceptos de optimización no necesariamente excluyentes. Pero en ningún momento se considera el criterio de minimización de la varianza de estimación, conocida también como un método de mínimos cuadrados.

Las Funciones de Pérdida se pueden utilizar para optimizar a través de funciones específicas de costos asignadas a cada tipo de error que se pueda cometer, ver por ejemplo Journel (1988), Isaaks (1990), y Goovaerts (1997). El modelo de simulación condicional se utiliza para obtener la incertidumbre local, que en conjunto con los costos asignados a cada posible error, permite optimizar numéricamente en base a beneficio económico.

Método de Maximización de Ganancias

El método Maximización de Ganancias para control de leyes es un procedimiento en dos etapas, primero descrito por Isaaks (1990). Aguilar y Rossi (1996) describen una de las primeras aplicaciones industriales del método.

Inicialmente, una serie de simulaciones condicionales se obtienen a partir de la información de control de producción, por ejemplo pozos de tronadura. Este modelo de simulación condicional provee un modelo de incertidumbre de las estimaciones de leyes. Posteriormente, se aplica el proceso de optimización económica para definir la separación entre mineral y estéril. Se utilizan las Funciones de Pérdida para cuantificar las consecuencias económicas de cada decisión posible.

La clave de este método está en reproducir correctamente la variabilidad de los pozos de tronadura, y que éstos, en conjunto, sean una representación de la variabilidad espacial geológica de las leyes a ser estimadas. Sin una representación adecuada de la varianza de las distribuciones de leyes, es imposible cuantificar y por lo tanto optimizar para maximizar los beneficios económicos. Todos los métodos que utilizan muestras ponderadas para estimar (inverso de la distancia, krigeage) no reproducen la variabilidad de la información original, que se supone representativa de la variabilidad geológica.

El modelo de incertidumbre, que es en realidad la curva de frecuencias acumuladas de los valores posibles para cada nodo, se puede escribir como:

$$F(z; \underline{x} | (n)) = \text{Prob}\{Z(x) \leq z | (n), \alpha = 1, \dots, n\} \quad (3)$$

Donde $F(z; \underline{x} | (n))$ es el modelo de incertidumbre para nodo \underline{x} de la grilla simulada y se obtiene utilizando los $(n)_\alpha = 1, \dots, n$ pozos de tronadura condicionantes. Este modelo provee la probabilidad de cada nodo de estar por encima o debajo de cualquier ley z de interés.

En control de leyes, la selección de mineral/estéril se hace sobre valores estimados de leyes, $z^*(x)$, y siempre intentando minimizar los errores de clasificación de material. Dado que el valor verdadero de cada nodo no es conocido, los errores de estimación siempre están presentes. La

Función de Pérdida $L(e)$ (Journel, 1988) asigna un valor económico (por ejemplo en dólares por tonelada,) a cada posible error, midiendo su impacto y por ende la pérdida asociada. Al aplicar una Función de Pérdida a una serie de valores equiprobables simulados (Ecuación 3), se puede encontrar la pérdida condicional esperada con:

$$E\{L(z^* - Z) | (n)\} = \int_{-\infty}^{+\infty} L(z^* - z) \bullet dF(z; x | (n)) \quad (4)$$

La pérdida mínima se encuentra simplemente calculando las pérdidas esperadas para cada valor posible de leyes, y dejando aquél que minimiza la pérdida total. Como se describe en Isaaks (1990), la pérdida esperada condicional es una función en escalón, cuyo valor depende de los costos de operación, de los costos relativos de la mala clasificación, y de los costos de oportunidad que pudieran existir. Esto significa que el proceso de maximización de las ganancias (a través de una minimización de las pérdidas) depende solamente de la *clasificación* en la que cae el valor estimado $z^*(x)$, no en el valor estimado mismo. Por ejemplo, la pérdida incurrida cuando un bloque de mineral de pila de lixiviación se envía a planta de CIL, es función de las diferencias en costos de procesamiento; también, por supuesto, dependerá del valor *real* de la ley, pero no el valor *estimado* de esa misma ley.

ASPECTOS OPERACIONALES DEL CONTROL DE LEYES

Hay muchos aspectos operacionales que deben ser considerados para que el control de ley sea efectivo. De poco sirve la implementación de métodos posiblemente sofisticados si no existe una supervisión y control adecuado a la hora de ejecutar los procesos. Algunos de estos aspectos que se deben mencionar son:

- La relación entre las actividades de control de ley y la planificación a corto plazo; planificar lo que se extrae y extraer lo planificado, o sea, el cumplimiento del Plan Mina
- Las dificultades prácticas de obtener muestras representativas; esto es cierto en el caso de Cielo Abierto, pero aún más en el caso de minas subterráneas
- Restricciones de tiempo; operaciones que mueven mucho material, sin importar tanto la calidad; esto es un error común, donde las toneladas movidas es prácticamente la única medida de rendimiento de la operación
- Consideraciones de marcado en terreno de las zonas de estéril y mineral, y del movimiento del material después de la tronadura. Dilución no planificada
- El control del equipo de carguío; no todas las operaciones tienen sistemas GPS incorporados; entrenamiento de los operadores para reconocer zonas de difícil carguío, y cuando necesitan el apoyo del geólogo en terreno
- El control del destino del material; ¡no todos los camiones van adonde se suponen tienen que ir!
- La contabilidad del movimiento de materiales, avances topográficos, etc.
- Densidad y humedad; como afecta a las reconciliaciones en general, y las comparaciones mina-planta.

Cada uno de los aspectos mencionados merece mucha mayor atención que la dedicada en este trabajo. Se mencionan acá para recordar al lector que un proceso exitoso y óptimo de control de leyes va mucho más allá que la metodología aplicada a la hora de definir los paneles de selección, y no deben ser desarrollados e implementados en aislamiento de otros aspectos operacionales.

CONCLUSIONES

Las prácticas de modelamiento después de que una mina entra en operaciones son muy diversas, dependiendo del tipo de mineralización, cultura de la compañía minera, problemas de predicción y planificación, y relación entre los precios de metales y las leyes extraídas de la mina. En tiempos de *vacas gordas*, pocas operaciones tienen problemas. Sin embargo, es en esas circunstancias cuando el costo de oportunidad es más alto.

El propósito de los Modelos de Mediano y Corto Plazo es de actualizar la información del Modelo de Largo Plazo para incluir la nueva información que la operación va obteniendo. Desde luego, si el Modelo de Corto Plazo es en realidad un modelo de selección mineral/estéril, entonces el objetivo es diferente.

Existen una serie de alternativas metodológicas, de tecnología probada, que en general las Empresas Mineras no están ocupando o tomando en cuenta para sus operaciones. Esto se debe a una combinación de factores: a) el no entender la relación costo-beneficio que estas tecnologías ofrecen, y b) el convencimiento (o tal vez auto-engaño) de que las cosas *no se están haciendo tan mal*. A veces se prefiere la posición de no-innovar, a menos que haya uno o varios incidentes que demuestren que existe la necesidad de mejorar.

La única manera de evaluar las oportunidades de mejoras es considerar un estudio preliminar que cuantifique si existe tal mejora con relación a las prácticas actuales, y que representa en términos de beneficios económicos. Uno de los costos más grandes y al mismo tiempo más difíciles de poner en evidencia son los costos de oportunidad, porque una vez que se cometió el error, no hay marcha atrás, y no hay una evaluación de lo que se perdió o se dejó de ganar.

Dado que los procesos de modelamiento son mayormente de escritorio, el único requisito para implementarlos, además de la voluntad de las Gerencias involucradas, es el recurso humano, adecuadamente capacitado. También, la mejora va a ser más importante si existe una buena comunicación entre Geología de Mina, Planificación de Corto Plazo, y Metalurgia.

Una buena práctica de modelamiento a Mediano Plazo involucra aplicar una metodología consistente con las prácticas de modelamiento a Largo Plazo, bien definida, y semi-automatizada dentro de lo posible pero siempre correctamente validado. Después de un estudio inicial para determinar los parámetros y las características de estos modelos, se pueden definir con detalle los procedimientos de trabajo, por ejemplo mes a mes. También se deben incluir los procedimientos de comparación con los modelos anteriores, incluyendo el de Largo Plazo, y reconciliaciones con lo producido en meses anteriores.

En el caso de los métodos de selección mineral/estéril, tiene más sentido definir los paneles de selección en base a consideraciones económicas que utilizando directamente las leyes. Las diferencias entre costos y recuperaciones metalúrgicas para los distintos rangos de leyes pueden hacer que el valor esperado de ley no sea el mejor indicador de beneficio económico.

REFERENCIAS

- Aguilar, C. A. & Rossi, M. E.**, (1996). *Método para Maximizar Ganancias en San Cristóbal*, Minería Chilena, Santiago, Chile, Ed. Antártica, No. 175, pp.63-69, January 1996. [1]
- Douglas, I. H, Rossi, M. E. & Parker, H. M.** (1994). *Introducing Economics in Grade Control: the Breakeven Indicator Method*. Preprint No 94-223, Albuquerque, New Mexico, February 14-17. [2]
- Goovaerts, P.** (1997). *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*. Oxford University Press, 483 p. [3]
- Isaaks, E. H.** (1990). *The Application of Monte Carlo methods to the Analysis of Spatially Correlated Data*. PhD. Thesis, Stanford University. [4]
- Journel, A. G.** (1988). *Fundamentals of Geostatistics in Five Lessons*. Stanford Center for Reservoir Forecasting, Stanford, California. [5]
- Srivastava, R. M.** (1987). *Minimum Variance or Maximum Profitability*. CIMM, Vol. 80, no. 901, pp. 63-68. [6]