

JULIO 2013

REVISTA GEM



Gestión y Economía Minera Ltda.

# PLANIFICACIÓN MINERA EN TIEMPOS INCIERTOS

Carlos Deck, Juan Ignacio Guzmán - GEM | Gestión y Economía Minera Ltda.  
Guido Juárez - BOAMine

**La forma actual de generar planes mineros es fundamentalmente estática, por lo que se debe replanificar cada vez que se producen cambios en las expectativas futuras del negocio. En el presente artículo se propone una forma alternativa de generar planes mineros que TOMAN EN CUENTA LA INCERTIDUMBRE para maximizar el valor de la operación en el mundo incierto de hoy. Además de obtener planes más robustos a la incertidumbre, la flexibilidad incorporada en el plan minero permite mejorar el VAN del negocio de forma significativa.**

## LA SITUACIÓN ACTUAL

La economía mundial se ha vuelto cada vez más turbulenta desde la crisis financiera del año 2008. Por esto, Ernst & Young (2012) ha reconocido al escalamiento de costos (cuarto), la materialización de CAPEX (quinto) y la volatilidad del tipo de cambio (séptimo) como algunos de los riesgos más significativos para la industria minera a nivel mundial. Para enfrentarlos, Ernst & Young recomienda utilizar técnicas avanzadas para modelar flujos de caja descontados, tales como el uso de Opciones Reales, para así “reconocer y extraer valor a partir de la incertidumbre”. Por otro lado, varios actores y analistas de la industria minera reconocen que el estándar actual para evaluar proyectos mineros es limitado, dado que se usa el cálculo de flujos de caja descontados (VAN) de forma estática. Esta técnica requiere que las compañías mineras establezcan proyecciones de largo plazo con respecto a las variables económicas y técnicas relevantes, las cuales son imposibles de predecir en la práctica.

Reconociendo estas limitaciones, esta Perspectiva discute una metodología que permite tomar en cuenta las incertidumbres relevantes que enfrenta la operación al momento de construir un plan minero. Posteriormente se muestra la implementación de esta metodología aplicada a la minería metálica a rajo abierto, la cual sentó las bases del software comercial DeepMine.

*Robustez implica encontrar un plan minero que maximiza el VAN esperado ante muchos futuros posibles. En cambio, la flexibilidad busca responder a la materialización de las incertidumbres de forma tal que se puedan aprovechar al máximo los buenos escenarios.*

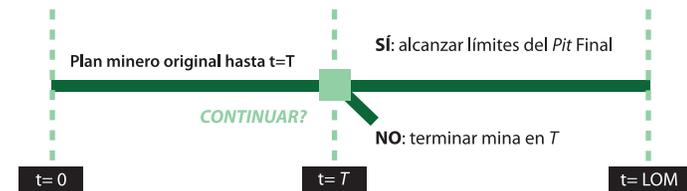
## ¿CÓMO GENERAR PLANES FLEXIBLES?

Un plan minero posee múltiples formas de responder a la realización de incertidumbres relevantes. Por ende, la forma de modelar la flexibilidad queda supeditada necesariamente a los planes de acción que el equipo de planificación tiene en consideración.

Un plan de acción que puede introducirse fácilmente utilizando cualquier software comercial disponible en el mercado es cerrar la operación. Esto cobra sentido para evitar escenarios negativos donde la mina puede incurrir en pérdidas. En este caso, tal como muestra la Figura 1, el plan de acción alternativo a continuar con el plan implicaría

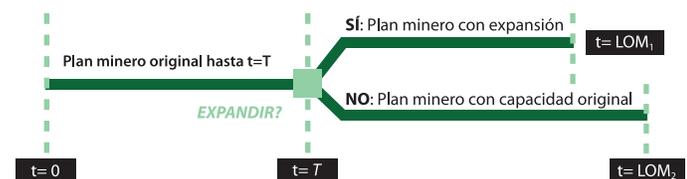
cerrar anticipadamente y no considerar los flujos de caja a partir del año  $T$  de la decisión (e incluir los eventuales costos de cierre asociados a esta decisión).

**FIGURA 1: OPCIÓN DE TERMINAR ANTICIPADAMENTE EL PLAN MINERO EN T**



Sin embargo, existen muchas otras opciones relevantes, como por ejemplo una expansión de planta, que introducen flexibilidad al plan **alterando la secuencia minera**. En estos casos, un plan minero diferente debe ser generado para cada alternativa que puede ser tomada después del periodo de decisión en  $T$ . Sin embargo, para que esta decisión efectivamente sea tomada en  $T$ , se requiere que todos los planes mineros generados **tengan una secuencia minera común hasta ese periodo**. Esta situación se muestra en la Figura 2.

**FIGURA 2: OPCIÓN PARA EXPANDER LA CAPACIDAD DE MINA EN T**

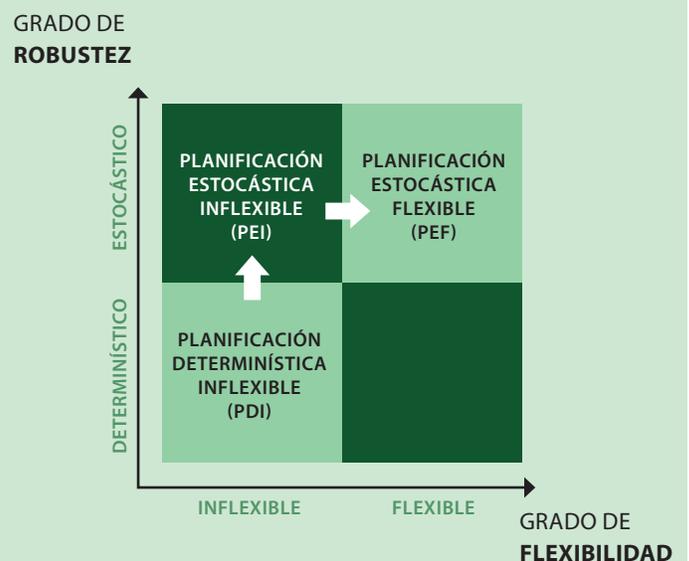


## ¿CÓMO INCORPORAR LA INCERTIDUMBRE AL MOMENTO DE PLANIFICAR?

GEM identifica dos maneras de tomar en cuenta la incertidumbre en las variables relevantes. En primer lugar, se busca que el plan minero a construir sea **robusto** a las incertidumbres incluidas. Esto implica que, al momento de evaluar el plan para muchos futuros posibles, su VAN esperado sea superior al de otros planes mineros. Adicionalmente, el plan minero puede poseer **flexibilidad** para responder a las incertidumbres incluidas. Esto implica que el plan minero cambiará dependiendo de lo que depara el futuro, de forma tal que se puedan aprovechar al máximo los buenos escenarios (o minimizar los daños producto de escenarios negativos).

A partir de estas dimensiones, es posible categorizar las herramientas de planificación según la Figura 3. Este artículo busca mostrar cómo pasar del estado actual, donde no se toma en cuenta la incertidumbre en absoluto (denominado Planificación Determinística Inflexible), a un estado donde se generen planes robustos a las incertidumbres relevantes y que posean cierta capacidad de respuesta ante ellas (denominado Planificación Estocástica Flexible).

**FIGURA 3: CLASIFICACIÓN DEL PROCESO DE PLANIFICACIÓN MINERA SEGÚN EL GRADO DE ROBUSTEZ Y FLEXIBILIDAD**

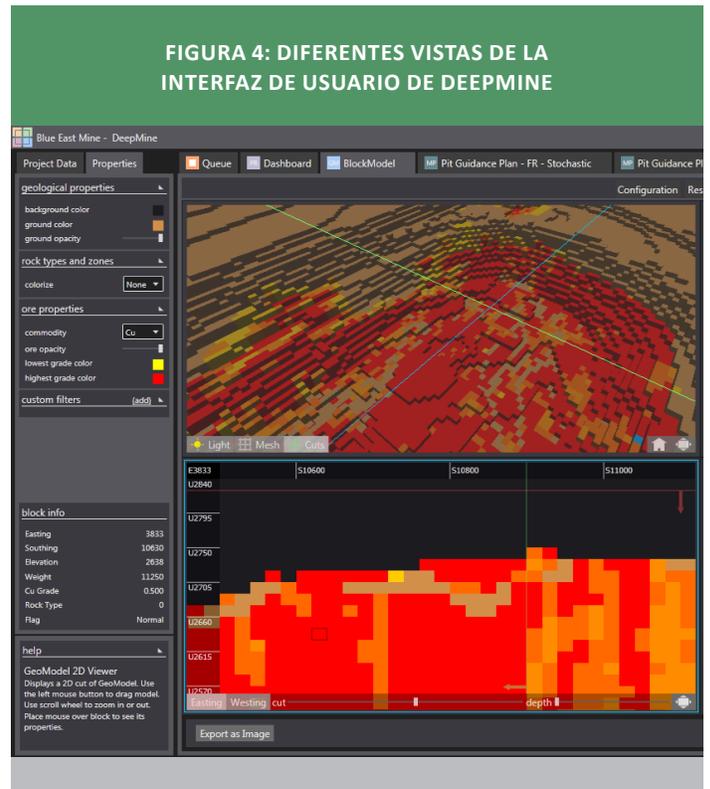


Este tipo de flexibilidad no puede ser incorporado a los software existentes, debido a que estos utilizan el pronóstico completo de las variables económicas y técnicas relevantes para determinar el plan minero óptimo para la vida de la mina (LOM, por su sigla en inglés). Por ende, introducir cambios en cualquiera de estas variables después del periodo  $T$  generalmente (por no decir siempre) lleva a alterar la secuencia minera para los periodos previos a  $T$ . En la práctica, los planificadores mineros consideran indirectamente las incertidumbres relevantes modificando los planes una vez que estas se materializan. Sin embargo, este ejercicio lo realizan siempre de forma inflexible, al generar planes mineros que son óptimos a las nuevas expectativas futuras de las variables relevantes, pero sin reconocer que estas pueden cambiar nuevamente. Este círculo vicioso es parte de las complejidades de la planificación minera que deben ser superadas para así construir planes mineros flexibles.

## IMPLEMENTACIÓN MEDIANTE DEEPMINE

Considerando la imposibilidad de construir planes mineros flexibles con software comerciales existentes, GEM trabajó desde el año 2009 para establecer los fundamentos teóricos para implementar esta metodología. Reconociendo el valor potencial de esta, BOAMine (empresa de ingeniería de software) ha concretado la modelación computacional de GEM para desarrollar DeepMine, un software comercial que genera planes mineros para minas a rajo abierto de forma flexible y a nivel estratégico. La Figura 4 muestra diferentes vistas de la interfaz de usuario del programa.

Para construir planes mineros, DeepMine recibe como *inputs*: (1) el modelo de bloques del yacimiento, (2) los parámetros necesarios para generar el *pit* final, (3) parámetros operacionales, tales como la capacidad de mina y el número de plantas con sus respectivas capacidades y (4) parámetros económicos, tales como los costos unitarios de cada proceso y los precios de los *commodities* a producir. Con respecto a este último punto, DeepMine es capaz de incorporar la incertidumbre en uno o más precios de los



*commodities* minerales de la mina a través de procesos estocásticos, donde cada proceso recibe como *input*: (1) el precio de equilibrio de largo plazo, (2) la velocidad de reversión al precio de largo plazo, y (3) la volatilidad de corto plazo del precio.

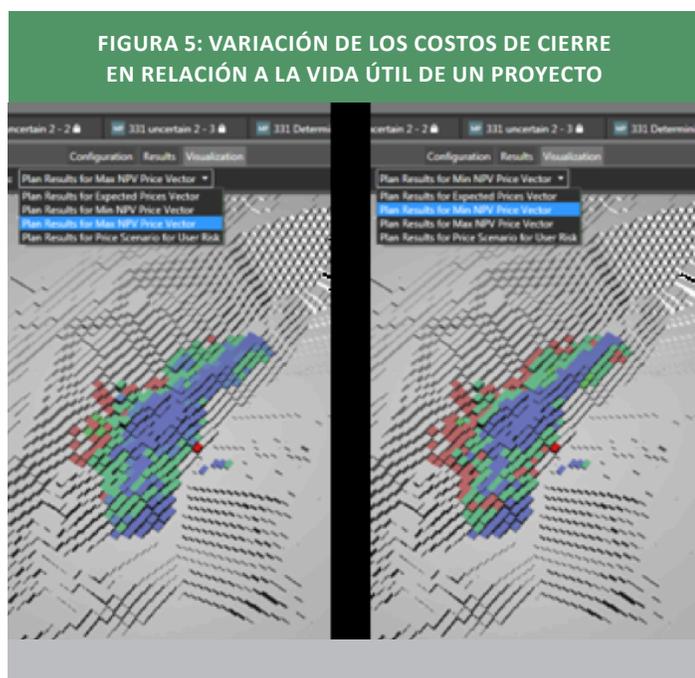
Tomando en cuenta la incertidumbre en precios, DeepMine puede calcular distintos tipos de planes:

- Determinístico, el cual asume un escenario único de precios, tal como cualquier software comercial.
- Mejor Plan Robusto, el cual calcula la secuencia minera que mejor responde ante la incertidumbre de precios definido por el usuario **sin flexibilidad**.
- Planes flexibles, que permiten al usuario introducir una opción en algún periodo  $T$  dentro del plan minero. Esto permite actualizar, a partir de este punto, las variables técnicas y económicas según los *inputs* ingresados por el usuario.

Para la generación de planes flexibles, el usuario debe ingresar parámetros adicionales relacionados al ejercicio de la opción: (1) un precio de gatillo, el cual es usado por el programa como la condición para determinar qué camino seguir, (2) un costo (asociado generalmente al CAPEX) requerido para ejercer la opción, y (3) un periodo de desfase entre el periodo de ejercicio y el periodo en que cambian efectivamente los parámetros técnicos.

Una vez que todos los *inputs* han sido cargados en el software, DeepMine calcula el secuenciamiento óptimo de la mina para el LOM. Esto implica asignar a cada bloque del modelo de bloques un periodo de extracción (en caso de ser extraído) y un destino de procesamiento. De esta forma, el plan minero resultante puede ser usado posteriormente por otros software de planificación para adaptarse a las restricciones operacionales de corto y mediano plazo.

Finalmente, es importante mencionar una fuente adicional de flexibilidad en DeepMine relacionada a los destinos de procesamiento de cada bloque para los planes mineros construidos con incertidumbre en precios. Esto se debe a que, aun cuando una secuencia minera de extracción debe ser comprometida para el LOM, las decisiones de procesamiento de cada bloque pueden ser tomadas según el precio del *commodity* observado en el periodo de extracción. De esta forma, DeepMine permite evaluar una secuencia minera a diferentes realizaciones del precio para ver cómo cambian los destinos de procesamiento de los bloques extraídos. Esto se muestra gráficamente en la Figura 5, donde los destinos de los bloques (marcados con diferentes colores) cambian entre la mejor y peor realización del precio (vista izquierda y derecha, respectivamente). En el peor escenario, más bloques son considerados como lastre (de color rojo), los cuales hubieran sido considerados como mineral en el mejor escenario de precios.



## LOS RESULTADOS

Para cuantificar el valor que agrega incluir flexibilidad a la planificación minera, se evaluó un proyecto de expansión ficticio para la mina Radomiro Tomic (perteneciente a Codelco) a través de planes flexibles generados por DeepMine. Es importante aclarar aquí que este proyecto fue conceptualizado únicamente para este estudio y no constituye un proyecto en actual revisión por parte de Codelco.

Radomiro Tomic (RT) es una mina a rajo abierto de cobre situada cerca de la ciudad de Calama en el norte de Chile. Esta mina empezó produciendo óxidos en 1997, pasando a producir también sulfuros el año 2008. Este depósito posee un modelo de 12.442.500 bloques, con un nivel de recursos que asegura producción para los próximos 50 años asumiendo la capacidad actual de la operación.

Dado el nivel de recursos existentes RT está estudiando actualmente expandir su línea de sulfuros, en un proyecto conocido como RT Fase II. Esta expansión fue evaluada usando DeepMine, donde se generó un plan minero que aumenta el VAN determinístico de la operación en aproximadamente 22% comparado con el software comercial utilizado habitualmente por RT para generar sus planes a nivel estratégico.

Para evaluar el potencial de expandir la línea de sulfuros de RT más allá de Fase II (asumiendo que esta se construye), se considera un proyecto ficticio que expande la capacidad de la planta concentradora en 200 ktpd el año 2020. Sin embargo, reconociendo que RT no está obligado a realizar este proyecto ante escenarios negativos en el precio del cobre, este proyecto se modeló en DeepMine como una opción de expansión con un precio de cobre de gatillo de 3 US\$/lb, un nivel de inversión de 3.500 MUS\$ y un desfase de dos años entre la decisión y la entrada de la capacidad adicional de la planta. Por ende, en este caso, la decisión de expansión debe ser tomada el año 2018.

Al evaluar los planes mineros de RT con y sin esta expansión adicional de forma determinística, el plan minero con expansión agrega 170 MUS\$ al VAN de RT. Esto muestra que acelerar la extracción de los sulfuros de RT puede ser económicamente rentable, aunque marginal una vez descontado los flujos al presente.

Sin embargo, al evaluar el proyecto con flexibilidad, DeepMine permitió encontrar un plan que incrementa el VAN de RT en 530 MUS\$. Este valor adicional se explica porque RT posee el derecho, pero no la obligación, de

*Las opciones que alteran una secuencia minera no puede ser modeladas por software existentes, debido a que estos utilizan el pronóstico completo de las variables económicas y técnicas relevantes para determinar el plan minero óptimo.*

expandir la capacidad de planta. Por ende, se hace uso de esta opción solo cuando el precio del cobre está por sobre el precio de gatillo, evitando la inversión de 3.500 MUS\$ en escenarios adversos del precio del cobre.

Considerando estos resultados, es posible calcular el valor de la opción de expansión usando la siguiente ecuación:

$$VAN^{Opción} = VAN^{Con flexibilidad} - \text{Max} \left\{ \begin{array}{l} VAN^{Determinístico} \\ \text{Con Expansión} \end{array} , \begin{array}{l} VAN^{Determinístico} \\ \text{Sin Expansión} \end{array} \right\}$$

El valor de la opción de expansión, entonces, es de 360 MUS\$, lo que corresponde a aproximadamente el 68% del valor del proyecto de 530 MUS\$.

Para finalizar, es importante reconocer que, aun cuando el valor de este proyecto pareciera ser bajo, una parte importante se explica porque los flujos de caja positivos atribuibles a este proyecto empiezan recién en el año 2020. Por lo tanto, a medida que la fecha de la toma de decisión (2018) se acerque, el valor de este proyecto pasará a ser cada vez mayor y en algún momento podría volverse suficientemente económico como para realizarlo.

## PRESENTE Y FUTURO

Este artículo busca sentar las bases para generar planes mineros flexibles. Esto requiere una herramienta que permita generar planes mineros que sean iguales hasta la toma de una decisión en el periodo T, diferenciándose posteriormente según si la opción del plan fue ejercida o no. Debido a estas complejidades, no es posible generar planes flexibles como los aquí descritos utilizando software comerciales existentes.

Reconociendo esta brecha tecnológica, BOAMine ha desarrollado DeepMine, el primer software comercial capaz de generar planes mineros flexibles a nivel estratégico. DeepMine ya ha sido probado en múltiples operaciones y proyectos, entre los que se cuentan la mina RT de Codelco. Los resultados obtenidos a la fecha son prometedores: (1) evaluar el proyecto con flexibilidad aumenta el VAN de forma significativa, y (2) los planes generados con DeepMine aumentan también el VAN determinístico en comparación al software de planificación estratégica debido a que su motor de cálculo no descansa en algoritmos estáticos como Lerchs-Grosmann, sino que en algoritmos de programación dinámica.

Pese al avance de contar ya con una herramienta capaz de manejar la incertidumbre asociada al precio de los *commodities* minerales para construir planes mineros robustos y flexibles, aún queda mucho por avanzar en la incorporación de otras fuentes de incertidumbres en la generación de planes mineros. Dentro de estas, se destaca la incertidumbre geológica, geotécnica y asociada a costos. Este uso de múltiples fuentes de incertidumbre puede generar la necesidad de diseñar opciones complejas con más de una fecha de ejercicio. Este tipo de opciones, conocidas como opciones compuestas, debieran incrementar aún más el valor de la flexibilidad presente en un plan minero de largo plazo.

En definitiva, se han dado los primeros pasos para realizar una planificación minera acorde con mercados reales y en particular para los tiempos más inciertos que hoy se viven, pero aún quedan muchas oportunidades de mejora que permitirán seguir añadiendo valor a la industria.



# AGRADECIMIENTOS

GEM y BOAMine agradecen a la División de RT y la GRM de Codelco por el apoyo técnico y financiamiento otorgado para desarrollar DeepMine. Este apoyo fue entregado dentro del programa de Proveedores de Clase Mundial (PPCM). También se agradece a CORFO y a Microsoft BizSpark el apoyo prestado durante la realización de DeepMine.



## CARLOS DECK

Ingeniero Civil Industrial, Magister en Ciencias de la Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica de Chile, y Profesor *Part Time* de la Universidad de los Andes (Chile).

## JUAN IGNACIO GUZMÁN

PhD. en Economía de Minería, Profesor del MBA Minero de la Universidad de Chile, y Profesor Asistente del Programa de Economía Minera de la Pontificia Universidad Católica de Chile.

## GUIDO JUÁREZ

Ingeniero Civil en Computación de la Pontificia Universidad Católica de Chile, y Profesor *Part Time* de la Universidad de los Andes (Chile).

## ACLARACIÓN

Este documento ha sido publicado por GEM|Gestión y Economía Minera Ltda. bajo el entendimiento de que su responsabilidad está limitada a proveer una opinión profesional e independiente. Aunque su preparación ha involucrado dedicación y cuidado razonables, GEM no garantiza la precisión del conjunto de datos, supuestos, predicciones ni de otras afirmaciones realizadas. Si el usuario utiliza este documento o su información para obtener recursos o tomar cualquier tipo de decisión que involucre otras compañías, GEM no acepta responsabilidad alguna frente a terceros, sin importar su proveniencia y sin limitaciones.

El presente reporte ha sido elaborado utilizando la Nueva Ortografía de la Lengua Española (RAE, 2010).

## CONTACTO

**WEB:** [www.gem-ing.cl](http://www.gem-ing.cl)

**TELÉFONO:** + 56 2 2225 30 21

**AGRADECEMOS ENVIAR SUS COMENTARIOS DE ESTE ARTÍCULO AL**

**MAIL:** [contacto@gem-ing.cl](mailto:contacto@gem-ing.cl)

© Gestión y Economía Minera Ltda. (GEM). 2013. Derechos Reservados