



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS

**VALORIZACIÓN DEL AUMENTO DE CONFIABILIDAD EN PLANES DE
PRODUCCION DE SISTEMAS MINEROS *SUBTERRANEOS***

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

MAXIMILIANO FRANCISCO ALARCÓN URETA

PROFESOR GUÍA:

NELSON MORALES VARELA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

MANUEL REYES JARA

MARCELO VARGAS VERGARA

SANTIAGO DE CHILE

2014

Resumen

Las herramientas tradicionales utilizadas en planificación minera se limitan al uso de parámetros económicos, geológicos y operativos fijos. Esto conduce a un plan minero determinista. Por una parte, el resultado obtenido puede ser muy bueno, incluso óptimo, para el conjunto de parámetros dados. Pero no se debe olvidar, que el óptimo significa que el resultado es específico para esta situación, por lo que si las condiciones cambian este puede dejar de ser el óptimo. De hecho, el plan puede tener una muy baja probabilidad de cumplimiento, en términos de producción, valor y/o secuencia.

Debido a lo mencionado previamente, una tendencia reciente en las áreas de investigación es la integración de la incertidumbre en el proceso de planificación, con el objetivo de lograr planes más robustos en términos de producción e incluso de valor.

Una fuente muy relevante de incertidumbre en minería es debido a la operación. La incertidumbre operativa puede ser considerada en varios aspectos, tales como la productividad de los equipos, huelgas, y cualquier evento que intervenga con el proceso de extracción.

En el caso de las operaciones que utilizan los métodos de panel o block caving, uno de estos eventos son las disponibilidades de los puntos de extracción. En efecto, la disponibilidad de los puntos de extracción está sujeta a diferentes situaciones, por ejemplo, la probabilidad de la colgadura de un punto, o de la aparición de material de tamaño superior al que puede ser manejado por los equipos de carguío. Estos eventos se pueden modelar como un impacto en la velocidad máxima de extracción permitida en cada uno de los puntos de extracción.

En este trabajo de título, se modelara la velocidad de extracción máxima para cada punto de un sector en una operación minera, y se consideraran diferentes coberturas que nos permitan hacer frente a esta incertidumbre. Más precisamente se estudia la relación entre el aumento en inversión tanto en mayor preparación minera, como en mayor inversión de equipos de preparación, para así poder aumentar el número de puntos de extracción que se puedan abrir por unidad de tiempo, y el impacto en el valor esperado del proyecto. Para poder lograr esto, se utiliza una herramienta que permite agendar rápidamente la preparación y extracción de los puntos de extracción de la mina, bajo diferentes escenarios de velocidades máximas de extracción.

Como resultado de esto la metodología nos permite encontrar el tamaño óptimo de la cobertura, la cuantificación en el impacto en el VAN y la variabilidad de esto, que puede ser visto como la opción real en el tamaño de la flota de equipos de preparación.

Agradecimientos

A mis padres, infinitas gracias por formarme de la forma que lo hicieron, por empujarme a lograr las metas, y obviamente y por sobre todo por el cariño y el amor que me han entregado durante todos estos años.

A mi hermana por ser mi fan, y por ser tú!

A mi profesor guía Nelson Morales, agradecer por la paciencia, su apoyo y la oportunidad de trabajar junto a él.

A los cabros, Ferrada, Muno, Palape, Nati, Polanco, Sobrino, Werner, por hacer los años de la universidad más placenteros, y por todos los grandes y memorables momentos.

A mis compañeros de Delphos, Bastián, Juanito, Gonzalo, Enrique, Pierre, Diego, por la ayuda y por amenizar las horas de trabajo en el lab.

A mis amigos de la U, Babi, Coni, Kimie, Maripa, Domingo, por amenizar tantas largas tardes.

A los compañeros y amigos del departamento de minas, Arturo, Pablo, Churro, Perrito, Tuko, Serena, Rancio, por ser un gran grupo.

Mis más sinceros agradecimientos a todos los que han formado parte de este trabajo, o de todo los procesos anteriores.

Tabla de contenido

1.	Introducción	1
1.1	Descripción del problema	4
1.2	Objetivos	7
1.2.1	Objetivo general	7
1.2.2	Objetivos específicos	7
1.2.3	Metodología	7
1.2.4	Alcances.....	8
2	Antecedentes bibliográficos	9
2.1	Planificación de la producción.....	9
2.2	Preparaciones mineras.....	11
2.2.1	Variables consideradas en la programación de la preparación minera	12
2.3	Interferencias operacionales en sistemas mineros.....	16
2.3.1	Interferencias operacionales en block/panel caving	17
2.4	Confiabilidad	20
2.4.1	Sistemas y componentes	20
2.5	Riesgo e incertidumbre	21
2.5.1	Incertidumbre en minería	21
2.6	Modelo de confiabilidad	23
2.6.1	Curvas U	23
2.6.2	Curva de producción característica (PCC)	23
2.7	Opciones reales	25
2.7.1	Opción Call	26
2.7.2	Opción Put.....	26
2.7.3	Opciones europeas y americanas	26
2.8	Variables en la valoración de opciones	26
2.9	Método de valoración de opciones reales	27
2.9.1	Modelo Binomial	28
3	Metodología experimental	30
3.1	Herramienta de resolución e inputs para su ejecución	30
3.1.1	Variables del modelo de UDESS	31

3.1.2	Función objetivo de UDESS	31
3.1.3	Restricciones.....	32
3.2	Modelamiento caso de estudio	32
3.2.1	Nivel de ventilación.....	33
3.2.2	Nivel de producción.....	33
3.2.3	Nivel de hundimiento	33
3.2.4	Modelo de bloques	34
3.2.5	Geometría de frente de socavación	34
3.2.6	Variante del método de extracción	34
3.2.7	Chancado interior mina y paneles	36
3.2.8	Escenarios de velocidades de extracción	36
3.3	Validación del modelo	40
3.4	Ejecución de ejercicios	41
3.4.1	Comparación de ejercicios	41
3.4.2	Valorización de ejercicios.....	41
3.4.3	Calculo de confiabilidad	41
3.5	Métricas de evaluación de coberturas.....	41
4	Caso de estudio.....	43
4.1	Parámetros de Entrada	46
4.2	Flotas de equipos	46
4.3	Disponibilidades.....	48
4.4	Rendimientos	48
4.4.1	Rendimientos preparaciones mineras.....	48
4.5	Costos	49
4.6	Parámetros de valorización de columnas	49
4.7	Velocidades de extracción	50
4.8	Planos de diseño sector.....	44
5	Resultados caso de estudio	51
5.1	Ejercicio de incorporación de puntos de extracción base	52
5.2	Ejercicio de incorporación con siete puntos de extracción menos que caso base por periodo	55
5.3	Caso de incorporación con cinco puntos de extracción menos que caso base por periodo	57
5.4	Ejercicio incorporación con tres puntos de extracción menos que caso base por periodo	60

5.5	Ejercicio de incorporación con tres puntos de extracción más que caso base por periodo	62
5.6	Ejercicio de incorporación con cinco puntos de extracción más que caso base por periodo	65
6	Análisis de Resultados	68
6.1	Análisis de secuencia de extracción en los planes de producción	68
6.2	Análisis de distribución de VAN obtenidos y métricas de inversión ...	70
6.3	Valorización mediante opciones reales	75
7	Conclusiones y Trabajos Futuros	78
7.1	Conclusiones	78
7.2	Trabajos futuros	80
8	Bibliografía	81
1.	Rubio E. (2006). "Block cave mine infrastructure reliability applied to production planning". Thesis (Ph. D.). Vancouver, Canada. The University of British Columbia. The Faculty of Graduate Studies (Mining Engineering). ...	81
2.	ATWOOD, C. Parametric estimation of time-dependant failure rates for probabilistic risk assessment. En: Reliability Engineering and system safety, 1992, pp.181-194.	81
3.	BOLAND, P. y PROSHCAN, F. The reliability of K out of N systems – The annals of probability. Vol. 11, 1983, pp. 760-764.	81
4.	BROWN, E T. Block Caving Geomechanics. JKMRC Monograph Series on Mining and Mineral Processing. Julius Kruttschnitt Mineral Centre, University of Queensland: Brisbane. Vol 3, 2003.	81
5.	KAZAKIDIS, V. y SCOBLE, M. Accounting for ground-related Problems in planning mine production systems. Mineral Resources Engineering, Imperial College Press.Londres, Inglaterra, Vol. 11, N 1, 2002.....	81
6.	KUO, W. y ZUO, M. Optimal reliability modeling: principles and applications. Canadá, John Wiley, 2002.....	81
7.	LAKNER, A., y ANDERSON, R. Reliability engineering for nuclear and other high technology systems. Elsevier Applied Science, Londres, 1985. ..	81
8.	PASCUAL, R. El arte de mantener. Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2005.	81
9.	RAUSAND, M. y HOYLAND, A. System reliability theory, models, statistical methods and applications. Segunda edición. Canadá, Wiley-Interscience, 2004.	82
10.	RIGDON, S. y BASU, A. Stastical methods for the reliability of repairable systems.Primera edición. Canadá, Wiley-Interscience, 2000.	82

11. RUBIO, E., DUNBAR, S. y SCOBLE, M. Scheduling in block caving operations using operations research methods. En: Annual General Meeting, Can. Inst. Min & Metall. Montreal, Quebec, Canada, 2001.	82
12. SUMMERS, J., 2000. Analysis and management of mining risk. En: MassMin 2000, Brisbane. The Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne.	82
13. Roussos G. Dimitrakopoulos, Sabry A. Abdel Sabour. (2007). Evaluating mine plans under uncertainty: Can the real options make a difference?	82
14. S. A. Abdel Sabour*, R. G. Dimitrakopoulos and M. Kumral. Mine design selection under uncertainty.	82
15. Alexandra M. Newman. Modern Strategic Mine Planning.	82
16. Michael Samis. Applying advanced financial methods (real options) to mine valuation problems.	82
17. LI Shu-xing, KNIGHTS Peters. (2009)Integration of real real option into short-term planning and production scheduling	82
18. Charles A. Brannon, Gordon K. carlson, Timothy P. Casten(2011), Bolck Caving.....	82
19. T.G. Heslop(2010),Understanding the flow of caved ore and its influence on ore recoveries and dilution in a block cave.	82
20. Sebastián H. Troncoso(2009), Confiabilidad de programas de producción en sistemas mineros subterráneos complejos, tesis de magister.	83
21. Winston Rocher (2012), Secuenciamiento optimo de preparación minera subterránea, tesis de magister.....	83
22. Laubscher, D., 2000. Block Cave Manual. Julius kruttschnitt Mineral Research Centre, The University of Queensland, Australia.....	83

Índice de figuras

Figura 1. Incertidumbre en la planificación de producción.	2
Figura 2. Productividad mina en función del número de eventos de colgadura y sobre tamaño observados (Rubio, 2006).....	3
Figura 3: Beneficio de opciones reales en función del valor presente neto(Dimitrakopoulos R., Abdel S., 2007).....	6
Figura 4. Diagrama de preparaciones mineras caso de estudio(GPTA, gerencia de planta)	12
Figura 5.Panel Caving convencional	13
Figura 6.Panel caving con hundimiento previo.	14
Figura 7. Panel caving con hundimiento avanzado	15

Figura 8. Eventos de interferencia más frecuentes para diferentes componentes de la infraestructura minera subterránea y técnica de reparación (Le Faux, 1998).	17
Figura 9. Diagrama esquemático del proceso de hundimiento.....	18
Figura 10. Figura esquemática sobre interrupciones colgadas.....	19
Figura 11: Fuentes de incertidumbre en proyectos mineros.....	22
Figura 12. Relación entre productividad y eventos de interferencia en un punto de extracción.....	24
Figura 13. Valor de activo subyacente para un periodo según el modelo binomial (Lenos Trigeorgis, 1995)	28
Figura 14. Precedencias entre bloques de columnas de extracción contiguas(izquierda) y consideración de columnas contiguas(derecha).	34
Figura 16. Explicación variación método de explotación.....	35
Figura 16. Detalle de estados de los puntos en base de datos.....	38
Figura 17. Asignación de sectores a los diferentes chancadores	40
Figura 18. Nivel de producción para el caso de estudio	44
Figura 19. Plano de diseño nivel de hundimiento caso de estudio.....	45
Figura 20. Plan de producción caso base	51
Figura 21. Comparación de planes de producción base (grupo de planificación)/UDESS	52
Figura 22 Grafico de inversiones para caso de siete puntos menos por periodo.....	53
Figura 23. Planes de producción para todos los escenarios.....	54
Figura 24 Grafico de inversiones para caso de siete puntos menos por periodo.....	55
Figura 25. Planes de producción para todos los escenarios.....	56
Figura 26 Grafico de inversiones para caso de cinco puntos menos por periodo.....	58
Figura 27. Planes de producción para todos los escenarios.....	59
Figura 28 Grafico de inversiones para caso de tres puntos menos por periodo	60
Figura 29. Planes de producción para todos los escenarios.....	61
Figura 30 Grafico de inversiones para caso de tres puntos menos por periodo	63
Figura 31. Planes de producción para todos los escenarios.....	64
Figura 32 Grafico de inversiones para caso de tres puntos menos por periodo	66
Figura 33. Planes de producción para todos los escenarios.....	67
Figura 34.Grafico velocidad de extracción máxima V/S confiabilidad.....	68
Figura 34. Ajuste de distribución normal a los resultados de VAN para cada caso.	70
Figura 35. Estadísticas básicas	71
Figura 36. Resumen anualizado de inversiones promedio a realizar para cada caso	72
Figura 37. Grafico VAN esperado y Confiabilidad.....	74

Figura 38. Gráfico de comparación de VAN caso determinístico y coberturas valorizadas por OR 77

Índice de ecuaciones

Ecuación 1. Calculo de número de eventos esperados	23
Ecuación 2. Conversión de tiempos en estado a velocidades reales de extracción.	38
Ecuación 3. Distribución weibull.	39

Índice de histogramas

Histograma 1. Velocidades de extracción reales.....	38
Histograma 2. Velocidades reales de extracción y ajuste de distribución. ...	39
Histograma 3. Valores presentes netos caso de incorporación de área.	53
Histograma 4. Valores presentes netos caso de incorporar 7 puntos menos por periodo	55
Histograma 5 valores presentes caso -5	57
Histograma 6 valores presentes caso -5	60
Histograma 7 valores presentes caso +3	62
Histograma 8 valores presentes caso 5	65

Índice de tablas

Tabla 1. Ejemplo de estado de información en base de datos.	37
Tabla 2. Parámetros de distribución que ajusta a las velocidades reales.	39
Tabla 3. Distancias permisibles para el sector	46
Tabla 4. Disponibilidad promedio de los equipos en el sector	48

Tabla 5. Rendimientos de avance en galerías.	48
Tabla 6. Costos de construcción de las diferentes actividades de preparación.	49
Tabla 7. Parámetros técnicos económicos de valorización.	49
Tabla 8. Velocidades de extracción máximas recomendadas por geo mecánica	50
Tabla 9. VAN plan base (caso determinístico)	52
Tabla 10. Principales estadísticas caso incorporación de puntos de extracción base.....	54
Tabla 11. Principales estadísticas caso incorporación con siete puntos de extracción menos.....	56
Tabla 12. Principales estadísticas caso incorporación con siete puntos de extracción menos.....	58
Tabla 13. Principales estadísticas caso incorporación con siete puntos de extracción menos.....	61
Tabla 14. Principales estadísticas caso incorporación con siete puntos de extracción menos.....	63
Tabla 15. Principales estadísticas caso incorporación con siete puntos de extracción menos.....	66
Tabla 16. Inversiones promedio actualizadas	73
Tabla 17. Confiabilidades para cada caso.....	73
Tabla 18. Valorización mediante opción real de coberturas.....	75
Tabla 19. Valorización mediante opciones reales, y parámetros importantes	75
Tabla 20. Resumen de métricas de inversión.....	76
Tabla 21. Incorporación de puntos de extracción por mes (considerando mes uno agosto 2005).....	85

1. Introducción

La planificación es el proceso de Ingeniería de Minas que transforma el recurso mineral en el mejor negocio productivo (Rubio 2006), para poder lograr esto se deben dimensionar una serie de recursos de la mejor manera, para así poder obtener un mejor resultado, por ejemplo, en una mina explotada mediante block o panel caving, se debe determinar la cantidad de puntos de extracción que deben ser abiertos para poder lograr el mejor negocio, y para esto se debe dimensionar las flotas de equipos idóneas para lograrlo.

Una de las principales tareas de la planificación es generar el programa de producción, que define los tonelajes y las leyes respectivas a ser extraídas durante la vida de la mina, lo que se traduce finalmente en una cuantificación del potencial económico de un yacimiento dado en el tiempo. Es por esto, que en el proceso de planificación se está apostando no tan solo por un determinado comportamiento productivo a nivel mina, sino además se compromete el valor económico del proyecto, tanto en sus labores de extracción de mineral como de metalurgia extractiva.

Dado lo anterior, el logro de las metas productivas propuestas en un programa de producción es fundamental para lograr los objetivos económicos y operacionales definidos en la concepción del negocio, por lo que esto conduce a buscar la forma de controlar las promesas productivas realizadas en el plan de producción y los resultados operacionales obtenidos.

La comparación entre el resultado operacional y las promesas productivas adquiridas en el programa de producción puede realizarse de variadas formas, por ejemplo:

- Cumplimiento del tonelaje de mineral producido.
- Cumplimiento de los volúmenes extraídos comprometidos.
- Cumplimiento de los finos de metal producidos.
- Cumplimiento de los costos de producción.
- Otros.

Al ser realizadas las comparaciones previamente descritas, se suele encontrar que los resultados operacionales en muy pocas ocasiones coinciden con lo comprometido en el plan de producción por lo que es lógico preguntarse ¿cuáles son las razones de estas diferencias?

En respuesta a la pregunta planteada anteriormente se debe tener en cuenta que la ejecución de un determinado programa de producción está condicionada por la incertidumbre proveniente de diversas fuentes como se puede observar en la Figura 1, las cuales son detalladas a:

- Incertidumbre asociada a la disponibilidad de infraestructura productiva (túneles, piques de traspaso, puntos de extracción, etc.).
- Incertidumbre asociada a la disponibilidad de recursos productivos (equipos de producción, de apoyo, insumos en general, etc.).
- Incertidumbre asociada a la disponibilidad de recursos minerales (leyes, litologías, mineralización, calidad metalúrgica, etc.).
- Incertidumbre en el comportamiento de los mercados (precios de metales, insumos en general, mando de obra, etc.).
- Incertidumbre asociada al entorno legal y medioambiental (royalties, impuestos, límites de concentración de contaminantes, etc.)

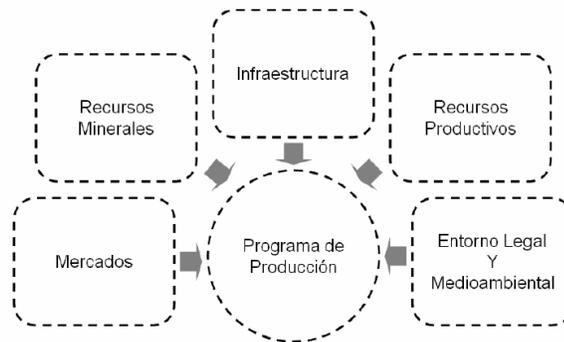


Figura 1. Incertidumbre en la planificación de producción.

Debido a la naturaleza determinista de un programa productivo, cuando las condiciones operacionales varían de las consideradas en la generación del plan, por cualquiera de las fuentes de incertidumbre mencionadas anteriormente, la consecución de las metas productivas es incierta.

Particularmente, en lo referente a la disponibilidad de infraestructura en la explotación minera subterránea mediante Block o Panel Caving se observan constantemente eventos de interrupción que detienen el flujo de mineral por algunas o todas las componentes de la infraestructura productiva del sistema minero, que afectan en el libre flujo de mineral a través de éstas y que normalmente no se consideran explícitamente en la construcción de un programa de producción mediante una metodología, más bien se toma la experiencia del planificador para que realice una cobertura frente a estos posibles eventos.

Sin importar la naturaleza de estas interrupciones, su ocurrencia se comporta de forma aleatoria, e impacta en mayor o menor grado en la productividad del sistema minero. Por ejemplo, en la Figura 2 se observa que a medida que el número de eventos de colgadura y sobre tamaño a nivel de puntos de extracción aumenta, la productividad del sistema decrece:

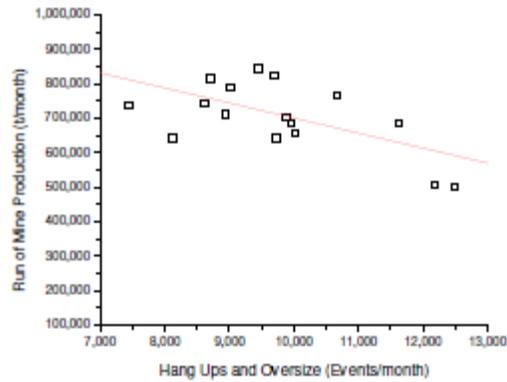


Figura 2. Productividad mina en función del número de eventos de colgadura y sobre tamaño observados (Rubio, 2006).

Estos eventos de interferencia son intrínsecos al comportamiento del sistema minero y debido a que afectan su productividad, deben ser considerados explícitamente en el proceso de planificación. Una manera de tomarlos en cuenta es tomando coberturas operacionales en caso de que estos eventos ocurran. Tales como, tener una mayor cantidad de área disponible en caso de alguna colgadura, aparición de sobretamaño en los puntos de extracción, etc.

Surge en forma natural el cuestionamiento respecto del dimensionamiento apropiado de estas coberturas, de forma de que los costos asociados a los mismos estén apropiadamente alineados con los retornos producidos o el aumento de la confiabilidad. En este trabajo se plantea el uso de una metodología de evaluación para poder responder esta interrogante, la cual se basa en la valorización del aumento de la confiabilidad del sistema minero, debido a que el cómo realizar esta valorización nos e conoce, se recurre al método de opciones reales, además de metodologías más tradicionales para poder cuantificar este aumento, y así poder encontrar la cobertura optima frente a estos eventos.

1.1 Descripción del problema

En la planificación minera de hoy en día se busca incorporar la mayoría de las variables y metodologías, en busca de un resultado más robusto, ya sea en valor esperado o en cumplimiento de producción, además de cumplir con las estrategias de la compañía (T P Horsley, 2002).

Durante los últimos años se han tenido avances en esta área, pero aún no se logra la total integración de las variables y la incertidumbre intrínseca de cada una de estas, lo que genera las desviaciones entre lo planificado y los resultados operacionales. Las principales diferencias entre las promesas productivas y los resultados obtenidos en la operación se observa en términos de:

- Vida de la mina
- Ingresos
- Costos
- Reservas mineras

En la práctica existen diversas fuentes de incertidumbre, se deben buscar sobre cuales se pueden tomar medidas para manejarlas y robustecer la toma de las decisiones, y que tengan un impacto en las inversiones o retornos futuros que se desea.

Las fuentes de incertidumbre se pueden diferenciar según si es interna o externa. Se entiende por una fuente de origen externa a aquellas ajenas a la empresa y por internas, a aquellas dictadas por los activos y organización propias de ésta. La principal fuente de incertidumbre externa corresponde al mercado, ya sea el precio del commodity, los costos de los insumos, etc. Mientras que la incertidumbre interna principalmente se tienen dos fuentes, que son la geológica y por otro lado la incertidumbre operacional. En base a esto, los tres tipos de incertidumbre que gobiernan el negocio minero corresponden a: geológica, operacional y mercado. (Mayer Z, Kazakidis V, 2007).

El interés de trabajar con fuentes internas de incertidumbre se debe a que existe la posibilidad de conocer y acotarlos, no así en las fuentes externas donde sus escenarios futuros se deben a factores incapaces de manejar por la empresa.

Dentro de las fuentes internas, la incertidumbre operacional es de las que menos se han realizado avances de cómo hacerle frente, ya que por lo general los parámetros operacionales, como disponibilidades de equipos, utilización, disponibilidad de material en las frentes de extracción o puntos de extracción, y otras componentes del sistema minero, son consideradas un

efecto de cómo se lleva la mantención y operación de estos y por lo tanto se disocia de la etapas de planificación.

Por otra parte, la fuente de incertidumbre de tipo operacional presenta un efecto directo dentro de las productividades, por lo que si no se toma en cuenta es posible que no se cumplan las metas en toneladas producidas de mineral, ya que las componentes del sistema minero en la realidad no respondieron como se esperaba, y por lo tanto se torna imposible lograr las metas, y este incumplimiento afecta directamente el valor del negocio ya que al no cumplir los tonelajes, tampoco se cumplen los finos de material de interés que es lo que entrega los retornos. En particular para minería por hundimiento, uno de los factores que afectan las capacidades productivas del sistema minero completo, es la disponibilidad de los puntos de extracción, estos pueden estar o no disponibles por diferentes razones, ya sean colgaduras, presencia de agua-barro (disminuye la velocidad de extracción), sobre tamaños, etc. Estos eventos son replicables mediante métodos estadísticos, ya que se asumen eventos independientes entre la ocurrencia de ellos, y tenemos su frecuencia de ocurrencia y duración, por lo cual basta ajustar una distribución a estos datos, y podríamos generar escenarios aleatorios que cumplan con la distribución de los datos históricos. Al tener los escenarios se tiene una forma de incluir la incertidumbre operacional, para este caso la incertidumbre como ya se ha mencionado viene dada por la variabilidad de las velocidades de extracción de las columnas, debido a la ocurrencia de eventos que detienen su normal funcionamiento y así poder tomar medidas que nos permitan prevenir el no cumplimiento, es decir, realizar un aumento de la confiabilidad del plan.

Por otra parte, los indicadores que son utilizados para tomar decisión en los proyectos mineros, nos conducen a no incluir todas las flexibilidades que son necesarias para hacer el plan más robusto, ya que estas coberturas solo implican un gasto el cual tiene una probabilidad baja de no tener que ser utilizadas. Estos indicadores son el VAN (valor actual neto) principalmente y otros indicadores relacionados. Como las herramientas utilizadas están diseñadas para evaluar casos determinístico por lo obviamente no constituyen las herramientas adecuadas para realizar evaluaciones en presencia de incertidumbre.

Por lo anterior, la incorporación de la metodología de opciones reales aparece como un complemento a las metodologías previamente mencionadas, en el caso de que exista incertidumbre. Además, aporta una gran flexibilidad ya que se puede cambiar el curso de un proyecto para que se torne más favorable. Estas flexibilidades son diversas y todas tiene un costo asociado, algunas más complejas de llevar a acabo que otras, pueden ser tanto como abandonar la explotación, aumentar capacidades de producción o disminuirlas, aumentar la capacidad de apertura de área manteniendo la producción mina, etc.

En relación a lo comentado previamente, la evaluación mediante opciones reales no mejorara el valor de forma considerable en el caso de proyectos muy atractivos, ya que de todas formas se realizaran, y tampoco en caso de proyectos con bajos valores de VAN, ya que de todas formas no se invertirá en ellos. Sin embargo, cuando uno quiere recortar los valores negativos, es decir, tratar de evitar los escenarios más desfavorables la valorización con opciones reales ayuda ya que considera permite el ingreso y cálculo de diversos escenarios. Esto convierte a esta herramienta en una adecuada para ayudar a valorizar aumentos de confiabilidad.

Por el contrario, en proyectos con un bajo VAN esperado, el valor adicionado por la metodología de opciones reales permitirá cambiar la decisión de llevar o no a cabo el proyecto dependiendo de la incertidumbre de éste y el grado de flexibilidad que permite.

Como podemos observar en la siguiente figura, el beneficio de la evaluación mediante opciones reales, es mayor en proyectos de alta incertidumbre, o de proyectos de bajo VAN donde se desea acotar los casos desfavorables, para así tener la mayor probabilidad de obtener un valor positivo y/o minimizar las pérdidas.

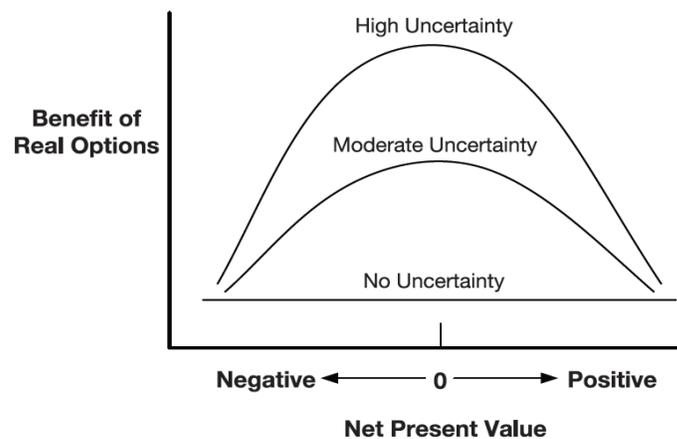


Figura 3: Beneficio de opciones reales en función del valor presente neto (Dimitrakopoulos R., Abdel S., 2007).

Aunque el uso de opciones reales en la valorización de proyectos mineros se ha ido incorporando poco a poco, se ha utilizado básicamente en los casos más comunes hablados previamente, y enfocados en la incerteza del commodity. Es por esto que se hace necesario incorporar metodologías que consideren la incertidumbre que proviene de la operación de los proyectos, y considerando coberturas factibles y aplicables en la realidad. Así se espera una mejora en la evaluación del valor de los proyectos mineros y que se

puedan hacer cargo de las incertidumbres propias de estos, y así realizar una mejor valorización y un proyecto más robusto.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Diseñar una metodología para estimar la cobertura operacional óptima en minería de caving, respecto del valor del proyecto y para un nivel de confiabilidad dados.

1.2.2 Objetivos específicos

- Determinar coberturas frente a eventos que afecten el cumplimiento del plan.
- Encontrar el óptimo de coberturas para maximizar el valor.
- Encontrar la relación entre el tamaño de las coberturas operacionales, su impacto en el valor del proyecto y la confiabilidad del plan minero.
- Lograr medición de Confiabilidad frente al cumplimiento del plan minero en función de la cantidad de mineral extraída.
- Validar metodología en un caso de estudio real.

1.2.3 Metodología

La metodología a utilizar en el siguiente en este trabajo de título será la siguiente:

1. A partir de la información que se recolecta en la mina del caso de estudio (planos, velocidades de extracción planificadas y reales, cantidad de equipos, ritmos de producción), acerca del sector a estudiar, se lleva a cabo la construcción del plan de producción base, mediante la herramienta UDESS para replicar los planes del sector.
2. En base a los registros de velocidades de extracción, que reflejan la ocurrencia de eventos de interrupción se procede a la generación de escenarios simulados de las velocidades de extracción reales para cada una de las columnas y sus componentes.
3. Se someten los escenarios de velocidades de extracción a la misma metodología (restricciones, recursos y consideraciones) del plan de producción previamente realizado, con esto se evalúa la confiabilidad y variabilidad del valor del proyecto.
4. Insertar coberturas, que en este caso será cambiar la cantidad de puntos que se abrirán por periodo respetando siempre la misma secuencia de apertura y se observa la variación en la confiabilidad del plan.
5. Con los resultados de los planes realizados se busca la probabilidad de cumplir al menos el plan inicial, mediante la comparación de cada uno

de estos con el plan base y se determinan cuales no cumplen con la producción y el van asociado a esto.

6. Teniendo ya en calculadas las probabilidades de cumplimiento con respecto al plan inicial y el valor presente asociado a esta probabilidad, se procede con la metodología de opciones reales, a realizar la valorización.
7. Realizar valorización del van con flexibilidad y evaluar variación de valor.

1.2.4 Alcances

- Aplicación a minería subterránea, block/panel caving.
- Se llevara a cabo la validación a nivel de mina.

2 Antecedentes bibliográficos

En el presente capítulo se mencionan los antecedentes y análisis referentes a la realización del presente trabajo presentado. Éste se organiza en función de los principales temas abordados y bajo los cuales se desarrolla la metodología propuesta.

Los temas a tratar serán en primer lugar definir planificación de la producción, para así entender el entorno de trabajo, luego hablar sobre preparaciones mineras en panel caving y sus diferencia en ejecución en las diferentes variantes del método, así poder comprender como se llevan a cabo estas, luego se tratara el tema de las interferencias en sistemas mineros, ya que se estima que son estos los que representan los problemas en los cumplimientos de los planes de producción, además se trataran los temas de confiabilidad, modelos de confiabilidad, riesgo e incertidumbre, con esto generar la base para los estudios de confiabilidad que se realizaran en el presente trabajo, y por ultimo se tocara el tema de opciones reales, las que se presentan para validarlas como una metodología de valorización para este trabajo.

2.1 Planificación de la producción

La planificación minera puede definirse como el proceso de ingeniería de minas mediante el cual el recurso mineral se transforma en el mejor negocio productivo para el dueño (Rubio, 2006). Así, la planificación minera tenderá a maximizar la renta del negocio minero activando cada una de sus fuentes, integrando las restricciones impuestas por el recurso mineral, el mercado y el entorno. Dependiendo el contexto, la planificación minera puede clasificarse en:

- Planificación estratégica: tiene que ver con aquellos factores que determinan el valor del recurso minero y cómo estos se relacionan con el mercado respectivo.
- Planificación conceptual: es el proceso que delinea los recursos minerales y físicos existentes para conducir a la meta productiva definida como parte de la planificación estratégica y generalmente se enmarca dentro de un ámbito de proyecto. En esta etapa es donde se definen la capacidad y vida de la mina, además de las reservas.
- Planificación operativa: una vez que la mina es puesta en operación, se realizan diversas actividades de optimización de equipos y procesos que conducen a la consecución del plan minero definido en la planificación conceptual. En esta etapa se produce retroalimentación hacia la planificación conceptual de modo de redefinir algunos conceptos y generar los proyectos que permitan alinearse con el plan minero. El aporte de la planificación operativa es fundamental desde el

punto de vista de la definición de indicadores operacionales y retro análisis de planificación.

Por su parte, los horizontes temporales en la planificación se definen como una herramienta para tratar la incertidumbre dentro del proceso minero, de esta manera pueden definirse:

- Planificación de largo plazo: define la envolvente económica, el método de explotación, ritmos de extracción, secuencias de explotación y las leyes de corte.
- Planificación de mediano plazo: se encarga de adaptar los modelos que sustentan la planificación de largo plazo. Produce planes de producción que permiten conducir la operación a las metas de producción definidas.
- Planificación de corto plazo: su rol más importante es la recopilación y utilización de la información operacional de modo de retroalimentar al largo plazo. Por otro lado, se preocupa de definir indicadores de modo de corregir los modelos que sustentan la planificación.

Una de las principales tareas del proceso de planificación minera es la definición del determinado programa de producción, que cuantifica las tasas de producción del sistema minero en el tiempo. Esta labor debe realizarse desde los estudios de factibilidad hasta la última fase productiva (Russel, 1987) y sustenta el valor económico de un proyecto minero, definiendo qué parte del yacimiento subyacente corresponde a reservas mineras.

La construcción de un programa de producción en una mina de Block o Panel Caving se basa en los siguientes parámetros (Rubio et Al, 2001):

- Tasa de incorporación de área: define para cada periodo del programa la cantidad máxima de puntos de extracción que pueden construirse. Esta restricción se basa generalmente en la geometría del nivel de producción, el comportamiento geotécnico del macizo rocoso y la infraestructura minera disponible.
- Secuencia de construcción de puntos de extracción: define el orden en que los puntos de extracción se construyen. Esta secuencia se define en función de la secuencia de hundimiento.
- Área en producción máxima: en cada periodo del programa, el área activa máxima es función de la infraestructura y los equipos disponibles, como también de la capacidad de ventilación de la mina.
- Velocidad de extracción: limita el tonelaje que puede extraerse desde un punto de extracción en cada periodo del programa. La velocidad de extracción es función de la fragmentación y la velocidad de propagación del hundimiento.

- Razón de tiraje: define una relación temporal entre el tonelaje de un punto de extracción y sus vecinos. Se cree que este parámetro puede controlar la entrada de dilución y el daño en el nivel de producción debido a esfuerzos inducidos.
- Producción objetivo.

La metodología de extracción de block/panel caving se basa en el proceso natural de fragmentación de un macizo rocoso por la socavación de su base y el flujo del material por efecto de la gravedad. Por lo tanto, se requiere un entendimiento más profundo del comportamiento geotécnico del macizo rocoso que en otros métodos de explotación donde la granulometría del mineral es resultado de perforación y tronadura convencionales. Los principales parámetros geotécnicos que afectan el proceso de planificación de una mina de hundimiento son los siguientes (Brown, 2003):

- Hundibilidad.
- Iniciación del hundimiento.
- Propagación del hundimiento.
- Fragmentación.
- Comportamiento de los esfuerzos alrededor de los límites del hundimiento.

Los parámetros geotécnicos presentados anteriormente afectan en la definición de algunos de los parámetros requeridos para el proceso de programación de producción como la secuencia de hundimiento, las velocidades de extracción y las tasas de desarrollo. La capacidad de representar la variabilidad de los parámetros que afectan el proceso de programación de producción se traducirá en la disminución del riesgo y en el aumento de la capacidad de predecir el comportamiento productivo de un sistema minero (Summers, 2000).

2.2 Preparaciones mineras

Comprende las actividades necesarias para habilitar la infraestructura necesaria para la explotación de un sector productivo.

En forma general, la preparación minera se puede dividir en dos etapas:

- Infraestructura de pre-producción, en la cual se habilita la infraestructura para la producción de un sector. En esta etapa se realizan los accesos principales, barrio cívico, infraestructura eléctrica y de ventilación.
- Infraestructura de explotación, la cual comprende la preparación de los diferentes niveles involucrados en el proyecto.

En la siguiente lámina (Figura 7) se puede apreciar que la preparación minera es el conjunto de actividades que da inicio al proceso productivo.

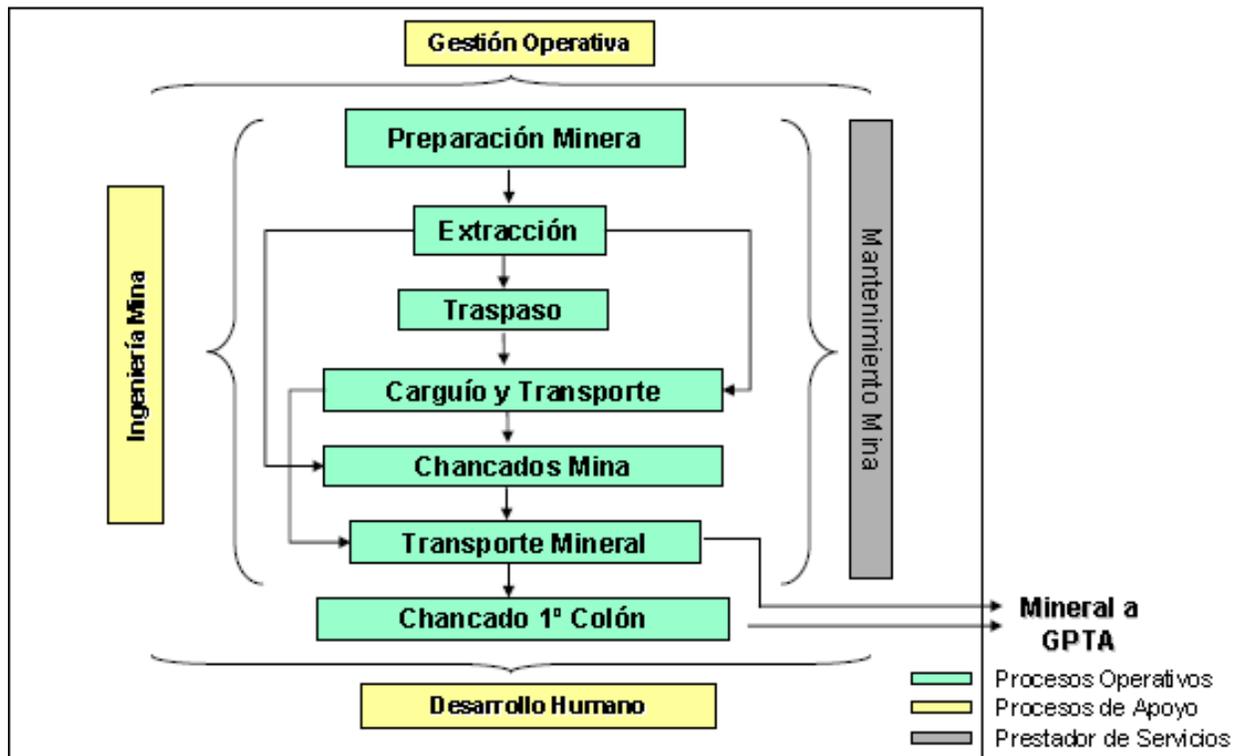


Figura 4. Diagrama de preparaciones mineras caso de estudio (GPTA, gerencia de planta)

2.2.1 Variables consideradas en la programación de la preparación minera

Las principales variables que intervienen en el proceso de planificación de las preparaciones mineras son:

1. Estrategia de crecimiento del sector.
2. Variante de explotación.
3. Diseño minero.

2.2.1.1 Estrategia de crecimiento del sector

El crecimiento de cada sector productivo es definido en el plan de largo plazo del proyecto.

Por lo tanto esta variable determina la secuencia de explotación y crecimiento de un proyecto de acuerdo a parámetros económicos y geomecánicos, definiendo la priorización de las diferentes obras a desarrollar (Gjakoni Mirko, 2006).

2.2.1.2 Variante de explotación

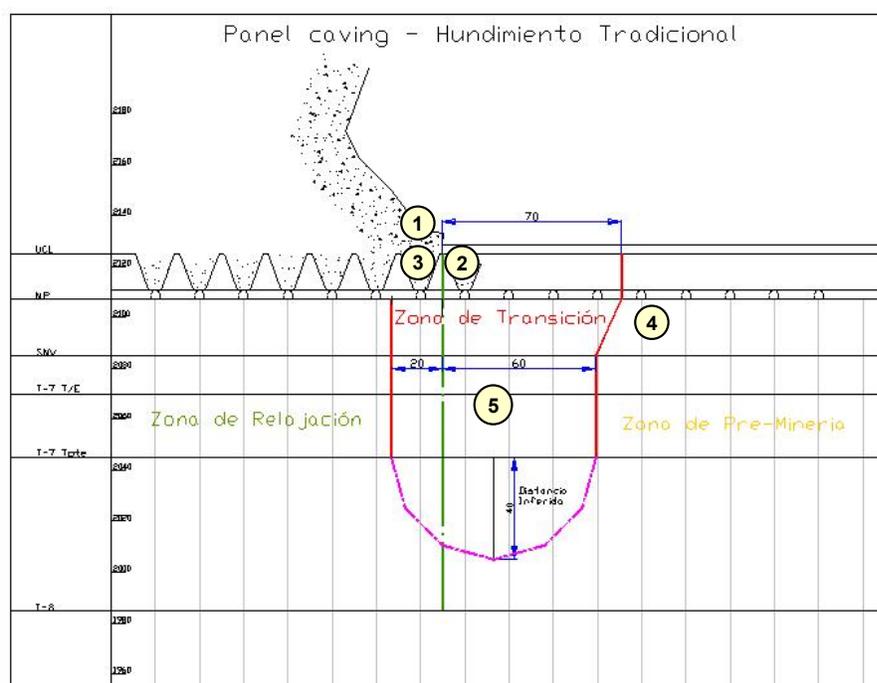
La definición de la variable de explotación a utilizar es definida bajo criterios geomecánicos en base a la litología, geología estructural, geotécnica y el campo de esfuerzos.

Existen tres variantes principales del método de explotación panel caving los cuales son:

1. Panel caving convencional
2. Panel caving con hundimiento previo
3. Panel caving con hundimiento avanzado

2.2.1.2.1 Panel caving convencional

En esta variante la totalidad de la preparación minera se realiza delante del frente de hundimiento ver Figura 5, incluyendo el nivel de producción; la socavación del nivel de hundimiento se realiza con perforación radial en "abanicos". La excavación de zanja, sirve de cara libre para recibir el esponjamiento de la socavación del nivel de hundimiento, por lo tanto la secuencia de socavación es primero zanja y luego nivel de hundimiento.



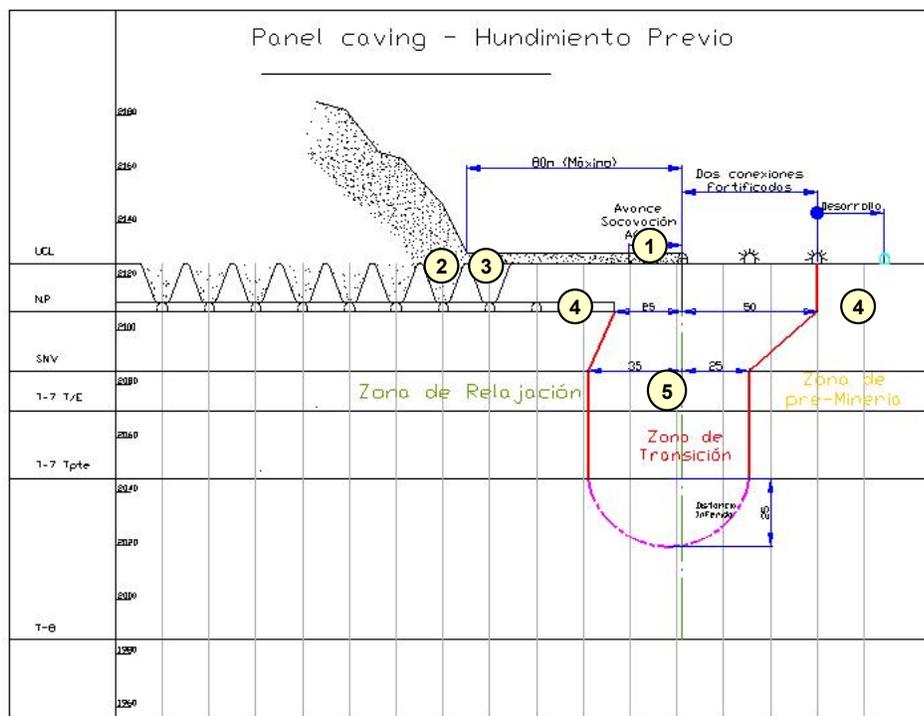
- ① Frente de Hundimiento
- ② Frente de Incorporación de Área
- ③ Frente de Producción
- ④ Frente de Preparación
- ⑤ Trabajos en Zona de Transición

Figura 5. Panel Caving convencional

Durante la etapa de la planificación de la preparación minera, no se programan actividades dentro de la zona de transición, con excepción a las obras inherentes al crecimiento de los frentes de socavación e incorporación. Estas actividades permitidas, corresponden fundamentalmente a las de perforación y tronadura.

2.2.1.2.2 Panel caving con hundimiento previo

En esta variante la preparación del nivel de producción se realiza bajo sombra, es decir, una vez que ha avanzado la socavación en el nivel de hundimiento ver Figura 6. Los demás niveles se preparan de la misma forma que un hundimiento convencional. La secuencia de socavación en este caso es primero el nivel de hundimiento y luego las socavaciones la zanja la cual debe alcanzar el piso del nivel de hundimiento.



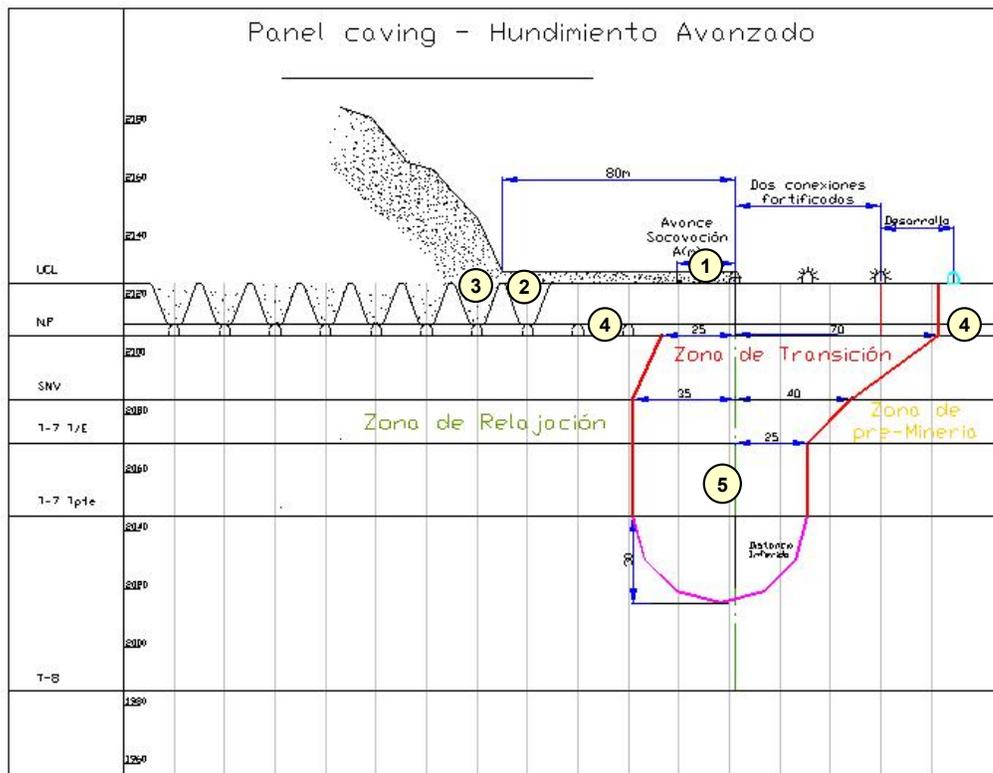
- ① Frente de Hundimiento
- ② Frente de Producción
- ③ Frente de Incorporación de Area
- ④ Frente de Preparación
- ⑤ Trabajos en Zona de Transición

Figura 6. Panel caving con hundimiento previo.

2.2.1.2.3 Panel Caving con hundimiento avanzado

En esta variante del método de explotación, parte de las preparaciones en el nivel de producción se realiza delante del frente de socavación ver Figura 7,

fundamentalmente calles de producción, sistemas de traspaso y accesos. Los demás niveles se realizan de forma similar al hundimiento convencional.



- | | |
|-----------------------------------|----------------------------------|
| ① Frente de Hundimiento | ④ Frente de Preparación |
| ② Frente de Incorporación de Área | ⑤ Trabajos en Zona de Transición |
| ③ Frente de Producción | |

Figura 7. Panel caving con hundimiento avanzado

2.2.1.3 Diseños mineros

Los diseños mineros provienen de la génesis del proyecto, y la información que aquí se obtiene proviene básicamente de los planos de disposición general e ingeniería de detalle de las siguientes especialidades:

- Diseño minero: entrega los planos de disposición general y diseño de detalles de cada uno de los niveles involucrados. En estos planos se detalla las secciones de las labores e información topográfica de detalle (centro, gradiente y pendiente de las labores)
- Diseños de fortificación: define los estándares de fortificación de las diferentes excavaciones que se realizan, desde la fortificación de desarrollo

hasta la fortificación definitiva del proyecto, incluyendo el desfase que deben llevar estas.

- Diseño civil: entrega la ingeniería de detalle de las obras civiles requeridas para la puesta en marcha del sector productivo.
- Perforación y tronadura: corresponde a los diseños de perforación radial y tronadura del nivel de hundimiento, la excavación de las zanjas y barrenaduras especiales, incluyendo las condiciones en las cuales se deberán realizar las tronaduras
- Ventilación e hidráulica: esta especialidad proporciona los circuitos de ventilación y drenaje, tanto de la etapa de preparación como de operación del sector productivo.

2.3 Interferencias operacionales en sistemas mineros

Sin importar la simpleza o complejidad del sistema de manejo de materiales de una operación de hundimiento por bloques o paneles, este debe hacerse cargo de la ocurrencia de eventos de interferencia en cualquiera de sus partes. Particularmente, el proceso de fragmentación es fundamental en este tipo de minería dado que una de las principales perturbaciones del sistema minero es su vulnerabilidad a la aparición de rocas de granulometría tal que hacen imposible su transporte y que generan bloqueos en el flujo de mineral a través del sistema. Estas interferencias operacionales son particulares para cada componente del sistema al igual que sus metodologías de reparación, entre las que se destacan, para minería de Block y Panel Caving:

Componente	Interferencia	Solución
Puntos de extracción	Sobretamaño	Perforación y tronadura
		Detonación de cargas superficiales
		Martillos rompedores
	Colgadas	Perforación y tronadura (dificultad de acceso para colgadas de mucha altura)
Cruzados de producción	Compactación de finos	Tronadura secundaria
	Cierre para reparación de puntos de extracción	Reparación de puntos de extracción
	Daño en carpeta de rodado	Re pavimentación
	Colapsos	Re excavación
Parrillas	Sobretamaño	Pérdida del cruzado
	Rotura de parrilla	Martillos rompedores
Piques de traspaso	Colgadas	Cambio de componentes
		Perforación y tronadura (dificultad de acceso)
	Sobretamaño en parrillas	Detonación de cargas superficiales (dificultad de acceso)
	Compactación de finos	Martillos picadores
Buzones	Fallas mecánicas variadas	Tronadura secundaria
Cruzados de transporte	Equipos detenidos	Reparación mecánica
	Daño en carpeta de rodado	Remolcar equipos
	Cierre para reparación de buzones	Reparación in-situ
		Re pavimentación
		Reparación de buzones

Figura 8. Eventos de interferencia más frecuentes para diferentes componentes de la infraestructura minera subterránea y técnica de reparación (Le Faux, 1998).

En general, los eventos de interferencia que afectan a componentes de infraestructura minera tienen la particularidad de ser reparables, sin embargo la no disponibilidad temporal de la infraestructura afecta de igual manera en la productividad del sistema minero, siendo la magnitud de este impacto dependiente de las estrategias de reparación y los recursos disponibles para solventarlas (Troncoso, 2006).

2.3.1 Interferencias operacionales en block/panel caving

2.3.1.1 Fragmentación

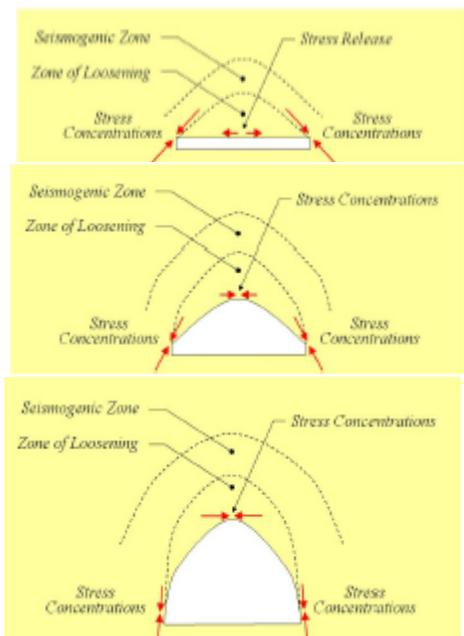
El proceso de fragmentación es fundamental en la minería de hundimiento por bloques o paneles, debido a que una de las principales perturbaciones en el sistema productivo minero es la aparición de sobre tamaño y bloques que se generan en el proceso de hundimiento en el nivel de producción, debido a que rocas de tamaños excesivos elevan las tasas de colgadas e interrumpen el carguío, inhabilitando puntos de extracción o dejando inoperantes piques de traspaso. Por lo anterior, es de suma importancia

comprender cómo se produce el proceso de fragmentación del macizo rocoso producido por el proceso de hundimiento (fragmentación primaria).

Se distinguen al menos las siguientes etapas:

- Socavación: ocurre previo a la producción minera, cuando la extracción se realiza mayoritariamente para desarrollar el hundimiento de un determinado sector.
- Tiraje inicial: la remoción de importantes volúmenes de roca resulta en el cambio de la condición de esfuerzos en los sectores donde se realiza la extracción.
- Iniciación del hundimiento: se inicia el hundimiento cuando el radio hidráulico del área efectiva abierta en el nivel de producción ha alcanzado el valor crítico, que depende de la calidad del macizo rocoso.
- Conexión inicial: se ha producido la falla del pilar entre la socavación y la superficie y la mayor redistribución del esfuerzo.
- Conexión: aparecen fracturas evidentes en la superficie asociadas al quiebre generado por el hundimiento, este evento muestra que el área abierta en producción en el nivel de producción ha alcanzado una dimensión crítica para sustentar el proceso de quiebre.

Las siguientes imágenes aclaran y resumen lo anteriormente expresado:



Corte inicial define una excavación tabular la cual induce el hundimiento por efecto viga y el modo de falla es básicamente por tracción.

La geometría del frente de la cavidad comienza a curvarse producto de fallas por corte o cizalle

En altura sigue predominando el efecto de esfuerzos de corte actuando sobre el techo del hundimiento

Figura 9. Diagrama esquemático del proceso de hundimiento.

Por otro lado, el descenso de la columna ya fragmentada debido a la extracción en niveles inferiores genera también reducciones en la granulometría debido principalmente a la fricción y los impactos generados por la traslación (fragmentación secundaria).

2.3.1.2 Puntos de extracción

A nivel de puntos de extracción, pueden identificarse al menos 4 tipos de interferencia operacional que nos interesan, asociados a diferente fenomenología y estos son:

2.3.1.2.1 Grado de fragmentación

Aquí se puede distinguir dos interferencias:

- Colgadas: se produce cuando se forman arcos estables en la zanja, es decir, sobre el punto de extracción se forma un arco que no permite que el material fragmentado escurra. (Figura 10)
- Sobre tamaños: Este fenómeno se produce, básicamente por material que no logro ser reducido mayormente de tamaño por la pila de material quebrado sobre los puntos de extracción, y posee por lo tanto un tamaño mayor al que la pala puede cargar.

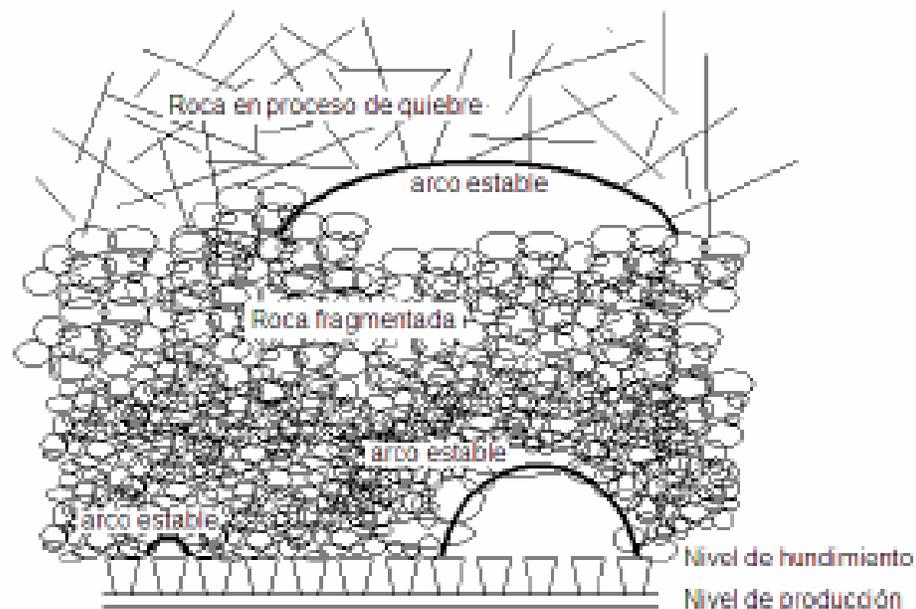


Figura 10. Figura esquemática sobre interrupciones colgadas.

2.3.1.2.2 Humedad

- Barro: es la infiltración de material fino mezclado con agua, proveniente de niveles superiores, o desde el cráter formado por la

subsistencia, el cual limita la velocidad de extracción, y debe ser tratado de manera especial ya que existe un riesgo importante de que ocurra un escurrimiento repentino de este material desde el punto de extracción hacia la calle(bombeo). Lo cual pone en peligro la integridad de los operadores.

- Enllampamientos: se detecta a nivel de puntos de extracción. Se produce por la compactación del material fino, que junto a la presencia de agua y bajas temperaturas genera un aglomerado de material que imposibilita el carguío de material, requiriéndose reducción secundaria para su reparación (Troncoso, 2006).

2.4 Confiabilidad

En su más amplio espectro la confiabilidad puede definirse como la probabilidad de que un sistema realice la función requerida bajo condiciones establecidas, por un periodo de tiempo definido (Lakner y Anderson, 1985). La definición anterior involucra intrínsecamente que el sistema está sujeto a la ocurrencia de eventos que interfieren su funcionamiento, genéricamente denominados fallas.

2.4.1 Sistemas y componentes

En general, para el análisis de confiabilidad, los sistemas pueden clasificarse como reparables y no reparables (Rigdon y Basu, 2000):

- Reparables: son aquellos sistemas en que cuando una falla ocurre pueden ser devueltos a su estado operativo por algún proceso de reparación diferente al reemplazo del sistema completo.
- Sistemas no reparables: son aquellos sistemas en que cuando una falla ocurre no pueden repararse, por lo que deben descartarse y ser reemplazados por otro.

Sin importar de qué tipo de sistema se trate, muchas veces los sistemas analizados son tan complejos y la naturaleza de sus fallas tan diversa, que es necesario dividirlos en subsistemas menores para su análisis. Cada subsistema puede ser considerado a su vez como un sistema, y como tal, ser dividido nuevamente en subsistemas menos complejos.

Esta subdivisión puede ser tan fina como se necesite hasta llegar a una componente, que puede definirse como aquella parte de un sistema que es indivisible, o ha llegado a un grado de desratización adecuado para el análisis requerido. Desde otro punto de vista, puede decirse que un sistema es una reunión de diversas componentes, cada una de ellas caracterizable por una confiabilidad propia en un intervalo temporal dado.

La disgregación de un sistema en componentes tiene asociada una relación intrínseca entre ellas que permite reagruparlas, considerando sus respectivas confiabilidades.

2.5 Riesgo e incertidumbre

Riesgo e incertidumbre son conceptos que generalmente se asumen como sinónimos, hecho que está errado, ya que corresponden a conceptos similares, pero por definición diferentes.

El riesgo se define como la incapacidad de conocer el resultado, conociendo a priori las probabilidades de cada una de las posibilidades, por ejemplo al lanzar una moneda uno conoce la probabilidad de que salga cara o sello, pero aun así existe el riesgo, ya que al lanzar la moneda no conocemos el resultado hasta que la moneda cae y lo observamos. En cambio incertidumbre se diferencia del riesgo ya que no conocemos a priori las probabilidades de ocurrencia de los eventos, sería el mismo caso anterior pero con una moneda cargada, y que no sabemos la probabilidad de las caras y los sellos (Pablo Guerron-Quintana, 2012).

Con un proyecto que se encuentra bajo estas condiciones, no aplica directamente la utilización del criterio de maximizar el VAN, ya que pasa a ser una variable aleatoria.

2.5.1 Incertidumbre en minería

En planificación minera se pueden distinguir diversas fuentes de incertidumbre, las cuales pueden clasificarse de acuerdo a su naturaleza, pudiendo ser estas del tipo interno (endógenas) o externo (exógenas). Las fuentes de incertidumbre internas son aquellas dictadas por los activos y la organización propios de la empresa, destacándose las del tipo geológica y operacionales producto del impacto que estas presentan en las retribuciones futuras que se espera lograr.

Por otra parte, las fuentes de incertidumbre externa son aquellas ajenas a la empresa destacándose dentro de esta clasificación la incertidumbre de mercado producto de su impacto en el valor del negocio (Mayer Z, Kazakidis V. 2007).

El conjunto de las principales fuentes de incertidumbre tanto internas como externas se presenta en la siguiente figura.

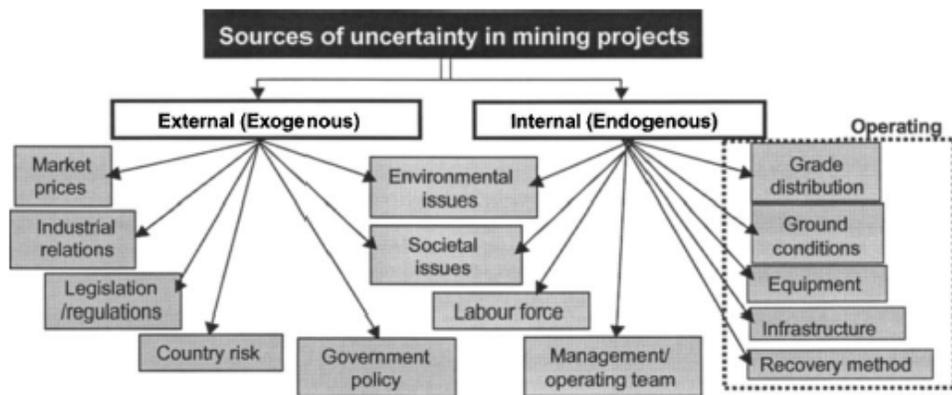


Figura 11: Fuentes de incertidumbre en proyectos mineros

La incertidumbre geológica representa el grado de ignorancia que se tiene acerca de la caracterización mineralógica del recurso geológico. Los modelos de incertidumbre buscan caracterizar los valores desconocidos de la variable regionalizada no por estimaciones, sino que por distribuciones de probabilidad. Conocer cómo es susceptible a distribuirse un valor permite medir la probabilidad que éste sobrepase una determinada ley de corte y entregar intervalos de confianza donde el valor real tiene “grandes probabilidades” de hallarse (Emery X. 2009).

Por otra parte, la fuente de incertidumbre interna del tipo operacional, tiene relación con la realidad misma de la operación de equipos dentro de la operación minera propiamente tal, la cual se caracteriza por tener una variabilidad inherente al funcionamiento de maquinaria bajo grandes exigencias y por tiempos prolongados. Además, se relacionan con la disponibilidad de recursos humanos, posibles fallas en infraestructuras, la variabilidad existente en la mezcla de alimentación a planta, disponibilidad de insumos y condiciones climáticas entre otras.

Finalmente la principal fuente de incertidumbre externa, tiene relación con la incapacidad de predecir con exactitud cómo se comportaran los actores que definen el marco económico mundial, las cadenas de suministros, el actuar de los gobiernos, comunidades y el entorno en general. Estos comportamientos son los que definen el precio del commodity principal, los precios de subproductos, tasas de cambio, precios de energía y otros insumos críticos para la operación, costos de mano de obra, monto de inversión requerido y tasa de descuento principalmente.

2.6 Modelo de confiabilidad

El modelo de confiabilidad se basa en las siguientes definiciones:

- Confiabilidad (del programa de producción): es la probabilidad de al menos alcanzar el tonelaje objetivo del programa de producción, en el periodo establecido.
- Falla: cuando el sistema minero no cumple los tonelajes establecidos en el intervalo temporal pertinente.
- Evento: interrupción que detiene el flujo de mineral a través de una componente minera, pero que no necesariamente hace fallar al sistema.

2.6.1 Curvas U

Una curva U muestra la relación entre la frecuencia de ocurrencia de eventos (ROCOF) y la madurez, medida en toneladas extraídas, de una componente minera en particular (puntos de extracción, piques de traspaso, etc.). Se denota por $w(t)$.

Esta curva se utiliza para obtener el número esperado de eventos en el intervalo finito de toneladas $(t_i, t_i + t_i^P)$, donde t_i^P son las toneladas planificadas para la i -ésima componente en un periodo dado y t_i es la madurez actual de ésta. El número esperado de eventos a ocurrir puede calcularse mediante la siguiente fórmula:

$$N(t_i, t_i^P) = \int_{t_i}^{t_i + t_i^P} w(t) dt$$

Ecuación 1. Calculo de número de eventos esperados

Dónde:

- $N(t_i, t_i^P)$, Es el número esperado de eventos para la componente i , dado que se desean extraer t_i^P toneladas (tonelaje planificado) y que hasta el momento se han extraído t_i toneladas (madurez).

2.6.2 Curva de producción característica (PCC)

La curva de producción característica describe la productividad (toneladas por unidad de tiempo) de una componente minera en particular en función del número de eventos en un tiempo determinado. Conceptualmente,

permite cuantificar el hecho que el tiempo total se compone del tiempo efectivo de producción y del tiempo de reparaciones (que no puede utilizarse para producir a través de la componente afectada). Si se considera que mientras mayor es el número de toneladas que pasan a través de una componente, mayor es el número esperado de eventos, la subdivisión temporal anterior impacta directamente en la productividad y, necesariamente, debiese observarse que la productividad disminuye conforme aumenta el número de eventos. A modo de ejemplo, el siguiente gráfico muestra cómo evoluciona la productividad en función del número de eventos, para un punto de extracción:

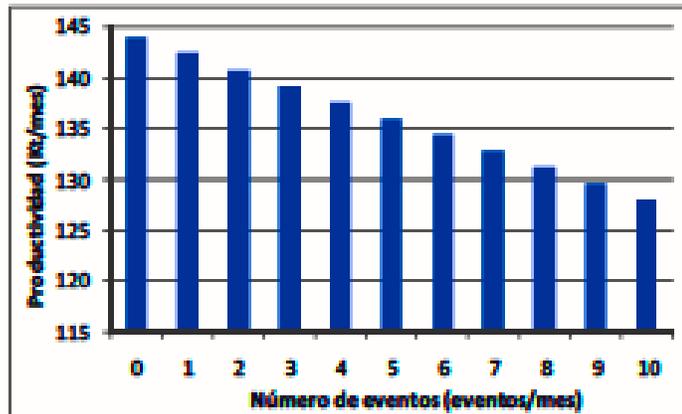


Figura 12. Relación entre productividad y eventos de interferencia en un punto de extracción.

La característica más relevante de la curva de producción característica es que considera el hecho que para un mismo número de eventos pueden existir varios valores de productividad asociados (por lo que existe una cierta distribución de valores de productividad, cada uno con una cierta probabilidad de ocurrencia descrita por su función de densidad de probabilidad). Esta dispersión de valores se debe al hecho de que muchas de las variables que influyen en la productividad de una componente son de naturaleza aleatoria y continua (densidad del mineral, tiempos de reparación, frecuencia de ocurrencia de eventos de interrupción, velocidad de equipos, etc.).

Si bien la curva de producción característica describe el comportamiento productivo de una componente de infraestructura minera se debe considerar que, por ejemplo, un punto de extracción podrá producir una tonelada de material únicamente si existe un equipo LHD operando en dicha componente. Naturalmente, dependiendo de la productividad intrínseca del equipo y otros

factores, como la cantidad total de recursos orientados a la reparación de componentes y las estrategias consideradas en su reparación, la productividad de la componente de infraestructura es diferente (Troncoso, 2006). Por lo tanto, si bien la curva PCC no considera explícitamente este hecho, la magnitud de la productividad y su dispersión observada tiene directa relación con éste.

2.7 Opciones reales

El término "opciones reales" fue utilizado por primera vez por Myers(1977), Dixit y Pyndick (1995). El primer acuñamiento de esta metodología de evaluación se presentó para encontrar las determinantes del endeudamiento de las empresas y buscaba resolver la cantidad de crédito que debía tener una empresa con características específicas.

La valorización mediante el método de opciones reales busca cuantificar la flexibilidad en la toma de decisiones, lo que no es tomado en cuenta por las metodologías tradicionales de valorización. Siempre se puede tomar decisiones para cambiar o encausar el rumbo del negocio, a medida que evalúa cómo se desarrolla la incertidumbre.

Las opciones son derivados, y otorgan a quien lo posee el derecho, pero no la obligación de tomar una acción como ampliar, posponer, contraer o abandonar cualquier inversión a un costo determinado en un periodo definido. Se entiende por derivado, a un instrumento financiero cuyo valor depende o se deriva de un bien denominado subyacente. Este bien subyacente es sobre el cual se realiza la opción.

La técnica de opciones reales rescata valores adicionales en los proyectos, que posiblemente resultan intangibles cuando se utiliza exclusivamente el método tradicional de flujos de caja descontados. Entre mayor sea la incertidumbre o volatilidad de los flujos de caja esperados y el tiempo de expiración de la opción, mayor será el valor de la opción. Sin embargo, la valoración de opciones reales no es necesaria en todos los casos.

En el análisis de opciones reales se utiliza la metodología de las opciones financieras aplicada a la valoración de inversiones empresariales. Para entender la valoración de opciones reales es necesario familiarizarse con la estructura y terminología de las opciones financieras que son presentadas a continuación:

2.7.1 Opción Call

Es una opción de compra que otorga el derecho, más no la obligación, de comprar el activo subyacente durante la vigencia del contrato o en cierta fecha de vencimiento, por un precio que se conoce como prima o precio del ejercicio.

2.7.2 Opción Put

Es una opción de venta que otorga al tenedor el derecho a vender y al emisor de la opción la obligación de comprar una cantidad específica de un activo denominado subyacente a un valor determinado conocido como prima o precio del ejercicio, durante la vigencia del contrato o en la fecha de expiración.

2.7.3 Opciones europeas y americanas

La opción europea sólo puede hacerse efectiva en la fecha de vencimiento, mientras que la opción americana puede hacerse efectiva en cualquier fecha entre la compra y la fecha de vencimiento, inclusive.

Existen algunos casos de proyectos de inversión donde es recomendable el uso de la valoración de opciones reales:

- Cuando hay decisiones de inversión contingentes.
- Cuando la incertidumbre es bastante alta y es prudente la espera de más información.
- Cuando el valor parece estar capturado en posibilidades para futuras opciones de crecimiento en vez de actuales flujos de efectivo.
- Cuando la incertidumbre es bastante extensa para tomar la flexibilidad a consideración. Sólo el enfoque de las opciones reales puede corregir el valor de las inversiones en flexibilidad.
- Cuando haya actualización de proyectos y correcciones de estrategias a medio curso.

2.8 Variables en la valoración de opciones

El valor de una opción depende de algunas variables. A continuación se describirán brevemente estas variables:

Valor actual del activo subyacente (S). Es el precio actual que tiene el activo sobre el cual se posee la opción, es observable en el mercado y surge de una cartera de referencia.

Precio del ejercicio (E). Es la cantidad a pagar, cuando se trata de una opción de compra sobre el activo subyacente o la cantidad a recibir, cuando se trata de una opción de venta sobre el activo subyacente.

Tiempo de Maduración (t). Es el tiempo durante el cual el propietario de la opción podrá ejercerla.

Tasa libre de riesgo (r) valor del dinero en el tiempo.

Volatilidad o Varianza del valor del activo (σ). Mide la variabilidad de los precios futuros del activo subyacente y refleja la incertidumbre económica que rodea un proyecto.

Dividendos o flujos de caja recibidos (D). Variable generada por el activo subyacente durante o después del periodo de maduración.

2.9 Método de valoración de opciones reales

Con las variables definidas anteriormente y tomando como base algunos supuestos, se construyen los modelos de valoración de opciones que se tendrán en cuenta a la hora de aplicarlos al caso de nuestra valoración.

Existen diferentes modelos ya que son diferentes formas de resolver el problema, bajo diferentes supuestos. Los más importantes se presentan a continuación:

Modelo de Black, Scholes y Merton: Es un modelo analítico dado a conocer con la Publicación de Fischer Black Y Myron Scholes con la colaboración de Robert Merton en 1973.

Modelo Binomial: Es un modelo basado en un proceso binomial multiplicativo, presentado por Cox, Ross y Rubstain en 1974.

Modelo de Montecarlo: Propuesto por Poyle en 1977, consiste en simular asignando probabilidades a distintos eventos y probando diferentes trayectos de evolución del activo subyacente.

Modelo de Diferencias Finitas: Propuesto por Brennan y Schawartz en 1977, el cual valora una opción resolviendo la ecuación diferencial que esa opción satisface. La ecuación diferencial se transforma en un sistema de ecuaciones en diferencias que se resuelven en varias iteraciones.

El modelo más idóneo para este trabajo es el modelo binominal, por lo que será este el que se utilizara, por lo tanto será el único que se abordara con mayor profundidad.

2.9.1 Modelo Binomial

Este método desarrollado por Cox, Ross y Rubinstein se fundamenta en álgebra sencilla, por lo que resulta ser más intuitivo. Además, es capaz de resolver situaciones más complejas que las solucionadas por el modelo de Black y Scholes.

Es un modelo de tipo discreto que considera que la evolución del precio del activo subyacente sólo puede tomar dos valores posibles, uno de alza con probabilidad " q " y uno de baja con probabilidad " $(1-q)$ " (Lenos Trigeorgis 1995).

En cada intervalo de tiempo el valor del activo aumenta en " u " y disminuye en " d " factores que se presentan que dependen de la variabilidad del precio del activo subyacente y del tiempo de expiración

Finalmente, la metodología requiere traer el valor final al presente a través de los nodos de tiempo. Mientras más periodos de tiempo se evalúen, más se aproximarán los resultados de árboles binomiales a la valuación de Black y Scholes.

A continuación se muestra el valor de activo subyacente para un periodo según el modelo binomial:

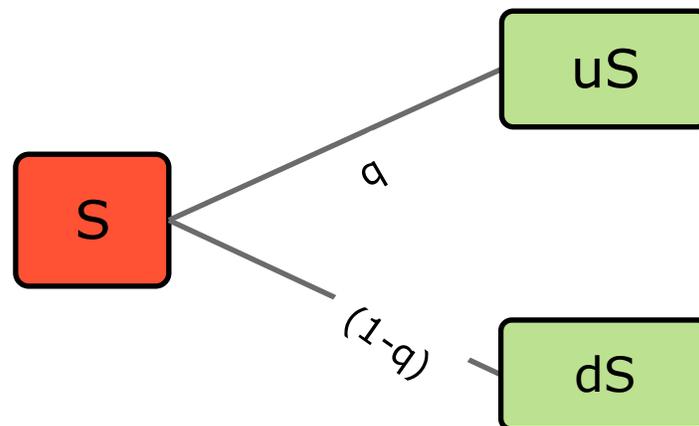


Figura 13. Valor de activo subyacente para un periodo según el modelo binomial (Lenos Trigeorgis, 1995)

Los supuestos a considerar en el modelo Binomial son los siguientes:

- Mercado financiero perfecto, esto es, competitivo y eficiente.
- El cambio del valor del activo con el tiempo es definido por la volatilidad que este adquiere.
- Ausencia de costos de transacción, de información e impuestos
- Posibilidad de comprar o vender en descubierto sin limitación alguna.

- Existencia de una tasa de interés sin riesgo a corto plazo (r_f) conocida, positiva y constante para el período considerado. Esto implica la posibilidad de prestar o tomar prestado al mismo tipo de interés (r_f).
- Todas las transacciones se pueden realizar de manera simultánea y los activos son perfectamente divisibles.
- La acción o activo subyacente no paga dividendos, ni cualquier otro tipo de reparto de beneficios, durante el período considerado.
- El precio del activo subyacente evoluciona según un proceso binomial multiplicativo a lo largo de períodos discretos de tiempo.

3 Metodología experimental

En el presente capítulo se dará a conocer la metodología con la cual se trabajó, y la que será aplicada al caso de estudio en los capítulos posteriores, además de entregar las simplificaciones que se realizaron para poder llegar a una resolución, las formas como se modelaron los eventos y restricciones para el caso de estudio y los supuestos que se realizaron.

3.1 Herramienta de resolución e inputs para su ejecución

Se utilizó la herramienta UDESS (Underground development scheduling and sequencer) desarrollada por el laboratorio de planificación minera DELPHOS, perteneciente al Advanced Technology center, de la Universidad de Chile. Esta herramienta se basa en un modelo matemático que busca generar la optimización de la planificación de las obras de preparación minera y el agendamiento de mineral, en un plan de producción (Rocher W., Morales N., 2012).

UDESS, en pocas palabras busca la forma óptima de llevar a cabo un conjunto de actividades, para maximizar su valor presente neto, ya sean de construcción o de extracción, relacionadas por precedencias de construcción o de operación, con precedencias de construcción nos referimos a que no se puede construir una sección de túnel si no tiene el acceso a ella ya construida, en cambio con precedencias operacionales se refiere por ejemplo a que no se puede extraer de las columnas antes de tener construidos los chancadores y los niveles de ventilación.

En este contexto la herramienta considera elementos principales para la construcción y optimización del modelo, y estas son:

- Tasa máxima de avance: Este parámetro indica la cantidad máxima posible de metros que se pueden realizar en cualquier momento para cualquier actividad (ya sea construcción de túneles, o extracción de mineral), para el modelo este máximo es lo dado como máximo técnico de avance, es decir, si los recursos y la producción fuese ilimitada, cuanto sería lo máximo que se podría realizar de cada actividad.
- Costo o beneficio: Como todo modelo de optimización se debe tener una función objetivo, y en este caso se tiene como función objetivo la maximización del valor presente neto, del desarrollo del conjunto de actividades, por lo tanto cada una de estas actividades pueden tener un costo o un beneficio, dependiendo del tipo de actividad que sea, en la mayoría de los casos las columnas o actividades extractivas tienen un beneficio, y siempre las actividades de construcción solo representan un costo su construcción.

- Recursos: Son el nexo con la realidad, ya que permiten el correcto análisis, debido a que son la forma de considerar, los equipos, los trabajadores, los materiales, etc. Necesarias para llevar a cabo una actividad. Por ejemplo cada actividad consume cierta cantidad de estos recursos, y por cada periodo existe disponible una cantidad finita de estos, y estos deben ser compartidos o distribuidos entre todas las actividades que se lleven a cabo en aquel periodo.
- Precedencias físicas y operativas: Son relaciones entre las actividades que definen que se debe construir para poder acceder a otra actividad, ya sean físicas, que son por ejemplo el poder continuar en otro segmento de túnel, las operacionales son más que anda necesidades para poder llevar a cabo ciertas actividades, por ejemplo poder ventilar un sector, para iniciar la extracción.

Por lo tanto al modelo se le debe entregar un listado de actividades en el cual se detallan todos los parámetros previamente indicados. Además se le deben indicar las diferentes restricciones disponibles, para este trabajo se utilizaron las siguientes restricciones:

- Restricción de máxima disponibilidad de recursos, sirve para restringir e imponer la cantidad de recursos disponibles, por periodo, además de restringir el máximo tonelaje a producir.
- Restricción de cantidad de actividades de cierto tipo iniciadas en un periodo, se utiliza para restringir la cantidad de puntos de extracción abiertos por periodo.

3.1.1 Variables del modelo de UDESS

El modelo considera 4 tipos de variables de decisión, las cuales son las siguientes:

1. P_{it} , es el porcentaje de la actividad i que realizado en el periodo t . Con esto ya no se decide si hacer o no una actividad en un periodo si no cuanto hacer en cada periodo.
2. S_{it} , una variable binaria que indica en que periodo t inicia la actividad i
3. e_{it} , es una variable binaria que nos indica el periodo t en el cual termina la actividad i
4. r_{iPt} , indica si el grupo de actividades P (que son predecesoras de la actividad i), han sido terminadas en el periodo t .

3.1.2 Función objetivo de UDESS

La función objetivo en UDESS, puede llegar a ser lo que uno estime conveniente, como por ejemplo maximizar el tonelaje extraído en el plan de producción, maximizar los finos del material de interés, minimizar costos, maximizar el valor presente neto del proyecto. Lo que transforma a UDESS

en una herramienta muy adaptable a diferentes situaciones que requiera el usuario.

3.1.3 Restricciones

3.1.3.1 Relaciones básicas

La herramienta toma en cuenta relaciones básicas que dan sentido al modelo.

En primer lugar, considera que las actividades inician una única vez y terminan una sola vez, además que solo se puede desarrollar una actividad una vez que ha sido declarada iniciada y no ha sido terminada.

Segundo, se asegura que una actividad sea declarada terminada únicamente cuando se desarrolle el ciento por ciento de esta.

Tercero, considera que por periodo solo puede desarrollar un máximo de una actividad que viene dado por la velocidad máxima de avance de esta.

3.1.3.2 Restricciones de precedencias

Estas restricciones de precedencia son fundamentales ya que indican que una actividad no puede ser iniciada en cualquier periodo, si no que solamente cuando sus predecesoras ya estén realizadas.

3.1.3.3 Restricciones de recursos disponibles

Otra restricción importante y que da utilidad al modelo planteado es la restricción de recursos disponibles para todo el proyecto, que para esta herramienta en particular da cuenta de las interferencias entre actividades por utilización de recursos en un periodo dado. Quiere decir que no es posible que todas las actividades trabajen a tasa máxima de avance al mismo tiempo pues usualmente mientras más actividades se realicen conjuntamente, menor será el rendimiento de cada una en particular al estar compartiendo por ejemplo equipos mineros, personal o materiales de construcción. Sin embargo no se hace cargo de las interferencias físicas de la convivencia de equipos.

3.1.3.4 Restricción de inicio de actividades

Esta restricción lo que busca es poder forzar que una actividad sea iniciada en un rango de periodos determinados, es decir, se puede fijar metas para llegar a cierta actividad. Esta restricción debe ser aplicada con cautela, ya que puede llevar a que el modelo a resolver sea infactible.

3.2 Modelamiento caso de estudio

Para lograr el objetivo de este trabajo se debieron realizar simplificaciones sobre el caso real, para así poder agilizar el proceso de optimización, ya que para llevar a cabo el caso de estudio se deben hacer ejercicios sobre un

centenar de escenarios, esto llevaba mucho tiempo para cada uno de estos por lo que se hizo necesario solo trabajar con lo que fuese más importante, y dejar de lado o agregar algunas actividades.

3.2.1 Nivel de ventilación

Se decidió eliminar del proceso de optimización el nivel de ventilación, no porque no sea importante dentro de la operación minera, sino más bien dada su importancia, porque este siempre va más adelantado en su preparación, dado esto nos permitimos excluir sus actividades en el modelo.

De todas maneras es importante señalar que se tiene en consideración al momento de modelar, los requerimientos de ventilación ya que se conservan las chimeneas de ventilación dentro del modelo y estas tienen velocidades de avance, y precedencias en el nivel de producción, por lo que no permiten extraer sin que exista la ventilación de esa calle.

3.2.2 Nivel de producción

En el nivel de producción se decidió tomar solo actividades de desarrollo horizontal claves, tales como accesos, calles, puntos de extracción, armadas, galerías de zanjas, carpetas de rodado y chimeneas de ventilación, las demás actividades como frontones de todo tipo, obras civiles, etc. No son consideradas debido a que duplican la cantidad de actividades en el nivel, y fueron simplificadas al ser consideradas como una merma en la velocidad de avance de la actividad que debiese ser su predecesora, es decir, a esta actividad predecesora de una de las eliminadas se le disminuyó la velocidad de avance tal que considerara el tiempo de construcción de la que no sería considerada explícitamente.

Por otra parte todas las fortificaciones definitivas fueron asociadas a las carpetas de rodado de la misma forma que las actividades eliminadas, ya que se considera que la construcción de la carpeta de rodado va retrasada con la frente de avance de las preparaciones y por lo tanto es factible incluir aquí las fortificaciones definitivas.

3.2.3 Nivel de hundimiento

Para el nivel de hundimiento se llevó a cabo un proceso similar al del nivel de producción, solo se tomaron las calles de este nivel. Las actividades de socavación, fueron consideradas como una réplica del primer bloque de la columna de extracción replicado que tenía por finalidad reproducir el tiempo de socavación.

3.2.4 Modelo de bloques

3.2.4.1 Re-bloqueo

El modelo de bloques fue re-bloqueado de manera "inteligente", ya que se puede conocer las alturas o tramos de columna de extracción en los cuales las diferentes velocidades de extracción deben ser aplicadas, por lo que decidió re bloquear a estos tamaños, no necesariamente uniformes.

Lo anterior es de gran utilidad ya que el trabajo se utilizan diferentes escenarios para las velocidades de extracción (no varía al tramo al cual es aplicada, si el valor máximo permito al tramo), resulta muy idóneo y práctico para poder llevar acabo los escenarios.

3.2.4.2 Angulo de extracción

Una restricción importante es la del ángulo de extracción, porque el respetar este ángulo permite tener un control sobre el tiraje y provoca que el material en quiebre se mantenga siempre cercano al material quebrado, y así evitar posibles accidentes (airblast) (Laubscher, 2000). Esta restricción fue modelada mediante precedencias entre los puntos contiguos, ver figura 14.



Figura 14. Precedencias entre bloques de columnas de extracción contiguas (izquierda) y consideración de columnas contiguas (derecha).

Como se observa en la Figura 14, las precedencias van desde predecesor a sucesor, y con estas se mantiene el ángulo de extracción para el caso de estudio, aunque no sea exacto el valor permite evitar que este sea mucho mayor al solicitado.

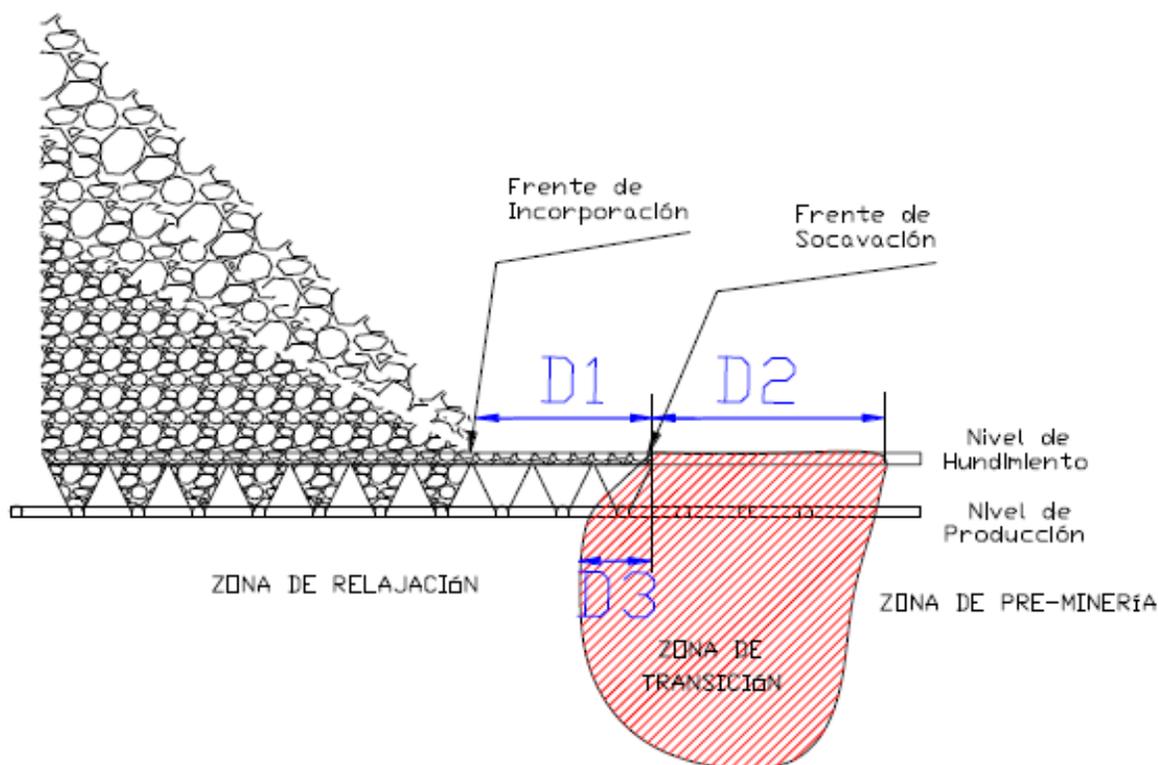
3.2.5 Geometría de frente de socavación

Para mantener la geometría de frente entre otras razones, se mantiene la secuencia de incorporación de puntos planteada por los planificadores en el caso de estudio.

3.2.6 Variante del método de extracción

En el caso de estudio se utilizó la información real, el cual tiene por método de explotación panel caving con la variante de hundimiento avanzado, en la Figura 15 se muestran las distancias que se deben respetar para esta variante. Las restricciones impuestas por esta variante del método de

explotación fueron modeladas mediante precedencias respetando las distancias indicadas para el caso en particular.



Distancia	Valor	Observación
D1: distancia medida entre el frente de socavación e incorporación.	15 - 70 m	<ul style="list-style-type: none"> • Distancia que define la losa. • Distancia que permite avanzar con la preparación minera fuera de la zona de transición.
D2: distancia medida desde el frente de incorporación hasta la interfaz transición /pre-minería. Medida desde el Nivel de hundimiento.	60 – 80 m	<ul style="list-style-type: none"> • Llevar fortificación definitiva • Evitar exposición de personal y equipos.
D3: distancia medida desde el frente de incorporación hasta la interfaz transición / relajación. Medida desde el Nivel de Producción.	15 - 35 m	<ul style="list-style-type: none"> • Evitar exposición de personal y equipos.

Figura 15. Explicación variación método de explotación.

3.2.7 Chancado interior mina y paneles

Este sector comenzó su operación en agosto del año 2005, teniendo por meta productiva las 22,000 toneladas día cuando alcanzara su régimen de producción, además en este sector se intentó en un comienzo utilizar LHD, semiautónomos los cuales presentaron diversas fallas en el sistema de control (automine), y esto se vio reflejado en un incumplimiento de los planes por varios años consecutivos, además de estos es un sector ideal para este estudio ya que presenta una gran humedad, lo cual causa constantes colgaduras en los puntos de extracción, y por ende interrupciones en la producción de dichos puntos.

Otra característica relevante del sector es que por diseño se tendrán siempre al menos dos chancadores operativos(ver Figura 13), donde el mineral extraído del nivel de producción se ira a vaciar hacia estos puntos, por lo que esto impone una restricción sobre la construcción ya que deben estar contruidos los chancadores previamente, esta restricción la explicitamos en la siguiente imagen donde se asocia los sectores al equipo de conminución que debe ser vaciado, donde cada circulo de color representa un equipo de reducción de tamaño y los óvalos con el mismo color marcan el panel del cual se extraerá y se llevara el mineral al chancador con el color correspondiente, esto se modelo mediante precedencias. Cabe destacar dentro de este ítem que la capacidad máxima de procesamiento de cada uno de los chancadores, es de 11,000 [T/día], que al tener dos chancadores operativos nos entrega el máximo de producción del nivel de 22,000[T/día].

3.2.8 Escenarios de velocidades de extracción

Para poder incorporar la variabilidad de las velocidades de extracción en la generación de los planes, se optó por la generación de escenarios, ya que se cuenta con un historial de la ocurrencia de eventos y con este se puede realizar un análisis estadístico, así poder encontrar una distribución que ajuste a estos datos, para posteriormente generar los escenarios a partir de esta distribución, este procedimiento se explicara a continuación.

3.2.8.1 Estudio estadístico de información

Se realizó una recolección y limpieza delos datos, ya que fueron rescatados de una base de datos utilizada en el sector a estudiar. El formato de la información que fue rescatada de esta base de datos, es el que se muestra en la Tabla 1.

Punto	Fecha ultima anotación	Días en estado	Calle	Sector	Estado
23 27H	20/08/2005 0:00	45	23	DR	T
25 28H	27/08/2005 0:00	33	25	DR	O
23 28F	27/08/2005 0:00	69	23	DR	L
23 25H	31/08/2005 0:00	124	23	DR	W
23 25F	31/08/2005 0:00	89	23	DR	T
23 24H	31/08/2005 0:00	72	23	DR	O

Tabla 1. Ejemplo de estado de información en base de datos.

Como se observa el formato de los datos, viene dado por un ID, que es el nombre del punto, el estado de dicho punto (véase Figura 16), días en el estado y fecha de último registro.

CODIGO DE ESTADO	DESCRIPCION	
T	COLGADO	Punto en que el flujo de mineral es interrumpido, formando un arco natural de soporte, ya sea por planchones, colpas de gran tamaño o humedad.
O	OPERATIVO	Punto que se encuentra en condiciones aptas para producir.
S	REABIERTO	Punto que pasa de un estado cortado a disponible para producción.
L	LIMITADO	Punto con extracción restringida a un tonelaje máximo para un período determinado de tiempo. (sistema LHD/Día, Convencional/semanal).
M	BARRERA	Punto que controla el ingreso de la dilución lateral ó Barro de puntos adyacentes.
C	CERRADO	Punto en que se detiene temporalmente la extracción por baja ley de Cu o impurezas. (2 semanas mínimo).
W	RAZONES OPERACIONALES	Punto que permanece fuera de producción por trabajos especiales y temporales, tales como: sondajes en cruzado de acceso o vías de tráfico, desarrollo de labores cercanas, transito temporal de suministros, ó otros.
R	REPARACION	Punto que están fuera de producción por arreglo de su estructura.
Q	QUEDADO	Punto cuya voladura de zanja y polvorazo no ha colapsado
A	CORTADO AGOTADO	Puntos en que se termina definitivamente la extracción por agotamiento o abandono. En el caso de agotamiento, la extracción del punto es igual o mayor que el 100% y presentan ley inferior a la ley de cierre.
B	BARRO/AGUA	Punto que debido a la penetración del agua presentan riesgo de bombeo.
I	CORTADO POR ABANDONO	Punto en que se termina definitivamente la extracción debido a razones de impurezas, condiciones de riego y otros.
H	HUNDIDO	Punto que ha sufrido quiebre del pilar y hundimiento del cerro.
F	HUNDIR A FUTURO	Punto en que no se ha realizado la voladura de zanja.
V	VACIO	Puntos en los cuales sólo se ha efectuado la voladura de zanja y no el polvorazo correspondiente al área del punto.

Figura 16. Detalle de estados de los puntos en base de datos

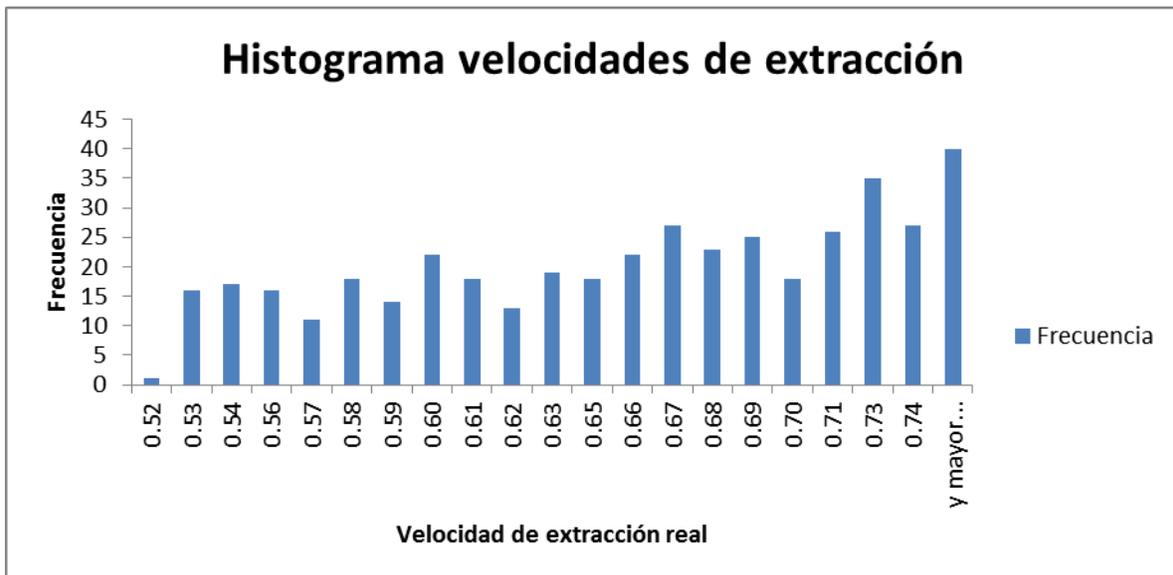
Como el acceso a esta base de datos es por varias personas, se tiende a concurrir en errores, por ejemplo existían dentro de la información un mismo punto con el mismo estado más de una vez, por lo cual se tuvo que realizar una consolidación de los datos, esto se realizó de forma manual.

Con la información preparada, se llevó a cabo una transformación de los datos, ya que lo único que se tenía era tiempo que se había mantenido el punto en el estado deseado, que para este caso son los estados, de sobre tamaño, reducción secundaria y colgadura. Por lo que con esta información y como sabíamos las velocidades de extracción planificadas en promedio en cada uno de estos puntos, utilizamos la conversión según la Ecuación 2.

$$V_{real} = V_{planificada} \times \left(1 - \frac{t_{estados}}{t_{total}}\right)$$

Ecuación 2. Conversión de tiempos en estado a velocidades reales de extracción.

La Ecuación 2, convierte las velocidades planificadas que son estáticas en las velocidades reales por punto, esto debido a que se asume que mientras el punto esté disponible se le extraerá en promedio con la velocidad de extracción planificada, lo que hace válida esta transformación. De la cual obtenemos el siguiente histograma.



Histograma 1. Velocidades de extracción reales

Las velocidades de extracción reales que se tienen en el histograma, se someten al test de bondad de ajuste de Kolmogorov Smirnov, para una

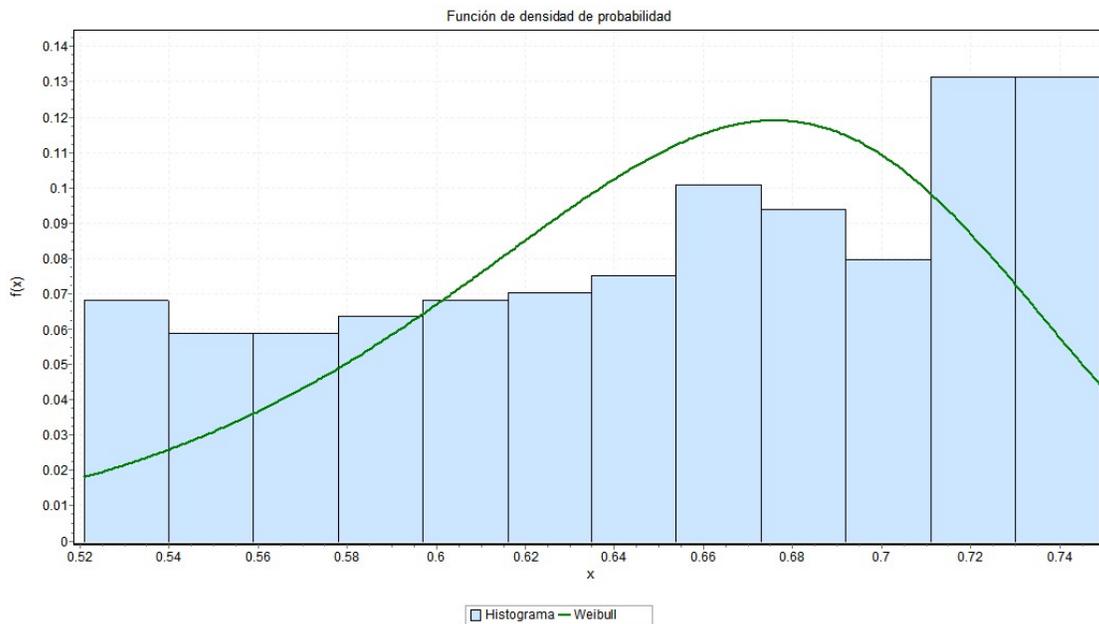
variedad de distribuciones conocidas, de lo cual el mejor ajuste logrado fue una distribución Weibull, que tiene por función de distribución la presentada en la Ecuación 3, y con los parámetros que se presentan en la tabla siguiente

$$f(x; \alpha, \beta) = \begin{cases} \frac{\alpha}{\beta^\alpha} x^{\alpha-1} e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha} & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases}$$

Ecuación 3. Distribución weibull.

α	11.54
β	0.68

Tabla 2. Parámetros de distribución que ajusta a las velocidades reales.



Histograma 2. Velocidades reales de extracción y ajuste de distribución.

Una vez ajustada la distribución, se generaron los diversos escenarios de velocidades de extracción, para este caso se generaron en base a la distribución previamente ajustada 100 escenarios de velocidades de extracción, para cada una de las columnas. Para así, como fue mencionada previamente, poder incorporar la variabilidad de las velocidades de extracción, y ver como se comportan las diferentes coberturas frente a esta.

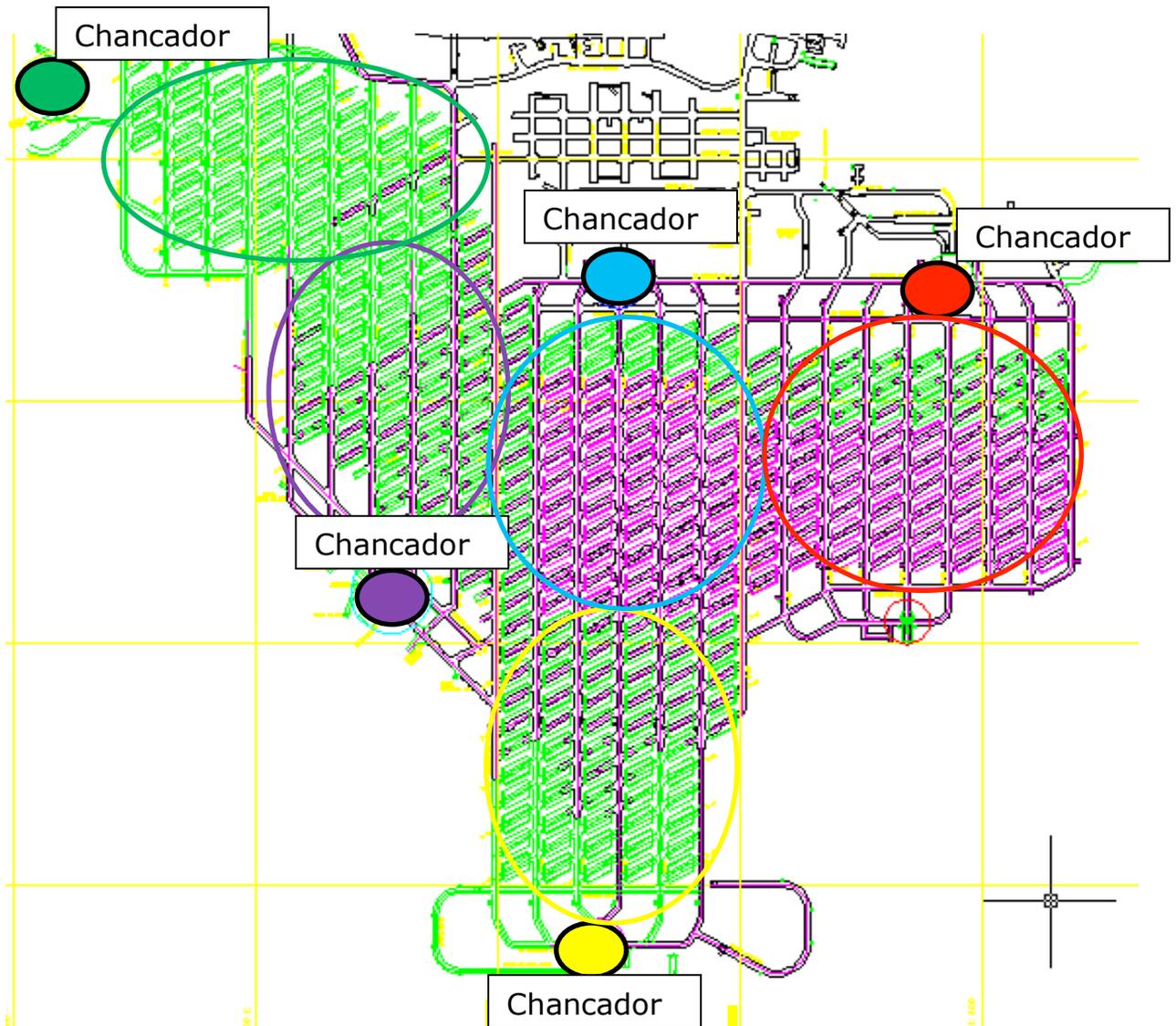


Figura 17. Asignación de sectores a los diferentes chancadores

3.3 Validación del modelo

A modo de calibración del modelo generado en UDESS se genera un plan base, intentando replicar en tonelaje los planes obtenidos por el equipo de planificación de la mina en estudio. Esto se hace para poder validar los resultados posteriores de los ejercicios que se desean realizar incorporando la variabilidad.

Sin esta etapa de validación del modelo, todos los resultados obtenidos posteriormente serían cuestionables, lo que transforma a esta etapa en parte fundamental de la metodología.

3.4 Ejecución de ejercicios

Una vez que se tiene validado el modelo, y como ya tenemos los escenarios de velocidades de extracción, se deben aplicar las coberturas en la obtención de los planes frente a los diferentes escenarios.

Las coberturas que se aplicaran serán la variación de la cantidad de puntos a incorporar por periodo. Partiendo desde el caso base, y disminuyendo siete, cinco y tres puntos por periodo y aumentando 3 y 5 por unidad de tiempo.

3.4.1 Comparación de ejercicios

Es importante destacar que los resultados de cada uno de los ejercicios realizados son comparables gracias a que se respeta siempre la misma secuencia de incorporación de puntos, por lo tanto no estoy recurriendo a puntos con mayor valor económico, lo que podría contaminar los resultados.

3.4.2 Valorización de ejercicios

De la aplicación de cada cobertura sobre cada uno de los escenarios, se obtendrá un plan, el cual será valorizado mediante la forma tradicional (flujo de caja), y se obtendrá un VAN.

3.4.3 Calculo de confiabilidad

Para el cálculo de la confiabilidad se debe definir en primer lugar cual será nuestro objetivo, y en este caso serán los tonelajes obtenidos en el caso base. Ya que estos tonelajes son los prometidos en los planes a largo plazo.

Con el tonelaje objetivo definido, y para poder obtener resultados razonables, dada la naturaleza de la herramienta de optimización que admite una diferencia entre el valor encontrado y el valor objetivo optimo, se decide tolerar una diferencia de un 5% entre el tonelaje logrado y el objetivo.

Lo anterior además se realiza porque si esto no se aplicase, existirían muchos planes que serían considerados que no cumplen con el objetivo debido a una diferencia en la convergencia de la herramienta de optimización.

3.5 Métricas de evaluación de coberturas

Para realizar la evaluación de las coberturas se recurren a métricas de evaluación de estas tales como:

- Comportamiento de las distribuciones de VAN.
- VAN esperado para cada cobertura
- Inversiones actualizadas
- Confiabilidad

Y como metodología de valorización de la cobertura en sí, se tomaran las opciones reales resueltas por el modelo binomial, donde a partir de la confiabilidad se obtienen las probabilidades de los casos positivos y negativos.

4 Caso de estudio

A continuación se presentara el caso de estudio para efectos de esta sección y las siguientes, se utilizara la siguiente nomenclatura.

Durante el análisis de resultados se utilizara la siguiente nomenclatura para facilitar el entendimiento, y la referencia a estos:

Caso -7: Caso incorporación siete puntos de extracción menos que caso base por periodo.

Caso -5: Caso incorporación cinco puntos de extracción menos que caso base por periodo.

Caso -3: Caso incorporación tres puntos de extracción menos que caso base por periodo.

Caso base: Caso base.

Caso -3: Caso incorporación tres puntos de extracción más que caso base por periodo.

Caso -5: Caso incorporación cinco puntos de extracción más que caso base por periodo.

Para este caso de estudio se utilizó información real obtenida en la operación, por lo que se procederá a exponer los valores de esta información y que fueron considerados en la construcción de este trabajo.

Se expondran los planos utilizados, los costos y rendimientos utilizados, ademas de flotas de equipos, sus disponibilidades y las restricciones para las velocidades de extraccion.

4.1 Planos de diseño sector

Se presentan los planos de diseños del sector de la mina a estudiar, con los cuales se realizara el secuenciamiento de las preparaciones mineras.

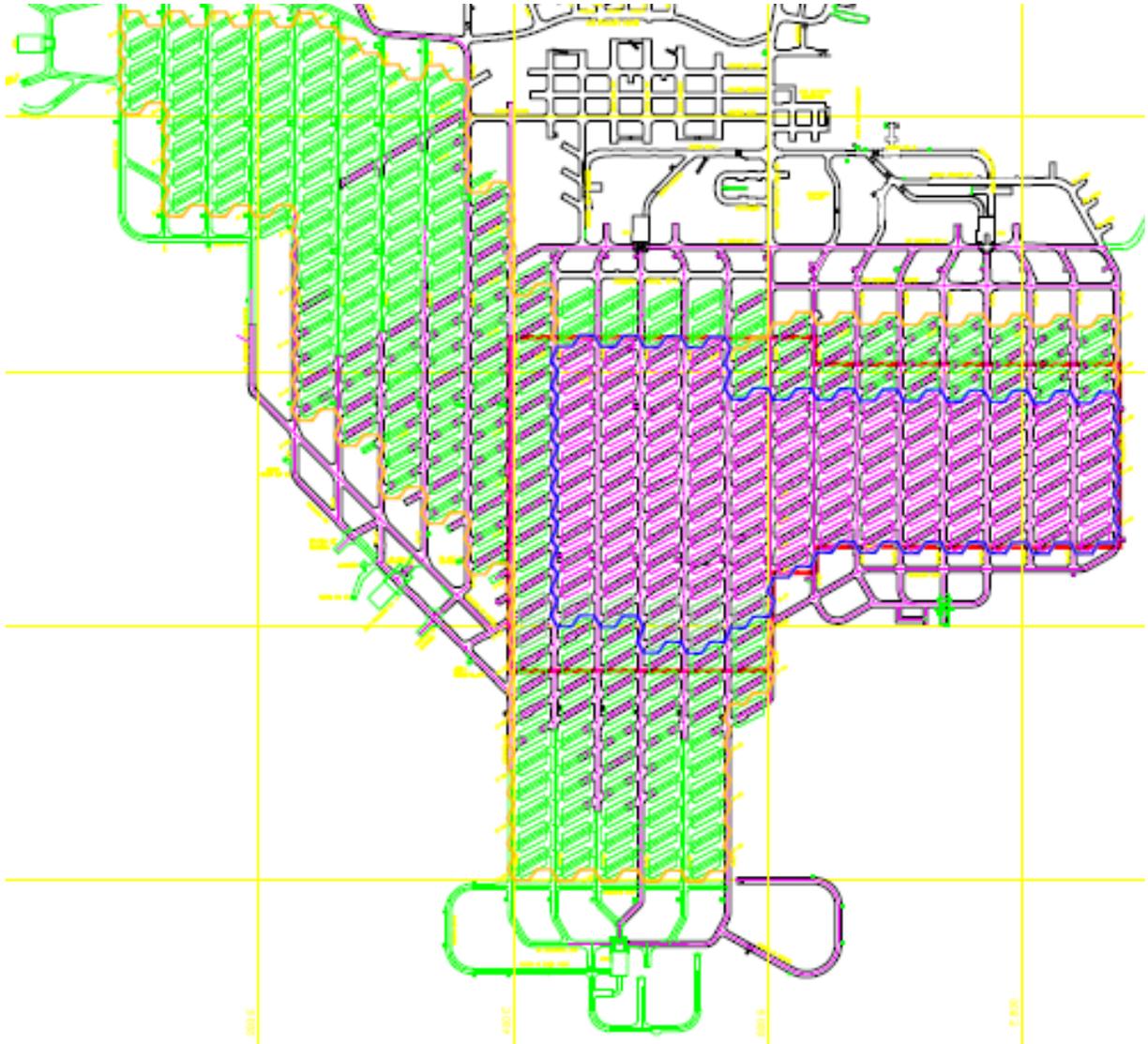


Figura 18. Nivel de producción para el caso de estudio

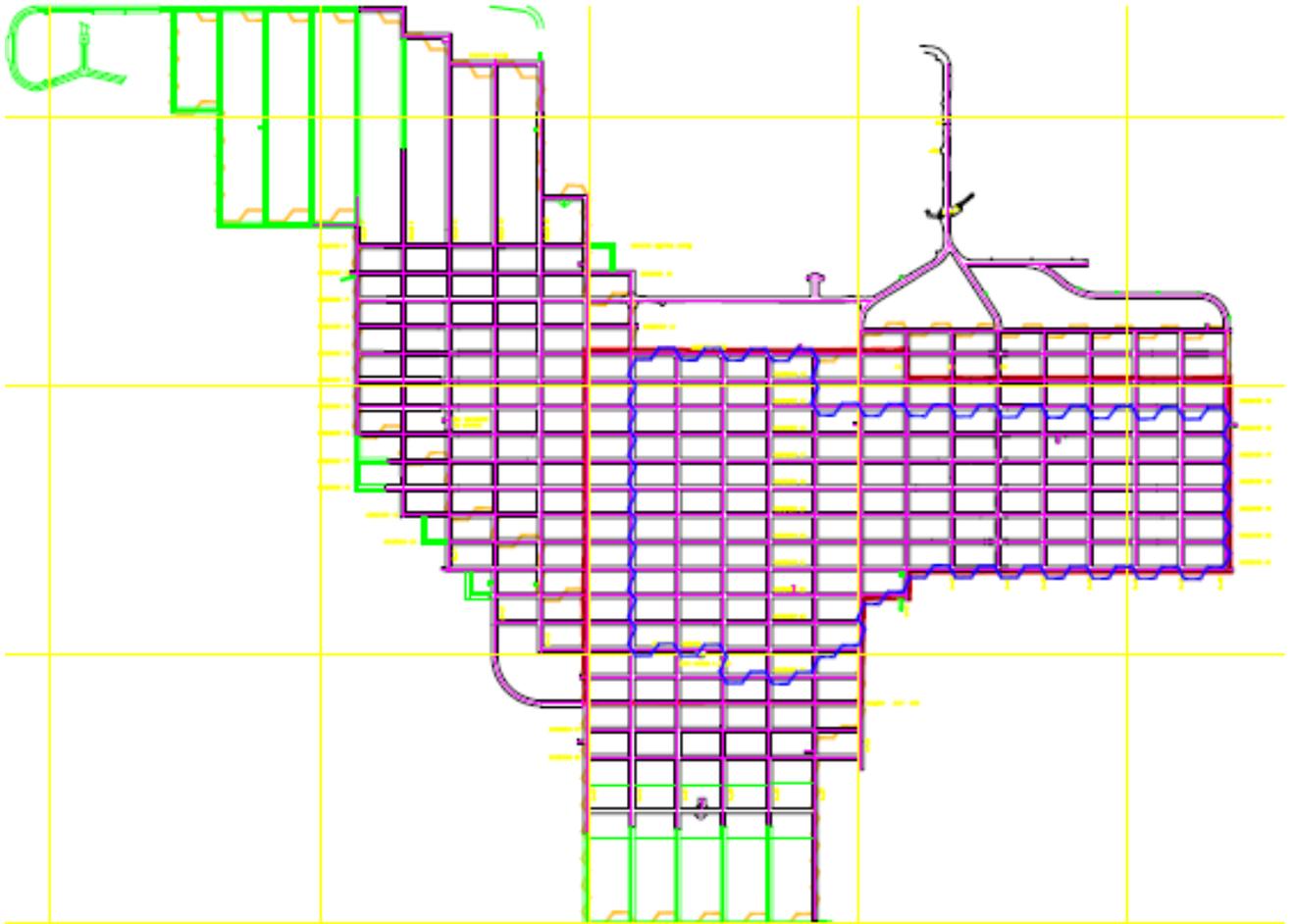


Figura 19. Plano de diseño nivel de hundimiento caso de estudio.

Junto con los planos del sector se exponen las distancias permisibles para la variante del metodo de explotacion aplicadas en en este sector en particular, Tabla 3, podemos notar que no todas son distancias fijas, lo que no es particularmente util, ya que al generar las precedencias, no siempre tendremos actividades a una distancia fija para todas, por lo que estos rango resulta ser beneficioso para el modelamiento del caso de estudio.

Distancia	Distancia permisible[m]
D1	35-70
D2	60
D3	35

Tabla 3. Distancias permisibles para el sector

4.2 Parámetros de Entrada

Los parámetros de entrada para este trabajo fueron todos proporcionados por los planificadores del caso a estudiar. Ya que son estos los parámetros actuales que ellos utilizan para poder realizar sus planes por lo que el análisis de su valores escapan del contexto del trabajo desarrollado.

4.3 Flotas de equipos

La flota de equipos se presenta a continuación, la cual es variable en el tiempo, debido a que la compra de estos se realiza en forma progresiva, además se toma como base lo real, y en conjunto con esto se presentan las flotas de equipos asociadas a cada una de las opciones que se tomaran más adelante.

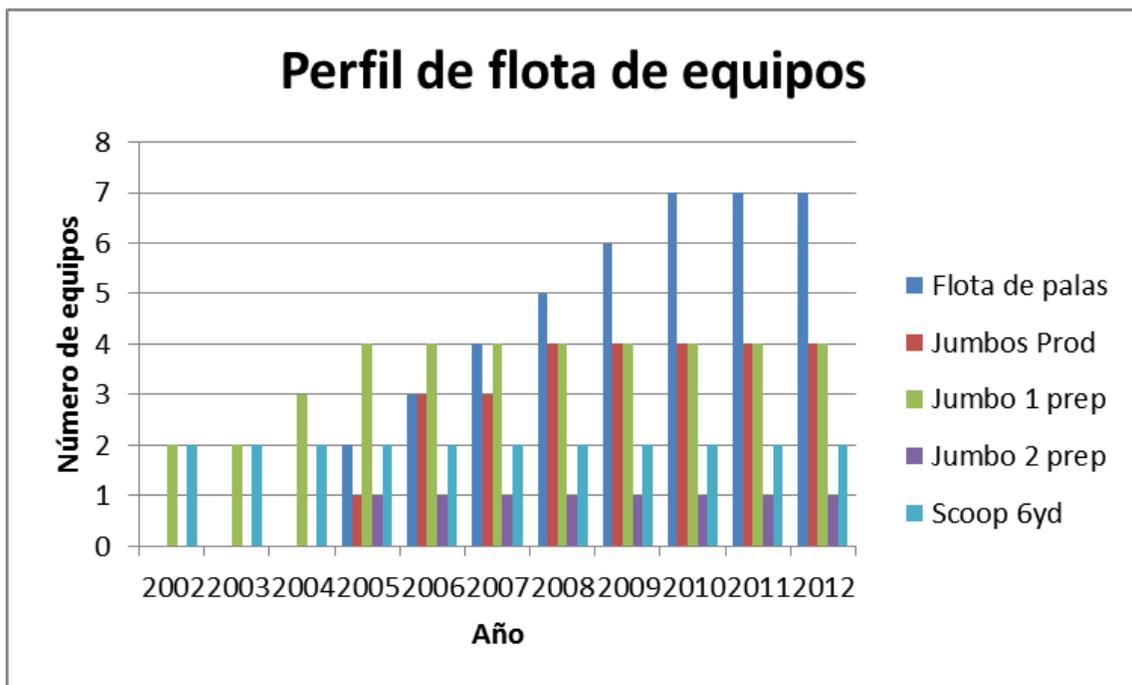


Gráfico 1. Flota de equipos utilizada en opciones caso teniente y -3 puntos por periodo.

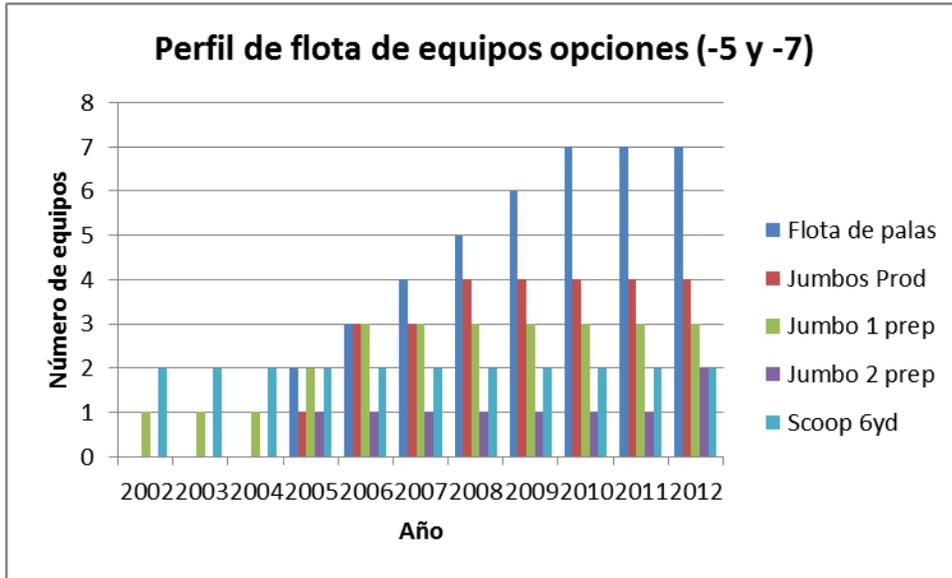


Gráfico 2. Flota de equipos utilizada para las opciones -5 y -7 puntos por periodo.

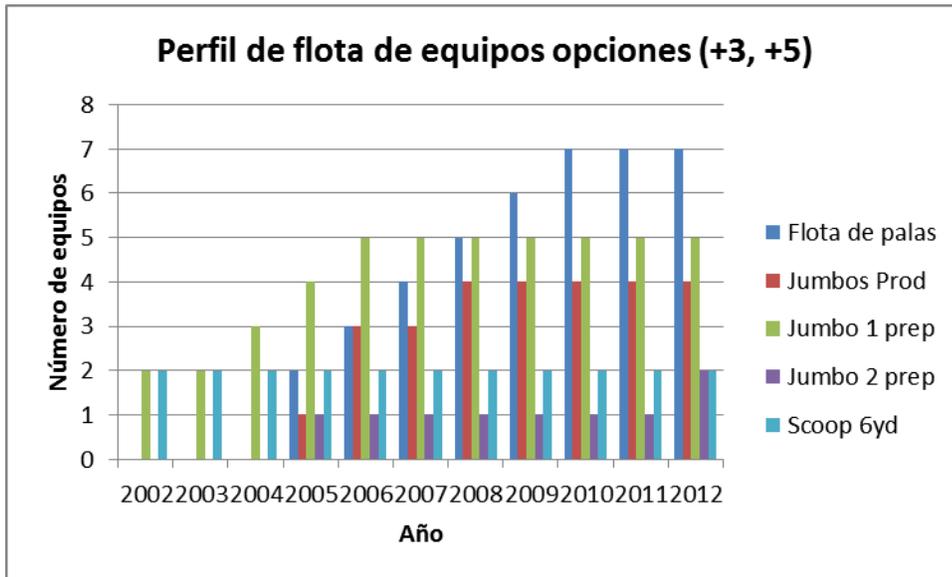


Gráfico 3. Flota de equipos utilizada para las opciones +3 y +5, puntos por periodo.

4.4 Disponibilidades

Las disponibilidades utilizadas para los equipos en el caso de estudio fueron obtenidas desde la faena donde aplica el caso de estudio. Estas disponibilidades son presentadas en la Tabla 4

Equipo	Disponibilidad[%]
Palas preparación	75
Jumbos 1 brazo preparación	65
Jumbos 2 brazos preparación	70
Palas producción	77
Jumbos producción	60

Tabla 4. Disponibilidad promedio de los equipos en el sector

4.5 Rendimientos

Los rendimientos en este caso solo nos referiremos a los de las preparaciones ya que para la limitación de la extracción usaremos las velocidades de extracción que se detallan más adelante.

4.5.1 Rendimientos preparaciones mineras

Para estos casos se considerara un único rendimiento generalizado ya que las diferencias entre las secciones de galerías y sus rendimientos eran ínfimos, y en la operación terminan siendo iguales por la realidad de esta. La estimación de la construcción de un punto de extracción se realiza a partir del tiempo que se demoran en construir la unidad y el largo de esta solamente ya que no se tiene la información por metro si no que por unidad, los valores para estos rendimientos se presentan en la Tabla 5.

Actividad	Rendimiento [m/mes]
Construcción Galerías	45
Construcción de Galerías que son precedentes de actividades suprimidas	40
Construcción puntos de extracción	12

Tabla 5. Rendimientos de avance en galerías.

4.6 Costos

Los costos de las actividades constructivas serán presentados por metro para cada una de las que aquí fueron evaluadas en la Tabla 6.

Desarrollos Horizontales	Unidades	Costo
Desarrollo 4,0 x 4,0 P-M UCL	m	2,941
Desarrollo 4,7 x 4,1 P-M UCL	m	3,823
Desarrollo de calles 5,0 x 4,3 PMS NP	m	4,723
Desarrollo 4,7 x 4,32 (calles-zanjas) PMS NP	m	4,453
Desarrollo 4,5 x 4,0 PMS (conexiones zanjas) NP	m	4,471
Desarrollo 5,2x4,32 accesos PMS NP	m	4,870
Carpeta de Rodado NP	m	1,588
Piso Punto de Extracción NP	m	1,588
Punto de Extracción (incluye aspersores) NP	U	27,362
Fortificación Pilar (con cable tipo 2) NP	U	3,960
Fortificación Visera Punto Extracción NP	U	2,677

Tabla 6. Costos de construcción de las diferentes actividades de preparación.

Es importante destacar que no se consideraron las fortificaciones como una actividad explícita, si se consideraron como una suma a las carpetas de rodado que se van construyendo detrás de esta.

4.7 Parámetros de valorización de columnas

A continuación se presentan los parámetros con los cuales las columnas de extracción fueron valorizadas.

Precio cobre [US\$/lb]	2.8
Costo venta [US\$/lb]	0.32
Costo mina [US\$/t]	9.12
Costo planta [US\$/t]	8.62
Recuperación metalúrgica[%]	85
Recuperación minera[%]	80

Tabla 7. Parámetros técnicos económicos de valorización.

4.8 Velocidades de extracción

Las velocidades de extracción son un parámetro muy relevante dentro de la planificación estos valores son entregados por recomendaciones geomecánicas, y a continuación se detallaran en la Tabla 8, es pertinente explicar que la notación es por porcentaje de columna extraíble, la columna extraíble viene detallada para cada uno de los puntos en el modelo de columnas entregado por la división, se debe tener solo una excepción a estas velocidades que es cuando la altura de columna de roca primaria que se ha extraído es más de 80 metros el punto queda liberado, si no se siguen la velocidades presentadas a continuación.

Velocidades de extracción	
Rango	Ton/m²dia
0-5%	0.37
5%-10%	0.43
10%-15%	0.46
15%-20%	0.54
20%-25%	0.61
25%-30%	0.68
>30%(liberado)	0.75

Tabla 8. Velocidades de extracción máximas recomendadas por geomecánica

5 Resultados caso de estudio

La primera de las corridas realizada para el modelo se ejecutó con los datos de la incorporación de área proporcionados por la mina en estudio (ver anexo A), y con esto se desarrolló el caso base de comparación en donde podemos ver los que se esperaría al realizar la planificación. Además la comparación de estos resultados con los obtenidos por el grupo de planificación del caso de estudio, válida la herramienta es la apropiada para realizar este trabajo.

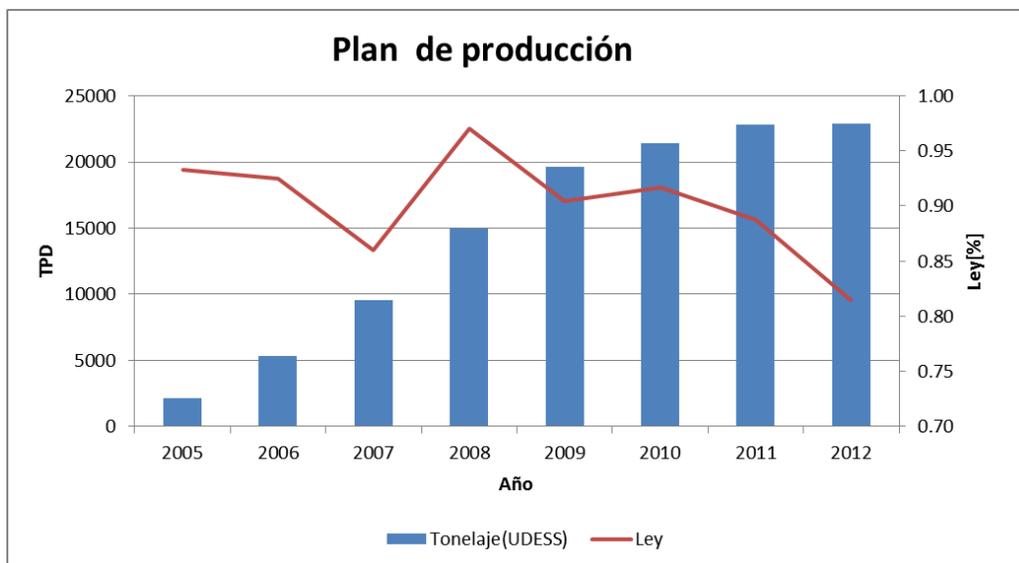


Figura 20. Plan de producción caso base

Podemos observar del caso base que se alcance el régimen en el séptimo año, lo cual es esperable por la velocidad de incorporación de área impuesta. Además como podemos observar en la Figura 21, las diferencias obtenidas de resultado de la planificación mediante la herramienta UDESS, y lo prometido por el equipo de planificación no están muy alejados, lo que confirma que UDESS es una buena herramienta para realizar este tipo de planificación, por lo que resulta adecuada para el propósito de este trabajo de título, ya que realiza planes que se ajustan de buena forma a lo esperado y además realiza en conjunto el agendamiento del mineral y de las preparaciones mineras y con esto entrega un plan de extracción de mineral, que realmente se puede llevar a cabo.

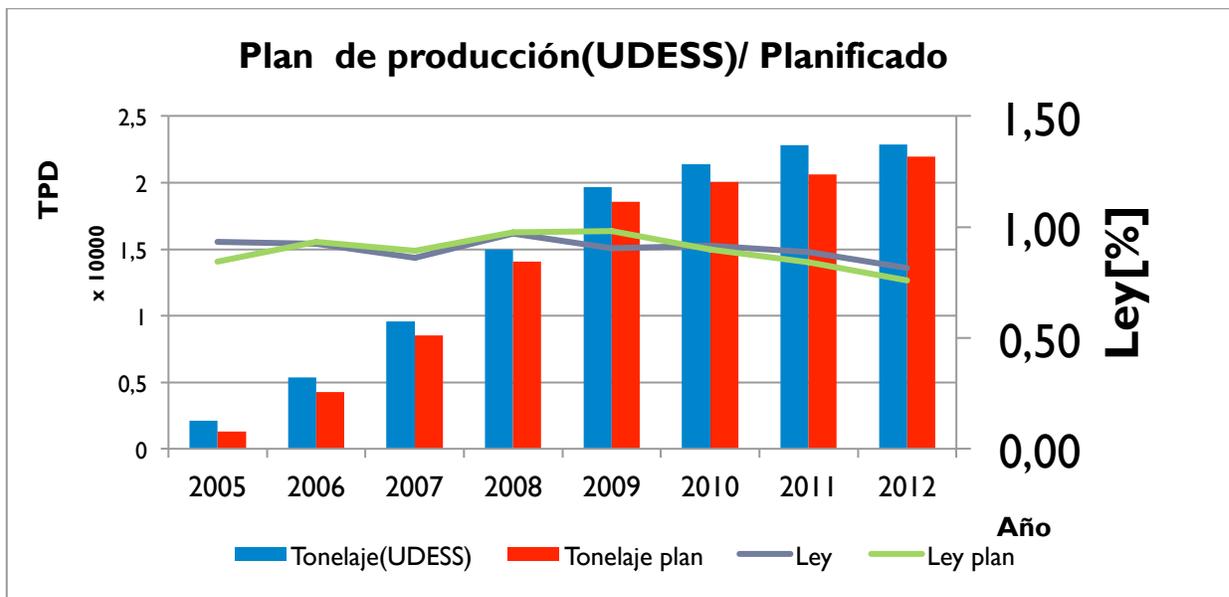


Figura 21. Comparación de planes de producción base (grupo de planificación)/UDESS

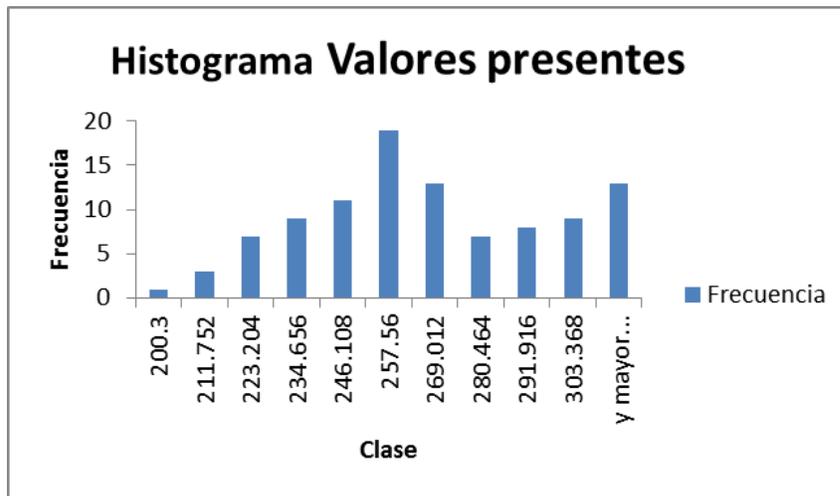
El valor presente neto para este plan se presenta en la siguiente tabla.

Valor presente neto plan base [MUSD]
357

Tabla 9. VAN plan base (caso determinístico)

5.1 Ejercicio de incorporación de puntos de extracción base

En este caso se utiliza la misma data usada para el caso del plan base, en la incorporación de área, solo se va variando para cada corrida las velocidades de extracción de los punto en base a los escenarios generados, los resultados que se presentan a continuación representan la distribución de valor presente neto de cada uno de los 100 planes obtenidos con cada uno de los escenarios de velocidades de extracción, para este caso de incorporación de área. Es importante resaltar que todos los VAN calculados y expuestos en este trabajo tienen incorporados las inversiones en equipos, y aumento en las inversiones por adelanto de obras en las preparaciones.



Histograma 3. Valores presentes netos caso de incorporación de área.

La inversión por periodo requerida para poder respaldar los planes que se realizaron, se presentan a continuación.

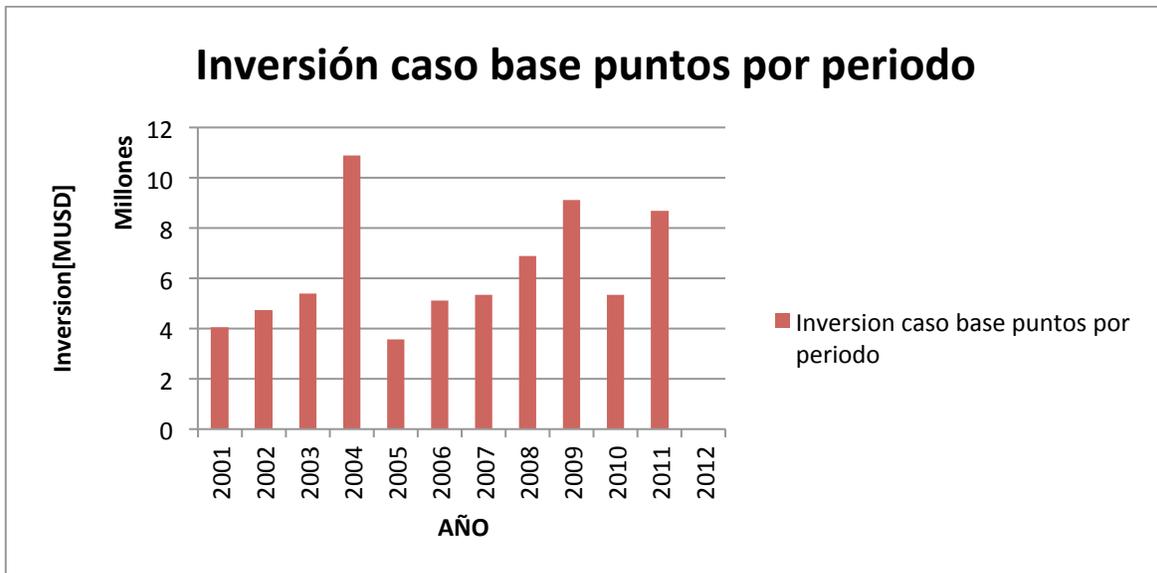


Figura 22 Grafico de inversiones para caso de siete puntos menos por periodo

Cabe señalar que se considera inversión los gastos en la construcción de puntos de extracción, calles, zanjas, carpetas de rodado etc. El comportamiento en los años en producción depende directamente de la cantidad de puntos de extracción a abrir por periodo.

Además en la Tabla 10, podemos observar un resumen de los valores importantes a observar.

VAN esperado [MUS\$]	261
Min. VAN [MUS\$]	200.3
Max. VAN [MUS\$]	314.3

Tabla 10. Principales estadísticas caso incorporación de puntos de extracción base

Además podemos observar los diferentes planes de producción para todos los casos analizados.

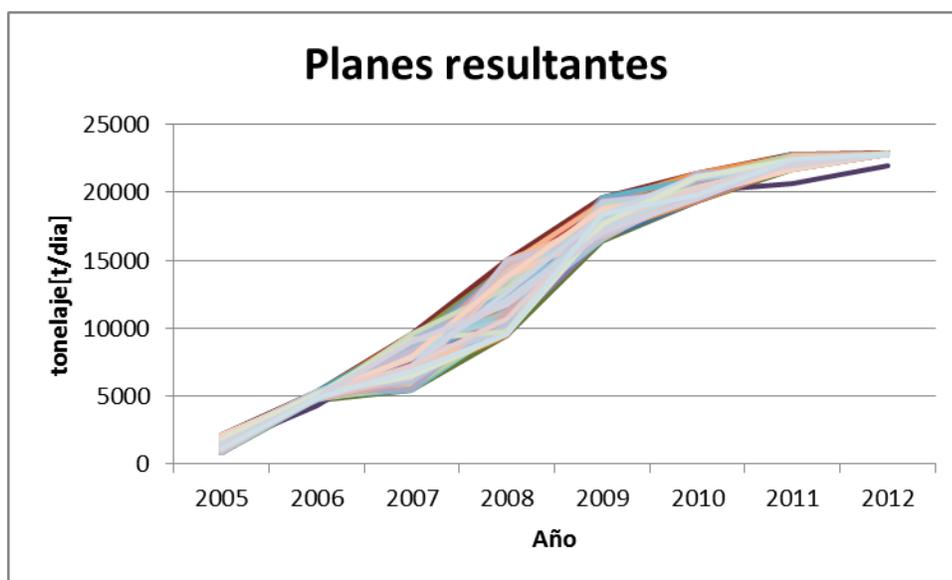
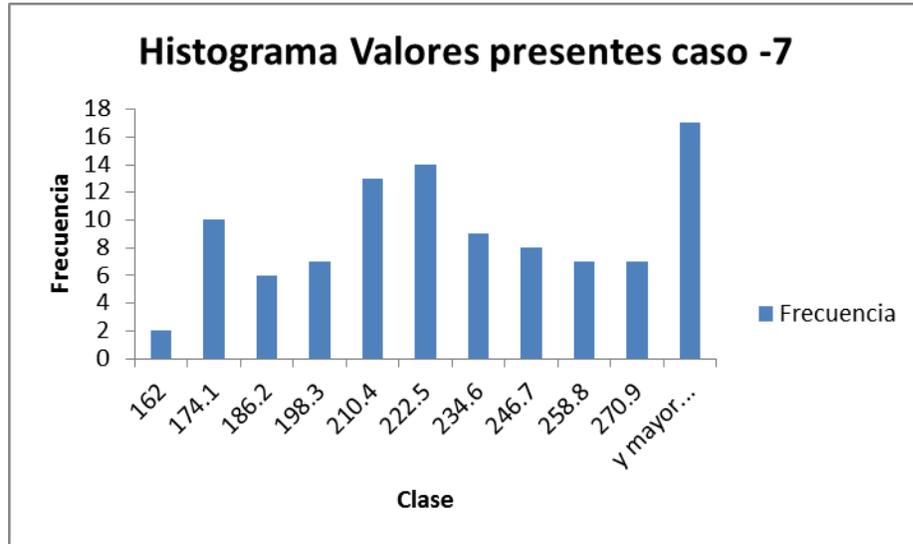


Figura 23. Planes de producción para todos los escenarios

Observamos que el comportamiento es el esperado, ya que son muy similares al plan original, y vemos una dispersión esperada dada la variación de la velocidad de extracción de los puntos.

5.2 Ejercicio de incorporación con siete puntos de extracción menos que caso base por periodo

Para los siguientes resultados se varió la incorporación de área de cada uno de los periodos disminuyéndola en siete puntos de extracción por periodo, manteniendo todos los mismos escenarios.



Histograma 4. Valores presentes netos caso de incorporar 7 puntos menos por periodo

Además se presenta la distribución de inversiones para este caso.

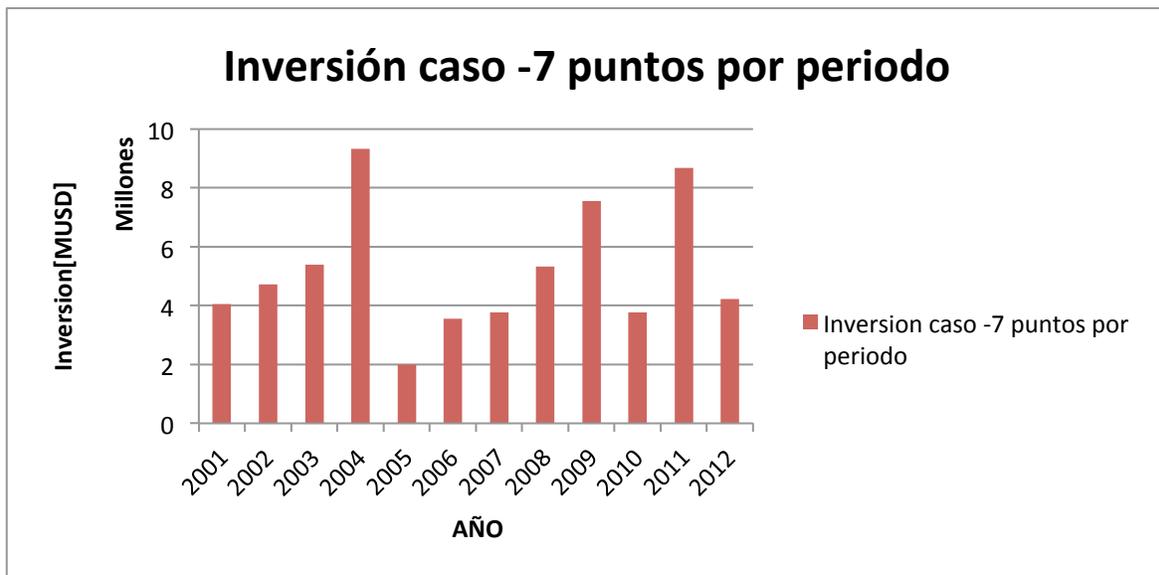


Figura 24 Grafico de inversiones para caso de siete puntos menos por periodo

A partir gráfico de inversiones para este caso se ve cómo se aplazan algunas inversiones en los años donde se inicia la producción, debido al cambio de estrategia de apertura de puntos.

Además se observa del histograma de valores presentes netos para cada uno de los escenarios estudiados, una distribución extensa, es decir, que presenta una gran variabilidad, y además una concentración alrededor de los 223 MUSD.

VAN esperado [MUS\$]	223
Min. VAN [MUS\$]	164
Max. VAN [MUS\$]	281.4

Tabla 11. Principales estadísticas caso incorporación con siete puntos de extracción menos.

La disminución en el VAN máximo, mínimo y esperado, se debe a la mayor variabilidad en la alimentación a planta, lo que conlleva a una menor producción de finos por parte de algunos escenarios de velocidad de extracción, teniendo como resultado un aumento en los escenarios con menor VAN.

Observamos sus respectivos planes asociados, para cada una de las corridas con los diferentes escenarios de velocidades de extracción.

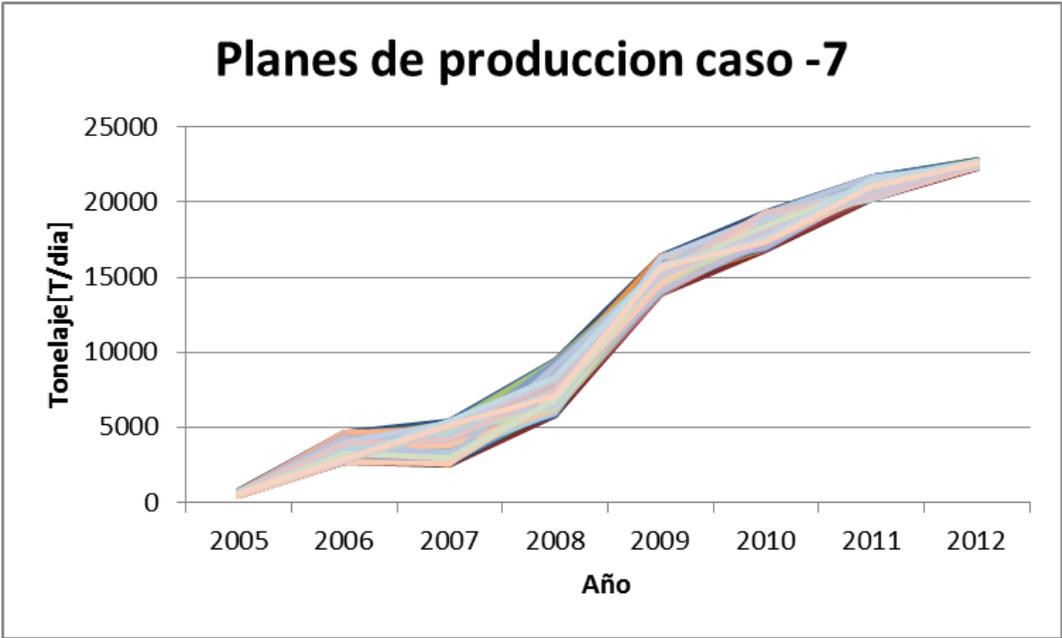
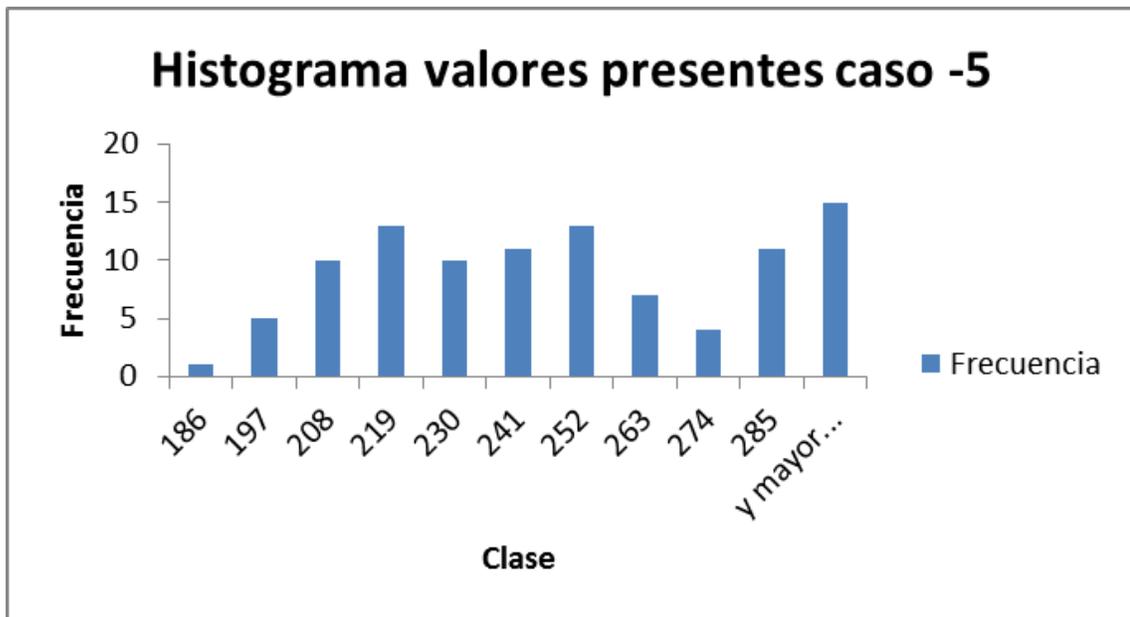


Figura 25. Planes de producción para todos los escenarios

El comportamiento es el esperado de los planes al igual que en el caso base, pero se observa una leve disminución en los tonelajes sobre todo en los años intermedios, esto se debe a la menor cantidad de puntos disponibles para la extracción.

5.3 Caso de incorporación con cinco puntos de extracción menos que caso base por periodo

Al igual que en el caso anterior la variación para el siguiente estudio, consta solamente de una disminución en cinco puntos de extracción abiertos por periodo, y contrarrestándolos con los 100 mismos escenarios. En el histograma podemos observar la distribución de los valores presentes netos para esta situación.



Histograma 5 valores presentes caso -5

La inversión por periodo requerida para poder respaldar los planes que se realizaron, se presentan a continuación.

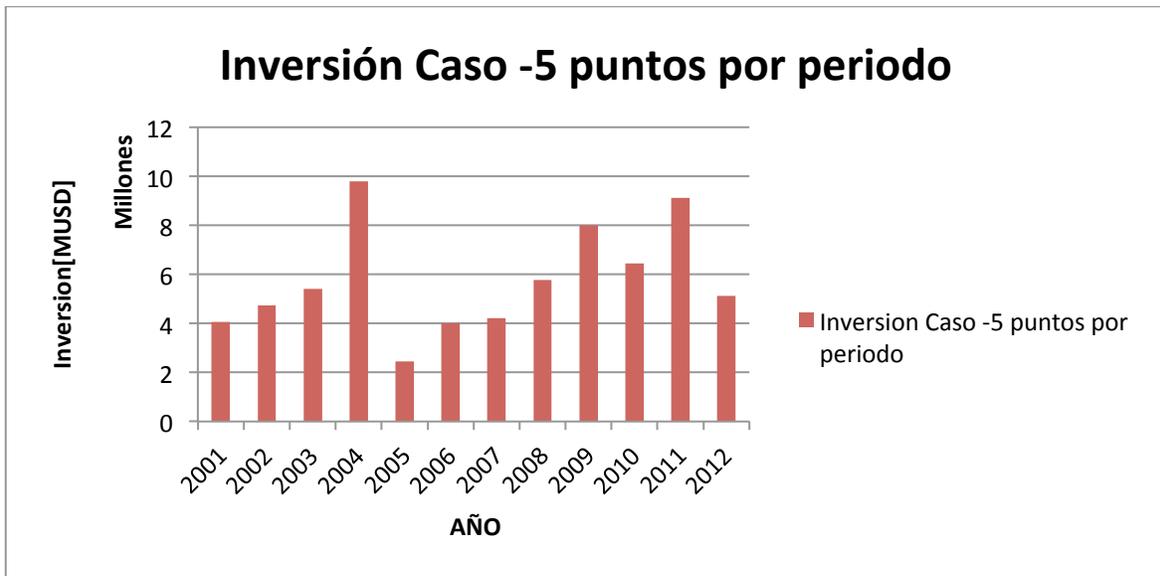


Figura 26 Grafico de inversiones para caso de cinco puntos menos por periodo

Desde el histograma de valores presentes, se observa que la distribución ha sufrido un movimiento hacia la derecha, lo que indica un aumento en sus valores, lo que se ve reflejado en la siguiente tabla que nos resume las principales estadísticas del histograma anterior.

VAN esperado [MUS\$]	243
Min. VAN [MUS\$]	186
Max. VAN [MUS\$]	295

Tabla 12. Principales estadísticas caso incorporación con siete puntos de extracción menos

El comportamiento es el esperado ya que se observa un aumento tanto en el mínimo, máximo y en el VAN esperado, con respecto al caso anterior, el cual presenta una menor incorporación de área por periodo, además

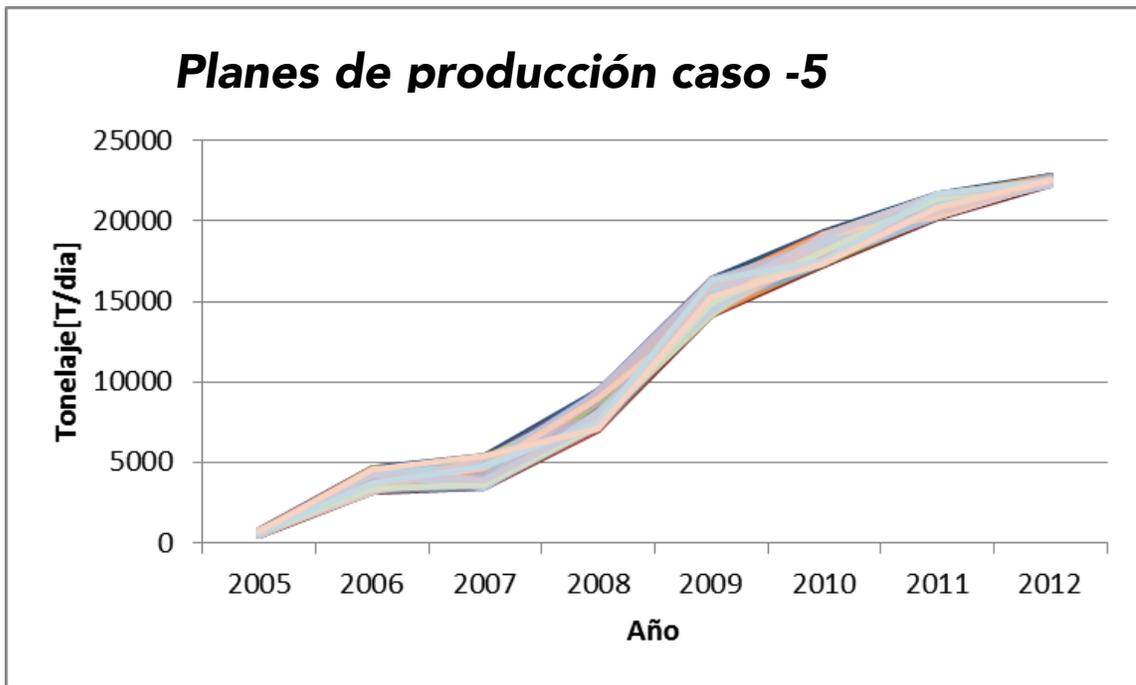
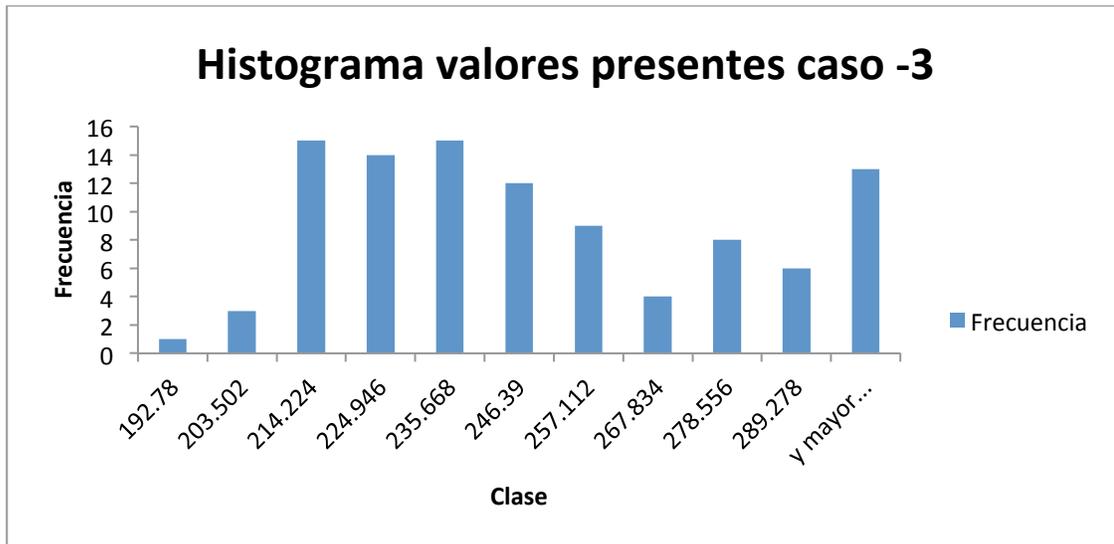


Figura 27. Planes de producción para todos los escenarios

Los planes en tendencia son los esperados ya que presentan una variabilidad menor que los planes del caso anterior, además se observa que aumenta el cumplimiento de lo que se prometida en plan base, con respecto al caso de siete punto menos por periodo.

5.4 Ejercicio incorporación con tres puntos de extracción menos que caso base por periodo

Para este caso se realizaron los planes de producción quitando tres puntos de extracción por periodo con respecto al caso base, en el siguiente histograma podemos observar la distribución de los valores presentes netos, para esta ocasión.



Histograma 6 valores presentes caso -5

La inversión por periodo requerida para poder respaldar los planes que se realizaron, se presentan a continuación.

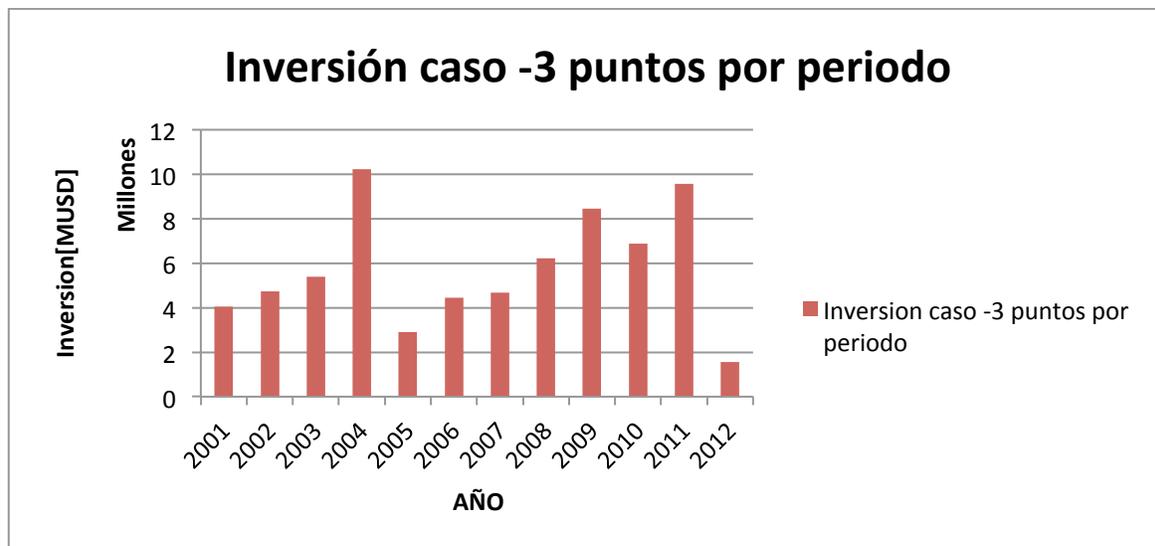


Figura 28 Grafico de inversiones para caso de tres puntos menos por periodo

Se puede observar un leve aumento en los valores presentes, aunque esto queda aún más claro con la siguiente tabla donde se resumen las principales estadísticas para este caso.

VAN esperado [MUS\$]	255
Min. VAN [MUS\$]	192
Max. VAN [MUS\$]	300

Tabla 13. Principales estadísticas caso incorporación con siete puntos de extracción menos

El aumento en el máximo, mínimo y VAN esperado, se debe a que se puede cumplir en una mayor cantidad de los casos con la alimentación a la planta, ya que se dispone de más puntos los cuales suplen la carencia de mineral por las variaciones de velocidades máximas de extracción.

A continuación se presentan los planes de producción para este caso.

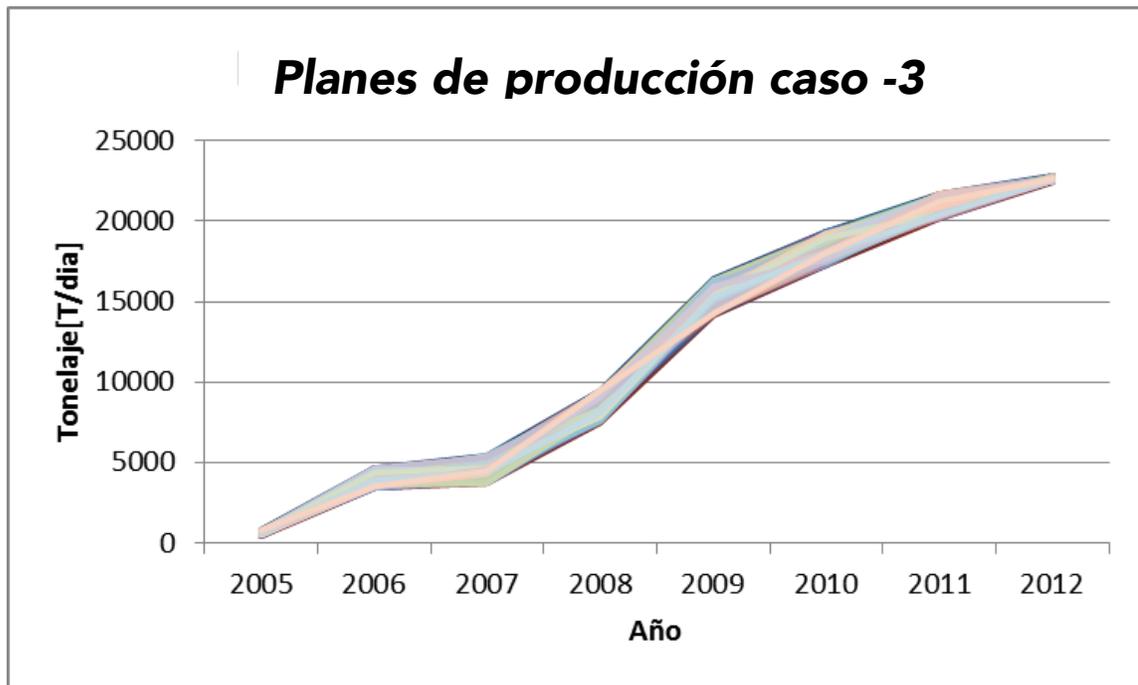
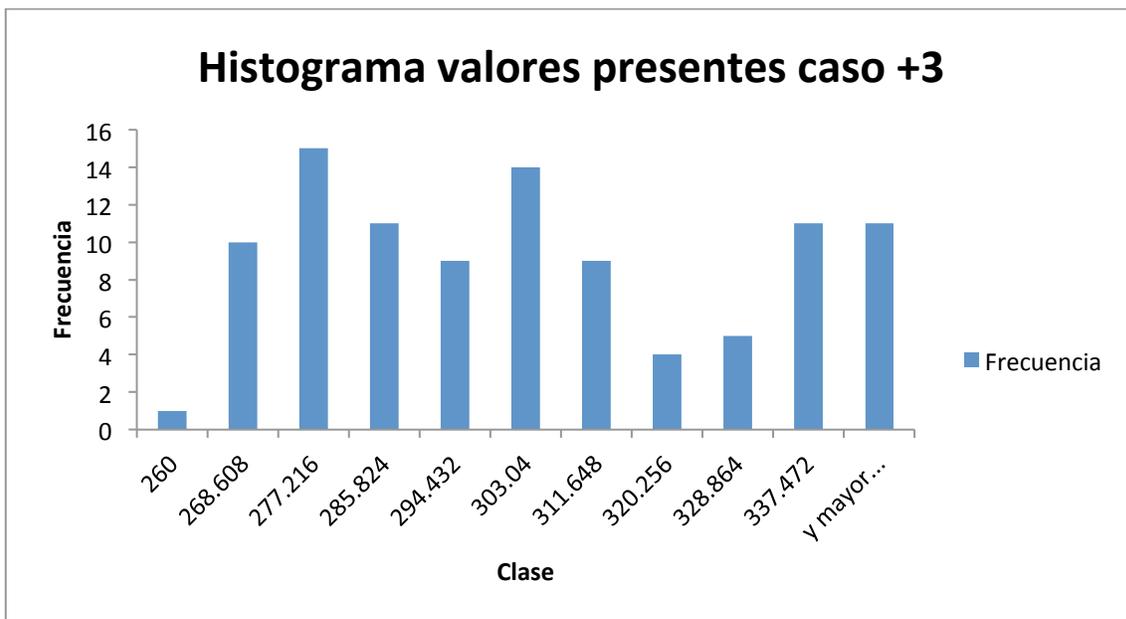


Figura 29. Planes de producción para todos los escenarios

Los planes se comportan de la manera deseada, y además se puede observar que tienen una menor variabilidad que los casos anteriores, y presentan un mejor cumplimiento de las metas productivas.

5.5 Ejercicio de incorporación con tres puntos de extracción más que caso base por periodo

Para la siguiente situación, se plantea la realización de los planes mediante una apertura de puntos de extracción mayor por periodo, que para esta ocasión se sitúa en tres puntos extras por periodo en relación al caso base. A continuación podemos observar los VAN obtenidos para cada uno de estos planes de producción.



Histograma 7 valores presentes caso +3

La inversión por periodo requerida para poder respaldar los planes que se realizaron, se presentan a continuación.

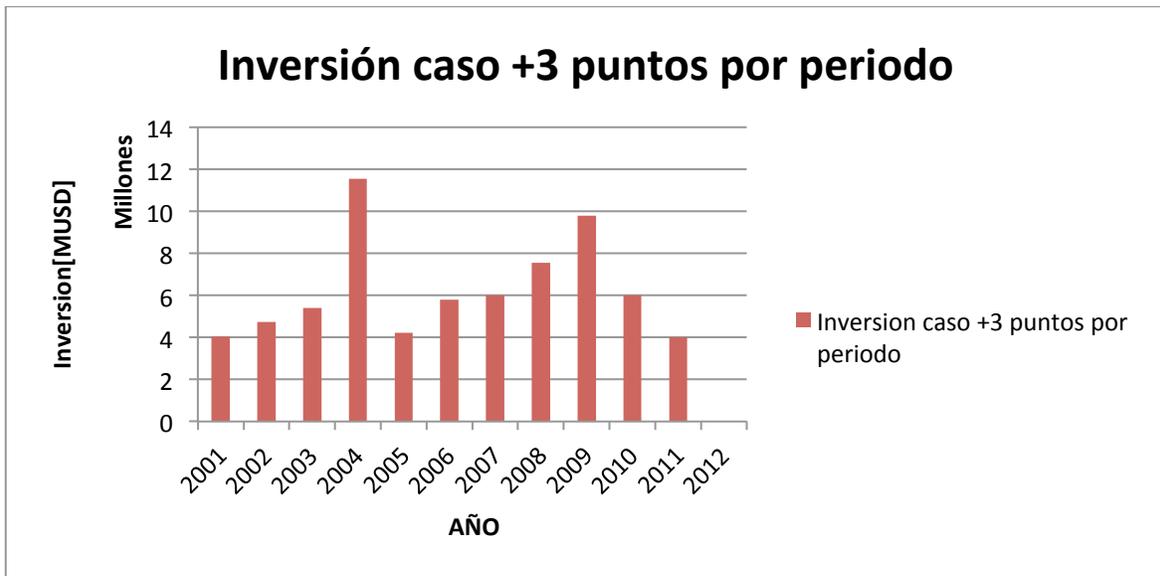


Figura 30 Grafico de inversiones para caso de tres puntos menos por periodo

Se observa un aumento con respecto al caso base en los valores actualizados netos, lo que se visualiza de mejor manera en la siguiente tabla resumen de las estadísticas principales.

VAN esperado [MUS\$]	299.6
Min. VAN [MUS\$]	260
Max. VAN [MUS\$]	346

Tabla 14. Principales estadísticas caso incorporación con siete puntos de extracción menos

Como se puede cuantificar desde la tabla anterior se tiene un aumento significativo en los valores mínimos, máximos y esperados del VAN, con respecto a los casos anteriores e inclusive al caso base.

En el siguiente grafico se presentan los planes de producción obtenidos en este caso.

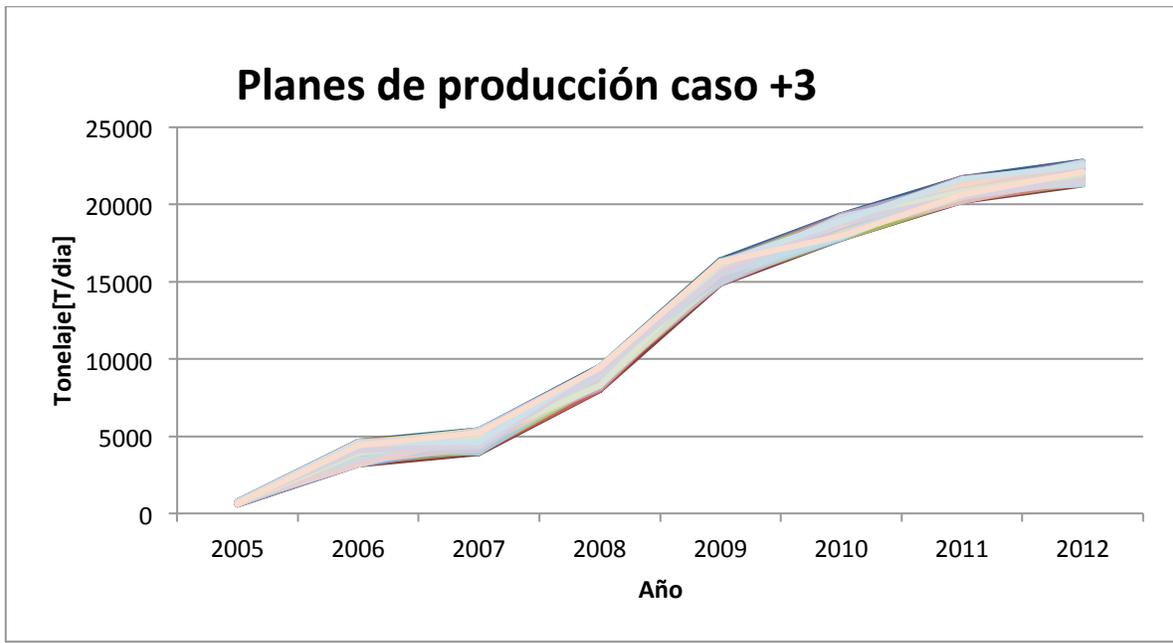
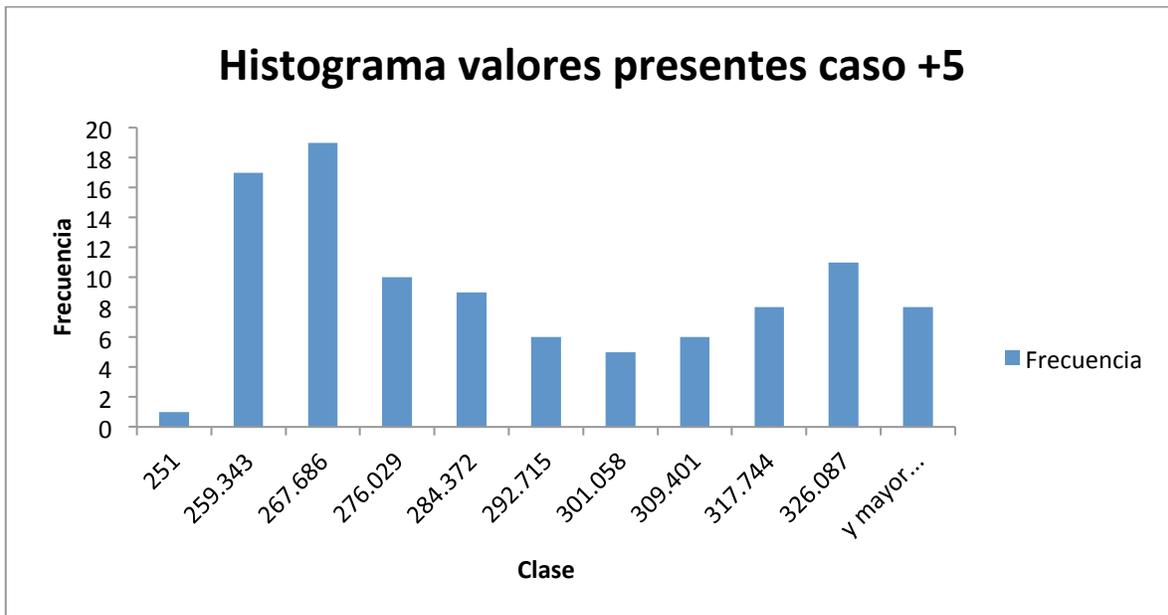


Figura 31. Planes de producción para todos los escenarios

Observamos una menor variabilidad que en todos los casos anteriores, lo cual es lo que se desea al tener mayor cantidad de puntos abiertos por periodo.

5.6 Ejercicio de incorporación con cinco puntos de extracción más que caso base por periodo

En este caso se obtendrán los planes con cinco puntos de extracción abiertos por periodo más que el caso base. En el siguiente histograma podemos observar la distribución de VAN para los planes obtenidos.



Histograma 8 valores presentes caso 5

La inversión por periodo requerida para poder respaldar los planes que se realizaron, se presentan a continuación.

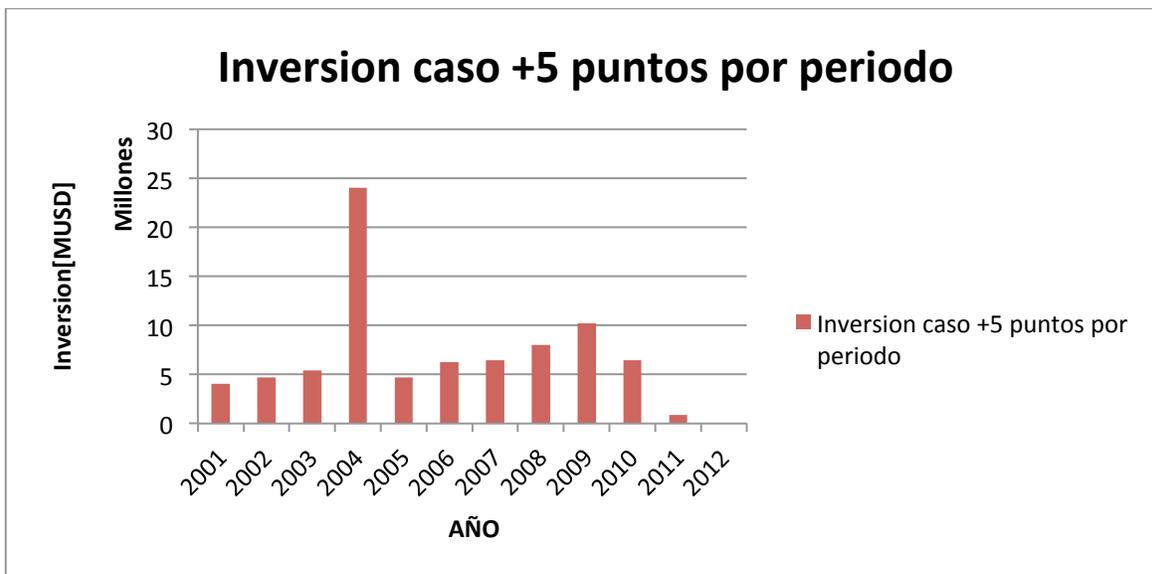


Figura 32 Grafico de inversiones para caso de tres puntos menos por periodo

Podemos ver la disminución del VAN mínimo, máximo y esperado con respecto al caso anterior, esto puede ser cuantificado fácilmente en la siguiente tabla.

VAN esperado [MUS\$]	286.6
Min. VAN [MUS\$]	251
Max. VAN [MUS\$]	335

Tabla 15. Principales estadísticas caso incorporación con siete puntos de extracción menos

La disminución de los valores máximos, mínimos y esperados, nos indica que es un buen momento para detenerse y no seguir probando con más casos.

A continuación se presenta los planes de producción obtenidos para este caso.

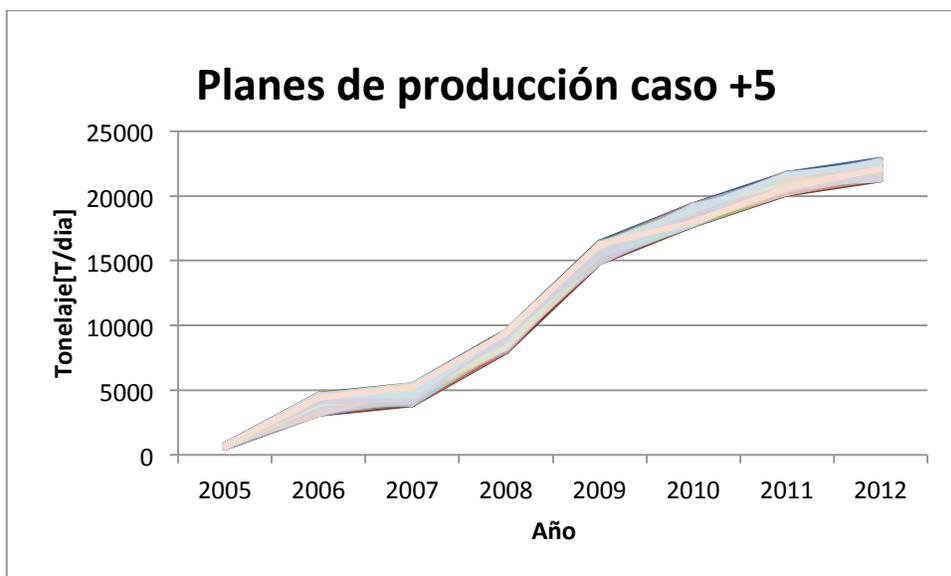


Figura 33. Planes de producción para todos los escenarios

Los planes obtenidos tienen la menor variabilidad de todos los obtenidos, básicamente por la misma razón que se dio para la disminución en cada uno de los casos anteriores, la mayor disponibilidad de puntos en cada uno de los periodos.

6 Análisis de Resultados

En el presente capítulo se dará a conocer el análisis de los resultados obtenidos tras aplicar la metodología de generación de planes, y su posterior evaluación para poder cuantificar el aumento de valor al considerar.

6.1 Análisis de secuencia de extracción en los planes de producción

El objetivo de este análisis es poder ver el comportamiento de la secuencia de extracción de los planes de producción obtenidos, si estos fuesen realizados con velocidades de extracción menores que las del plan original, pero siempre respetando la velocidad mínima entre la del escenario correspondiente en el plan de producción y la del análisis propuesto.

Se respeta la secuencia de extracción y secuencia de apertura de puntos para cada plan, y en el caso de que la velocidad sea menor que la que se utilizó realmente en el plan, el tonelaje restante se deja para el periodo siguiente.

Los resultados de esta comparación se presentan a continuación, en dos figuras en las cuales se compara la velocidad de extracción máxima, contra la confiabilidad y el van para cada uno de los casos y planes.

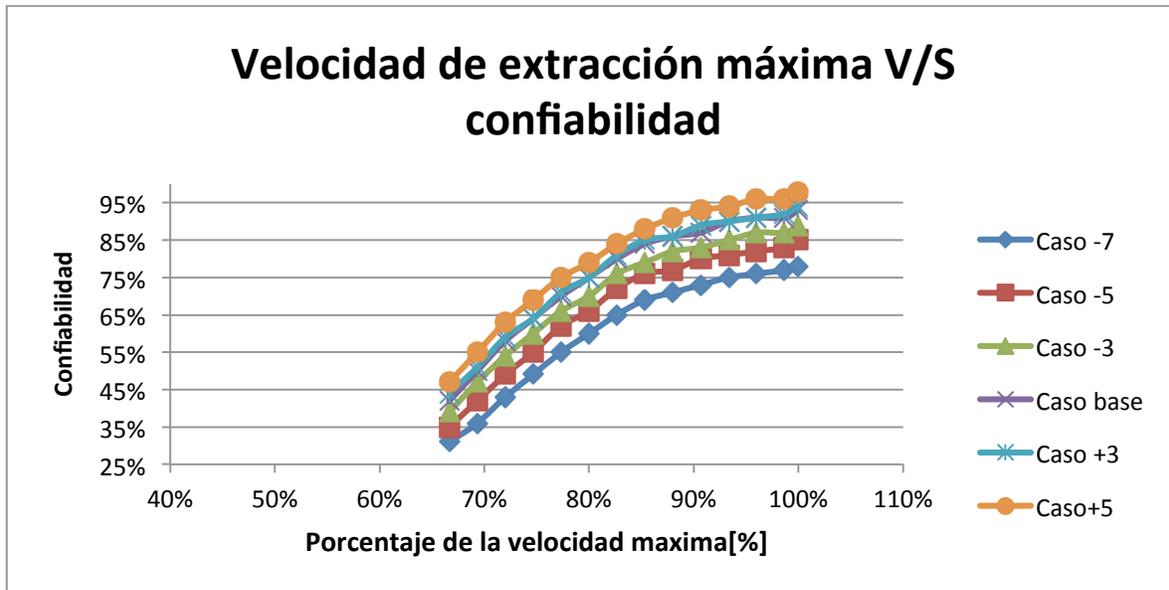
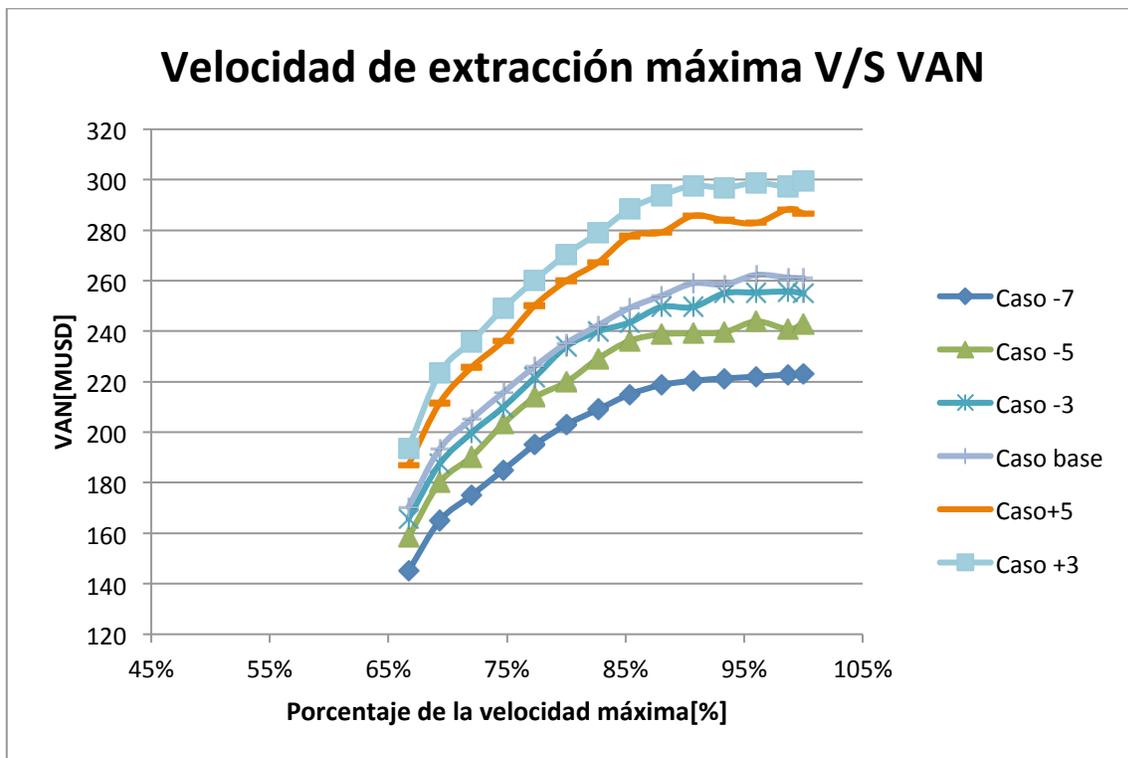


Figura 34. Gráfico velocidad de extracción máxima V/S confiabilidad



El porcentaje de la velocidad máxima representa la fracción de la velocidad máxima que se utiliza en la realización del plan base.

Observamos que mientras es menor la velocidad disminuye tanto el VAN como la confiabilidad, esto es esperable ya que nuestro punto de referencia para medir la confiabilidad es el plan original, ya que en caso contrario, debería tener un plan de referencia para cada velocidad a evaluar y no tendría sentido la comparación de estos parámetros ya que la métrica sería diferente. El comportamiento presentado se debe a que a menor velocidad máxima es más predominante esta restricción que los escenarios y por ende disminuye el VAN, y obviamente su confiabilidad cae ya que no pueden cumplir y en el caso extremo que la velocidad es la misma que la utilizada en la mina para la realización de sus planes tenemos el caso estudiado originalmente.

Otra cosa interesante de notar es que alrededor del 90% de la velocidad original, el impacto en el VAN y en la confiabilidad comienza a disminuir cada vez más, esto se debe a que alrededor de ese rango es donde se mueven una parte importante de las velocidades en los escenarios por lo que a estas velocidades se ven disminuidos los efectos de la menor velocidad de extracción.

6.2 Análisis de distribución de VAN obtenidos y métricas de inversión

Para iniciar el análisis de los resultados obtenidos, se estudiara las distribuciones VAN y sus estadísticas básicas obtenidas para cada uno de los casos estudiados, esto se presenta en resumen en el siguiente gráfico.

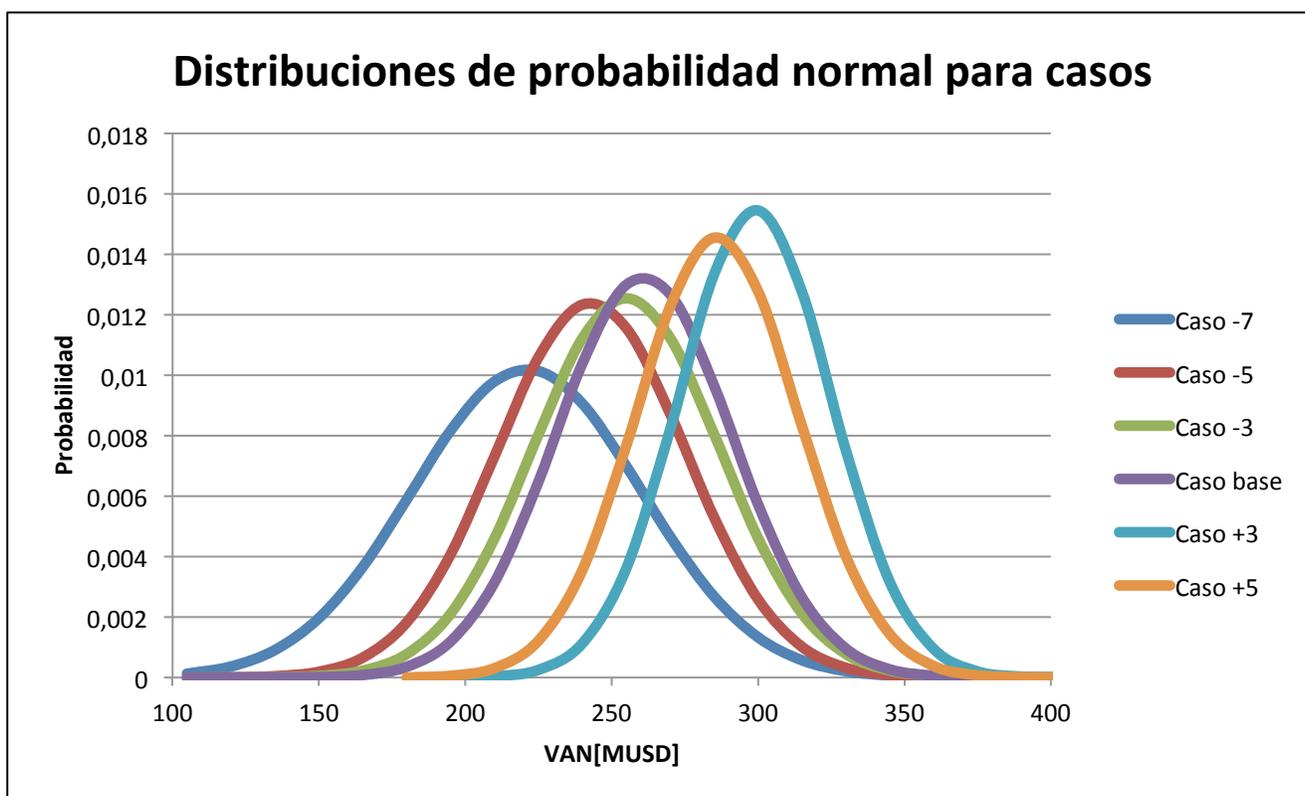


Figura 35. Ajuste de distribución normal a los resultados de VAN para cada caso.

Las distribuciones ajustadas en la Figura 30, fueron sometidas a los test tradicionales Kolmogorov Smirnov, Chi cuadrado y Anderson Darling, mediante el software Easyfit, en una versión estudiantil disponible en internet, y fueron las que mejor ajustaban para cada uno de los casos.

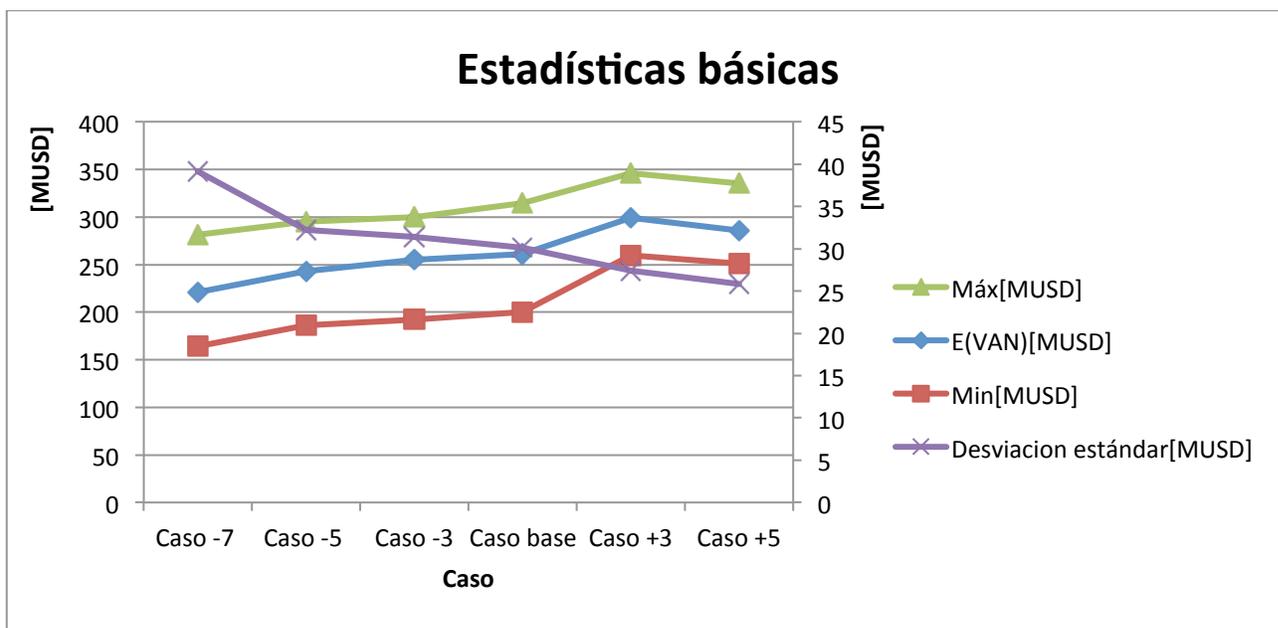


Figura 36. Estadísticas básicas

Se desprende de la figura anterior, una marcada tendencia al alza en la estadísticas como VAN esperado, mínimo y máximo VAN al ir aumentando en la cantidad de puntos disponibles por periodo, es decir, al aumentar la cobertura sobre la incertidumbre en las velocidades de extracción, además de lo anterior se ve que para el caso +5, que es considerado ms conservador, estas estadísticas disminuyen, esto se puede explicar ya que al asumir tal cobertura, las inversiones asociadas contrarrestan el efecto de aumentar el cumplimiento del plan y por ende el mayor valor de cada uno de los planes realizados para este caso.

Además de lo anterior se observa que la desviación estándar, disminuye al aumentar la cobertura lo que es esperable ya que se aumenta la probabilidad de cumplimiento en cada uno de los escenarios cada vez que se aumenta la cobertura, esto debido a que en caso de no poder obtener lo deseado a en cada periodo de algún punto, se recurre a uno que para ese periodo en los otros casos no estuviese abierto, lo que da por resultado una menor dispersión en los valores finales.

Por otra parte al observar los VAN esperados se encuentra un máximo en el caso +3, el cual por este hecho se considera un candidato a ser la mejor cobertura y a que genera mayor valor, pero esto se debe decir mediante otras métricas de inversión que serán analizadas más adelante.

Otro análisis interesante a realizar es el de las inversiones que se deben llevar a cabo para poder sustentar cada uno de los casos propuesto y sus correspondientes planes de producción, en el siguiente grafico podemos ver un resumen anualizado promedio de las inversiones a realizar en cada una de las coberturas.

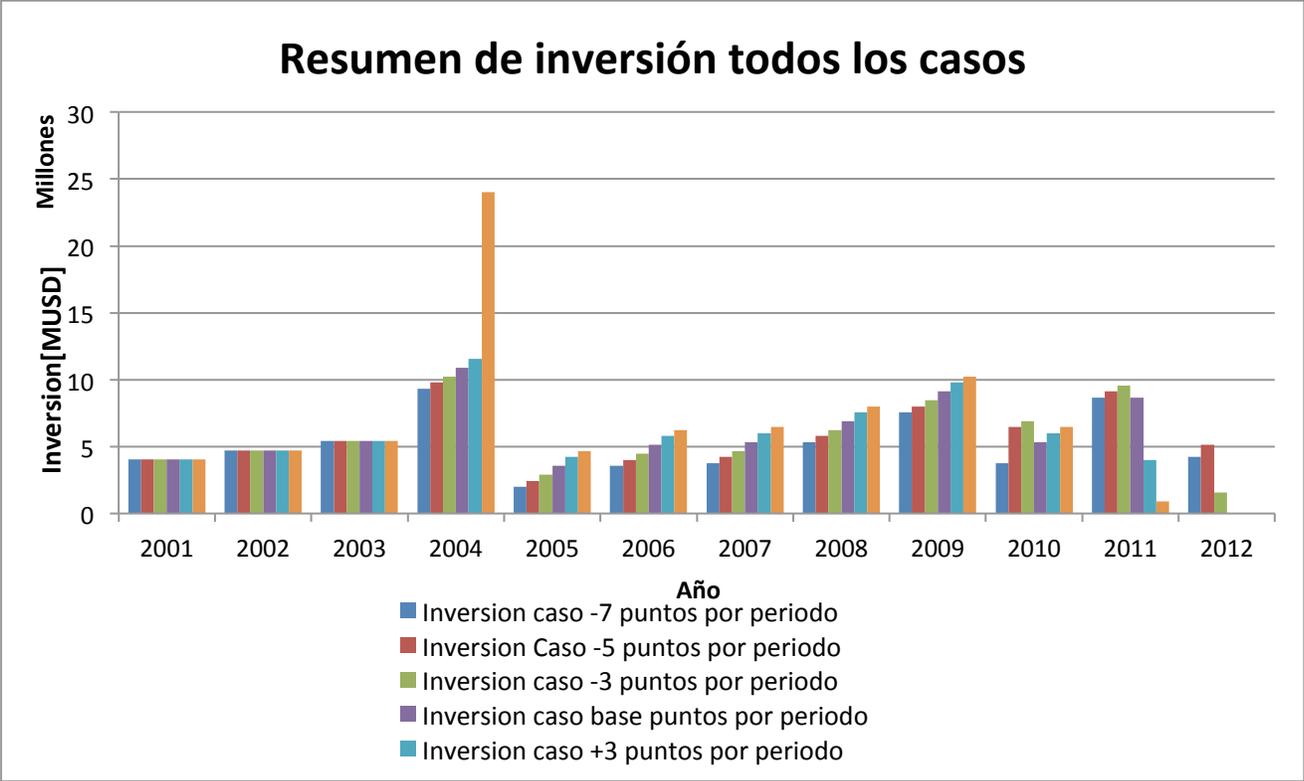


Figura 37. Resumen anualizado de inversiones promedio a realizar para cada caso

De la figurase desprende básicamente que los tres primeros años en inversión son indiferentes según el caso, ya que estas se refieren a las obras pre minería, es la construcción de las obras necesarias para poder iniciar la extracción de mineral en los años posteriores, y además podemos ver que las inversiones a partir del año en que se comienza la explotación(2004), comienzan a comportarse de una manera diferente, ya que comienzan a adelantarse inversiones por el hecho de las coberturas que se están tomando en cada uno de los casos. Por ultimo cabe destacar en el año 2004 para el caso +5, el aumento de inversión por el hecho que se debe tener una mayor flota de equipos en ese caso a partir de ese periodo para poder cumplir con los requerimientos de aperturas de puntos que son más exigentes en esta situación.

También es importante estudiar cuales son los valores promedios de las inversiones actualizadas, ya que así podemos observar como esta variación en la política de inversiones repercutirá en el VAN final de cada uno de los

planes para cada uno de los casos, este análisis se presenta en la siguiente tabla.

	Caso - 7	Caso - 5	Caso - 3	Caso base	Caso +3	Caso +5
Inversión actualizada [MUSD]	38.6	41.9	42.6	43.3	44.1	53.4

Tabla 16. Inversiones promedio actualizadas

Con la tabla anterior se puede establecer que las inversiones repercuten en el VAN, principalmente en el caso más conservador, ya que en los demás los aumentos son menores, del orden de 1 [MUSD], en cambio el aumento entre el caso +3 y caso +5 es del orden de las decenas de millones, esto se explica por lo mencionado previamente de la inversión en equipos, y lo que confirma la importancia de tener en consideración todo los elementos que influyen en el plan minero, y además explica la caída en el VAN esperado para ese caso con respecto al caso +3.

Una métrica de inversión interesante de observar es la confiabilidad de las coberturas tomadas, es decir, para qué porcentaje de los planes se cumple al menos el plan base, en este caso se considerara una franja de cumplimiento del 95%, es decir si por periodo se cumple en tonelaje extraído, al menos el 95% de lo prometido en el plan base. Esta franja se define ya que las diferencias de un cinco por ciento caben dentro del error admisible, para estos casos, además, se corresponde con el gap, utilizado en la optimización mediante la herramienta UDESS, y el motor de optimización utilizado por esta llamado gurobi.

Con lo anterior y los planes obtenidos, se procedió a calcular las confiabilidades de cada una de las coberturas realizadas, y los resultados se presentan en la tabla siguiente.

	Caso - 7	Caso - 5	Caso - 3	Caso base	Caso +3	Caso +5
Confiabilidad	78%	85%	89%	91%	95%	98%

Tabla 17. Confiabilidades para cada caso.

Como podemos observar del comportamiento de la confiabilidad al aumentar la cobertura, esta también aumenta, esto es lo que se desea al realizar estas coberturas por lo que este resultado es esperable, pero junto con esto

podemos observar el comportamiento del VAN esperado en conjunto con la confiabilidad, lo que se puede hacer en el siguiente gráfico.

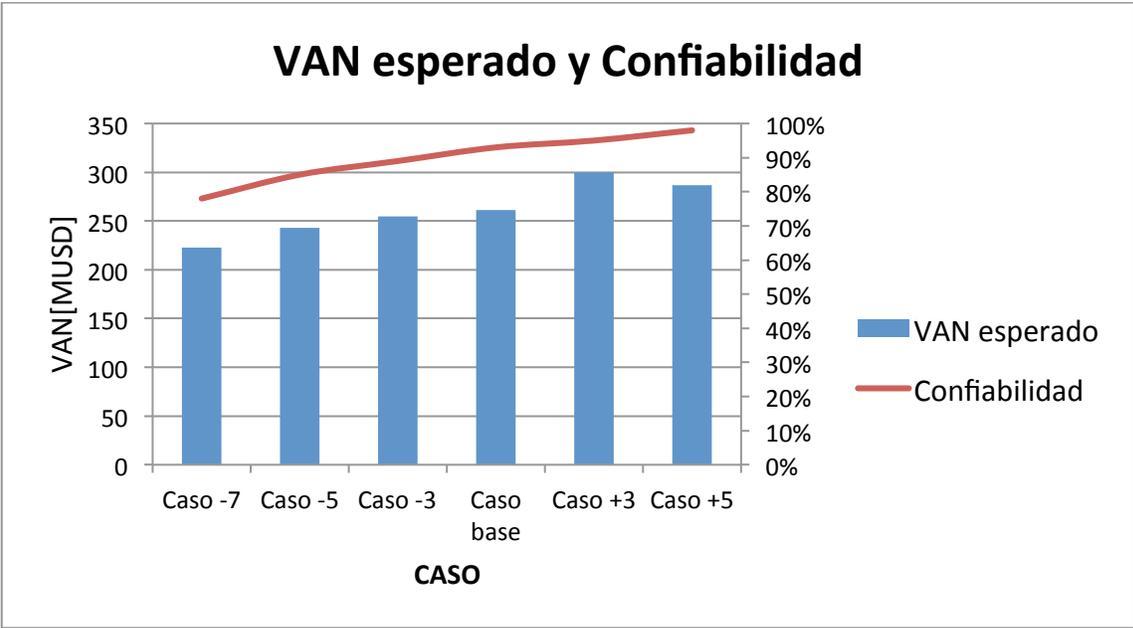


Figura 38. Grafico VAN esperado y Confiabilidad

El grafico desprendemos que el aumento en confiabilidad es cada vez menor, pero a su vez el VAN esperado aumenta pero solo hasta el caso +3, luego de este decae como ya había sido mencionado anteriormente, lo que nuevamente posiciona al caso +3 como el caso más favorable dado su valor y su alta confiabilidad, que solo es un 3% menos que la del caso +5, pero su VAN esperado es de alrededor de 13 millones de dólares, por lo cual hasta ahora se perfila como la mejor opción. Sin embargo aún se puede hacer un análisis más que sería una valoración mediante la metodología de opciones reales, y así poder tomar una decisión con mayor información, esta valorización se presenta a continuación.

6.3 Valorización mediante opciones reales

Para llevar a cabo la valorización mediante opciones reales se deben calcular los valores esperados en los casos positivos y negativos para cada una de las coberturas. Además se deben tener las probabilidades de cada uno de estos, para este caso se les asociara la confiabilidad, como la probabilidad del caso positivo y el complemento como la del caso negativo. Esto se resume en la siguiente tabla.

	Caso -7	Caso -5	Caso -3	Caso base	Caso +3	Caso +5
VAN caso negativo[MUSD]	173.9	197.7	199.8	209.3	261	252
VAN caso positivo[MUSD]	246.6	251.7	255.1	266	300.4	292
Probabilidad caso positivo(p)[%]	78%	85%	89%	91%	95%	98%
Probabilidad caso negativo(p)[%]	22%	15%	11%	9%	5%	2%
Valorización Opción real	230.606	243.6	249.017	260.897	298.43	291.2

Tabla 18. Valorización mediante opción real de coberturas.

Con los resultado de la tabla anterior se procede a calcular la valorización mediante opciones reales, los resultado se muestran en la siguiente tabla.

	Caso -7	Caso -5	Caso -3	Caso base	Caso +3	Caso +5
Precio opción[MUSD]	0	0	0	0	0	10.4
E(VAN)[MUSD]	230.6	243.6	249	262	298.4	291.2
Valor opción [MUSD]	-30.394	-17.4	-11.983	0	37.43	30.2
Confiabilidad [%]	78%	85%	89%	91%	95%	98%
Desviación estándar[MUSD]	39.15	32.2	31.4	30.1	27.4	25.8

Tabla 19. Valorización mediante opciones reales, y parámetros importantes

Según la tabla anterior podemos ver la importancia de la probabilidad de cumplimiento, esto lo podemos apreciar en el la diferencias entre el caso +3 y caso +5, ya que según las demás métricas, especialmente la de VAN esperado, se tenía una brecha mayor entre estas, alrededor de los 10 [MUSD], ahora se acorta esta diferencia hasta los 7 [MUSD], lo que se explica básicamente por la diferencia en la confiabilidad de los planes generados con estas coberturas.

Por otro lado esta métrica vuelve a confirmar que la cobertura tomada en el caso +3 es la que presenta ser la mejor, para este caso de estudio, ya que presenta el mayor VAN esperado calculado con la metodología de opciones reales.

Ahora se presenta una tabla resumen de todas las métricas utilizadas para analizar los resultados de este trabajo.

	Caso -7	Caso -5	Caso -3	Caso base	Caso +3	Caso +5
Valorización Opción real	230.6	243.6	249	262	298.4	291.2
Inversión actualizada [MUSD]	38.6	42.0	42.6	43.3	44.1	53.4
Desviación estándar[MUSD]	39.15	32.2	31.4	30.1	27.4	25.8
E(VAN)[MUSD]	221	243	255	260	299	286
Confiabilidad	78%	85%	89%	91%	95%	98%

Tabla 20. Resumen de métricas de inversión.

De la tabla resumen se desprende como análisis final que las métricas de inversión apuntan en la misma dirección que la valorización por opciones reales en este caso y traen como consecuencia la elección de la cobertura del caso +3 como la cobertura óptima para el caso de estudio, ya que es solo superada por el caso +5 en confiabilidad, pero por no mucho, y la metodología de opciones reales cuantifica que esta diferencia es importante pero no lo suficiente para que sea mejor realizar una cobertura mayor que la del caso +3.

Aun cuando los análisis de los resultados con esta metodología de valorización no varían mucho con respecto de los anteriores, pero esto se puede deber al comportamiento de las distribuciones de valor presentes, las opciones reales darán mejores respuestas a medida que la disminución de la desviación estándar, sea más importante que el cambio en la media.

Por último se muestra un gráfico donde se resume y se muestra el efecto de las coberturas evaluadas mediante opciones reales y el cambio con el valor del caso determinístico.

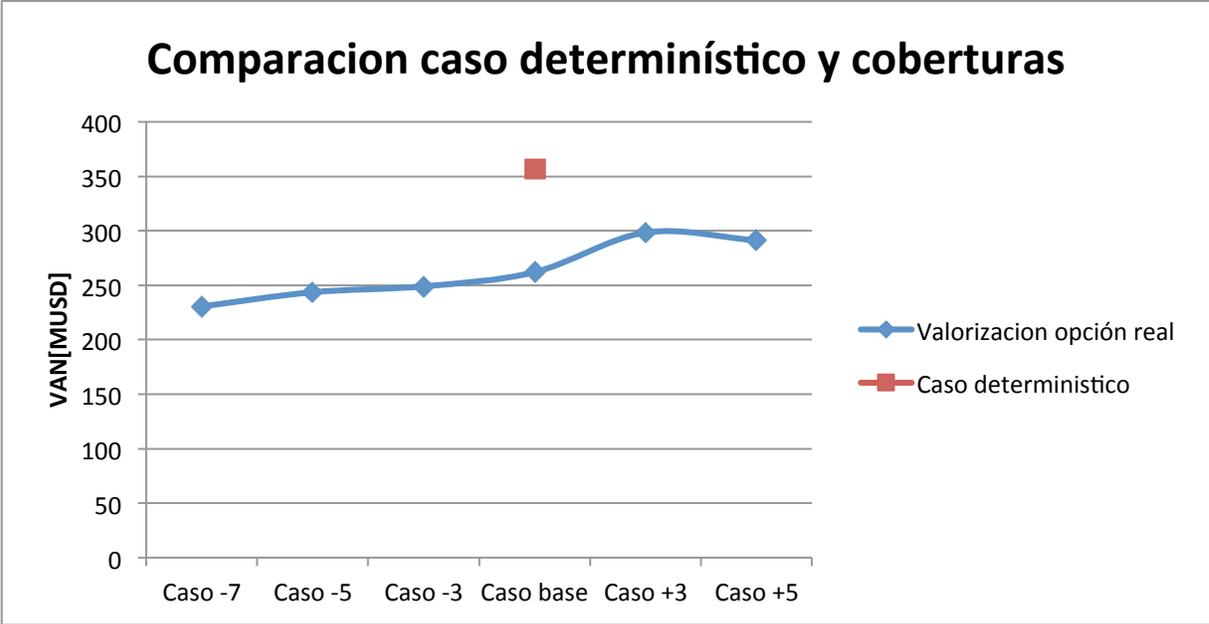


Figura 39. Gráfico de comparación de VAN caso determinístico y coberturas valorizadas por OR

De el gráfico se desprende que gracias a tomar coberturas, se puede mejorar el VAN esperado ante el caso base, no se logra igualar el valor del caso determinístico, ya que este es un valor imposible de alcanzar porque no toma en consideración los problemas operacionales aquí considerados, de todas maneras la diferencia entre el caso seleccionado como optimo y el caso determinístico es de alrededor del 20%, lo cual es importante, y lo más relevante de todo, es que con el caso base no se estaba capturando todo el potencial valor del proyecto.

7 Conclusiones y Trabajos Futuros

Las principales conclusiones de este trabajo, además de los trabajos propuestos a realizar a futuro se presentan a continuación.

7.1 Conclusiones

La consideración de la existencia de diferencia entre las velocidades de extracción máximas con las que se planifica y las reales obtenidas en la operación lleva a la generación de escenarios de estas y así poder tener en consideración la incertidumbre operacional que estas aportan a la realización de los planes, de esta forma se obtienen valores más cercanos a los reales de VAN, e indican si se podrá o no cumplir un plan con una determinada estrategia de incorporación de área.

Dado lo anterior y junto con los resultados obtenidos en este trabajo se verifica que la estrategia de incorporación de área es fundamental para el cumplimiento de un plan de producción, si se tiene en consideración la variabilidad de las velocidades de extracción reales.

Al ser la estrategia de incorporación de área fundamental en el cumplimiento y en la captura de valor del proyecto minero, se verifica la hipótesis que se debe buscar una incorporación de puntos de extracción óptima que se haga cargo de la incertidumbre operacional añadida por las velocidades de extracción.

Dado lo anterior se comprueba que la existencia de puntos extras disponibles para la realización de los planes de producción sí aumenta la confiabilidad de estos, y prueba que es una buena táctica para hacer frente a la incertidumbre operacional.

En cuanto a la implementación de las diferentes coberturas, se debe tener siempre presente las inversiones, ya que son estas las que llevan a hacer la diferencias entre los diferentes casos estudiados, ya que gran parte de la diferencia entre el caso +3 y el caso +5 se debe a la diferencia de inversión en equipos, el resto es por el adelanto de inversión en infraestructura mina, además de esto se debe considerar casos plausibles, ya que no se pueden generar casos que incorporen muchos más puntos en esta mina, ya que la capacidad técnica real en la preparación minera se encuentra muy cercano a su máximo, y por lo tanto seguir exigiendo aperturas de puntos sugeriría un cambio en el método de explotación que escapa del objetivo de este trabajo.

Además se verifica que realizar una planificación determinística dista mucho de los real ya que en este trabajo el plan determinístico de referencia calculado entrego un VAN de 357 [MUSD], y en cambio los resultados de las valorizaciones de los planes calculados aquí en el mejor de los casos de 298

[MUSD] que es alrededor de un 20% menor que el determinista, lo que indica que en valor nunca se alcanzara lo prometido por este plan. La causa de esta disminución del VAN se debe a la disminución de extracción de mineral por la variación de las velocidades de extracción.

Los resultados de confiabilidad se pueden haber visto afectados por el rango de aceptabilidad seleccionado, ya que resulta en confiabilidades mayores, pero esto debe ser así ya que en el caso de que este rango no fuese tomado, se exigiría que se cumpliera un número exacto, y por construcción de la herramienta y por velocidad de resolución se deja un rango de error en la búsqueda de la solución y por efecto de esto se podría decir que un plan no cumple cuando en realidad, si se le exigiese un poco más a la herramienta si lo haría.

Los resultados de confiabilidad se pueden haber visto un poco sesgados por la forma de cálculo, ya que se consideró un rango de aceptabilidad, esto se debe a que sin este rango, el cumplimiento de los planes era muy complejo porque al exigir un número exacto se podía estar dejando fuera planes que si cumplirían, por razones de cálculo.

La estrategia planteada por el grupo planificación de la mina del estudio sin tener un respaldo cuantificable de todas formas asume una cobertura, ya que la confiabilidad de su caso es bastante alta (91%), lo cual viene dado puramente de la experiencia del planificador, y es aquí donde esta manera de valorización puede marcar la diferencia, ya que da un respaldo cuantificable fácilmente del porque realizar coberturas, y el aumento de valor que esto trae al proyecto.

Junto con lo dicho en el párrafo anterior se cuantifico un aumento de confiabilidad de un 4%, entre el caso base y el caso +3 que fue el seleccionado como optimo, y además el caso +3 se valorizo mediante opciones reales con un valor de un 15% superior a la incorporación de puntos de extracción planteada por el caso base. Lo que cuantifica un aumento de captura de valor de 35 MUSD, debido a que es una estrategia más confiable.

Con lo anterior podemos concluir que la metodología puede aumentar el valor del proyecto en 35 MUSD, si se aplicara la metodología planteada.

Se logra la validación de la herramienta UDESS en proceso de planificación a escala mina, y resulta la herramienta idónea para este tipo de análisis ya que realiza planes óptimos, y así los hace a todos planes comparables porque elimina la mano del planificador en el

Por último se puede concluir que se puede realizar una valorización adecuada para poder cuantificar el aumento de confiabilidad de un plan de producción

mediante una estrategia de incorporación de puntos de extracción que permita tener una cobertura mayor para hacer frente a los eventos operacionales. De este mismo modo se determina que la metodología llevada a cabo es válida para poder encontrar una cobertura optima, que maximice la captura de valor del proyecto.

7.2 Trabajos futuros

La incorporación de incertidumbre operacional, específicamente la incertidumbre en las velocidades de extracción, en el proceso de planificación, junto a la metodología de opciones reales en la evaluación de la misma, traen consigo un gran desafío en lo que respecta a incorporar una mayor cantidad de variables de interés en el problema a resolver y la mejora de los modelos para poder hacerse cargo de esta mayor cantidad de variables. En relación a las nuevas variables que se pueden incorporar en el problema estas se detallan a continuación.

1. Variabilidad en velocidad de avance en las preparaciones mineras. Ya que las preparaciones mineras en minería subterránea, son un desafío importante, y en el modelo se asume una velocidad de avance constante, lo cual no es la realidad ya que al igual que las velocidades de extracción estas varían, por diversos factores, lo que sería interesante de analizar.
2. Incorporación de variabilidad de disponibilidad de equipos, esto puede afectar, ya que la disponibilidad de los equipos no es constante en la vida de un proyecto minero, puede ser interesante de analizar, el impacto de esta en la planificación.
3. Incorporación de disponibilidades de sistemas mineros aguas debajo de la producción, chancado, planta, piques de traspaso, martillos picadores, sistema de acarreo, ya que también interfieren en la operación y cumplimiento del plan.

Con respecto a las mejoras del modelo para poder hacerse cargo de las nuevas variables a incorporar se puede decir que deberían ser las siguientes.

1. Implementación de condiciones en la precedencia que puedan ser alternativas, es decir condiciones "o", ya que así se podrían efectuar, secuencias de preparación alternativas, para diferentes condiciones.
2. Mejora en la velocidad de resolución, para así poder hacerse cargo del problema ya que al crecer el tamaño de este se vuelve cada vez más lento el encontrar una solución.

8 Bibliografía

1. Rubio E. (2006). "Block cave mine infrastructure reliability applied to production planning". Thesis (Ph. D.). Vancouver, Canada. The University of British Columbia. The Faculty of Graduate Studies (Mining Engineering).
2. ATWOOD, C. Parametric estimation of time-dependant failure rates for probabilistic risk assessment. En: Reliability Engineering and system safety, 1992, pp.181-194.
3. BOLAND, P. y PROSHCAN, F. The reliability of K out of N systems – The annals of probability. Vol. 11, 1983, pp. 760-764.
4. BROWN, E T. Block Caving Geomechanics. JKMRM Monograph Series on Mining and Mineral Processing. Julius Kruttschnitt Mineral Centre, University of Queensland: Brisbane. Vol 3, 2003.
5. KAZAKIDIS, V. y SCOBLE, M. Accounting for ground-related Problems in planning mine production systems. Mineral Resources Engineering, Imperial College Press.Londres, Inglaterra, Vol. 11, N 1, 2002.
6. KUO, W. y ZUO, M. Optimal reliability modeling: principles and applications. Canadá, John Wiley, 2002.
7. LAKNER, A., y ANDERSON, R. Reliability engineering for nuclear and other high technology systems. Elsevier Applied Science, Londres, 1985.
8. PASCUAL, R. El arte de mantener. Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2005.

9. RAUSAND, M. y HOYLAND, A. System reliability theory, models, statistical methods and applications. Segunda edición. Canadá, Wiley-Interscience, 2004.
10. RIGDON, S. y BASU, A. Stastical methods for the reliability of repairable systems. Primera edición. Canadá, Wiley-Interscience, 2000.
11. RUBIO, E., DUNBAR, S. y SCOBLE, M. Scheduling in block caving operations using operations research methods. En: Annual General Meeting, Can. Inst. Min & Metall. Montreal, Quebec, Canada, 2001.
12. SUMMERS, J., 2000. Analysis and management of mining risk. En: MassMin 2000, Brisbane. The Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne.
13. Roussos G. Dimitrakopoulos, Sabry A. Abdel Sabour. (2007). Evaluating mine plans under uncertainty: Can the real options make a difference?
14. S. A. Abdel Sabour*, R. G. Dimitrakopoulos and M. Kumral. Mine design selection under uncertainty.
15. Alexandra M. Newman. Modern Strategic Mine Planning.
16. Michael Samis. Applying advanced financial methods (real options) to mine valuation problems.
17. LI Shu-xing, KNIGHTS Peters. (2009) Integration of real real option into short-term planning and production scheduling
18. Charles A. Brannon, Gordon K. carlson, Timothy P. Casten(2011), Bolck Caving.
19. T.G. Heslop(2010), Understanding the flow of caved ore and its influence on ore recoveries and dilution in a block cave.

20. Sebastián H. Troncoso(2009), Confiabilidad de programas de producción en sistemas mineros subterráneos complejos, tesis de magister.
21. Winston Rocher (2012), Secuenciamiento óptimo de preparación minera subterránea, tesis de magister
22. Laubscher, D., 2000. Block Cave Manual. Julius kruttschnitt Mineral Research Centre, The University of Queensland, Australia.

Anexo A

Punto	Mes								
25_30F	1	29_35F	12	33_31H	32	17_26F	56	35_32F	88
25_31F	1	31_35H	12	21_35F	32	19_26H	56	37_32H	88
27_30H	1	41_36F	14	23_35H	32	17_25F	56	15_24F	88
27_31H	1	43_36H	14	17_31F	32	19_25H	56	17_24H	88
21_24F	4	45_39H	14	19_31H	32	37_33H	60	37_33F	96
21_25F	4	43_39F	14	27_34F	33	35_34F	60	39_33H	96
21_26F	4	27_29F	15	29_34H	33	35_35F	60		
21_27F	4	29_29H	15	25_34F	33	37_34H	60		
23_24H	4	27_30F	15	27_34H	33	37_35H	60		
23_25H	4	19_31F	15	29_30F	33	37_35F	60		
23_26F	4	21_31H	15	31_30H	33	35_36F	60		
23_28F	4	21_32F	15	27_35F	36	37_36H	60		
23_29F	4	19_29F	18	29_35H	36	41_41F	60		
21_26H	4	21_29H	18	23_33H	36	43_41H	60		
31_31H	4	21_30F	18	21_33F	36	41_40F	60		
29_31F	4	23_30H	18	37_37F	36	43_40H	60		
29_32F	4	29_30H	18	39_37H	36	27_37F	63		
31_32H	4	29_31H	18	23_34F	40	29_37H	63		
31_33F	5	35_38F	18	25_34H	40	17_24F	64		
19_23F	6	37_38H	18	33_32F	40	19_24H	64		
19_24F	6	37_34F	18	35_32H	40	17_23F	64		
21_23H	6	39_34H	18	33_33F	40	41_39F	66		
21_24H	6	23_31F	20	35_33H	40	43_39H	66		
19_25F	6	25_31H	20	33_34F	40	25_36F	70		
21_25H	6	27_32H	20	35_34H	40	27_36H	70		
25_25H	6	25_32F	20	17_30F	40	25_35H	70		
23_25F	6	31_32F	20	19_30H	40	23_35F	70		
35_37F	6	33_32H	20	19_34F	40	43_42F	72		
37_37H	6	27_32F	21	21_34H	40	41_38F	72		
19_26F	7	29_32H	21	17_29F	40	43_38H	72		
23_26H	7	43_38F	21	19_29H	40	45_42H	72		
25_26H	7	45_38H	21	37_38F	42	41_37F	72		
43_40F	7	43_37F	21	39_38H	42	43_37H	72		
45_40H	7	45_37H	21	37_39F	42	43_41F	72		
23_27F	8	19_30F	22	39_39H	42	45_41H	72		
25_27H	8	21_30H	22	39_35F	42	19_23H	72		
23_27H	8	21_31F	24	41_35H	42	29_28H	72		
25_28H	8	23_31H	24	25_35F	44	27_28F	72		
29_33F	8	25_32H	24	27_35H	44	15_29F	72		
31_33H	8	23_32F	24	27_36F	48	17_29H	72		
29_34F	8	25_33F	24	29_36H	48	29_29F	72		
31_34H	8	27_33H	24	39_36F	48	31_29H	72		
21_27H	9	39_35H	24	41_36H	48	21_34F	77		
19_27F	9	31_34F	25	39_37F	48	23_34H	77		
23_28H	9	33_33H	25	41_37H	48	19_33F	77		

21_28F	9	33_34H	25	17_28F	48	21_33H	77	
25_29H	9	31_35F	25	19_28H	48	31_30F	80	
21_29F	10	33_35H	25	33_35F	50	33_30H	80	
21_28H	10	23_32H	27	35_35H	50	15_28F	80	
19_28F	10	31_36H	28	33_36F	50	17_28H	80	
23_29H	10	29_36F	28	35_36H	50	25_37F	84	
23_30F	11	27_33F	30	39_38F	54	27_37H	84	
25_30H	11	29_33H	30	41_38H	54	23_36F	84	
25_26F	11	23_33F	30	39_39F	54	25_36H	84	
27_26H	11	25_33H	30	41_39H	54	15_27F	88	
25_27F	12	31_36F	30	39_40F	54	17_27H	88	
27_27H	12	33_36H	30	41_40H	54	33_31F	88	
25_28F	12	37_36F	30	33_37F	55	35_31H	88	
27_28H	12	39_36H	30	35_37H	55	15_26F	88	
25_29F	12	19_32F	32	35_33F	55	17_26H	88	
27_29H	12	21_32H	32	19_27H	56	15_25F	88	
27_31F	12	31_31F	32	17_27F	56	17_25H	88	

**Tabla 21. Incorporación de puntos de extracción por mes
(considerando mes uno agosto 2005)**