



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

# **METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE HUNDIMIENTO EN MINAS DE PANEL CAVING BAJO INCERTIDUMBRE GEOLÓGICA**

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN MINERÍA

MARCOS FELIPE BARBOZA ROCO

PROFESOR GUÍA:  
NELSON MORALES VARELA  
CO-PROFESOR GUÍA:  
ENRIQUE JÉLVEZ MONTENEGRO  
MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
JOSÉ DELGADO VEGA  
EMILIO VARGAS VIERLING

SANTIAGO, CHILE  
2019

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE MAGÍSTER EN MINERÍA  
POR: MARCOS FELIPE BARBOZA ROCO  
FECHA: AGOSTO 2019  
PROF. GUÍA: NELSON MORALES VARELA  
PROF. CO-GUÍA: ENRIQUE JÉLVEZ MONTENEGRO**

## METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE HUNDIMIENTO EN MINAS DE PANEL CAVING BAJO INCERTIDUMBRE GEOLÓGICA

La planificación minera de largo plazo busca establecer la mejor estrategia de extracción de los recursos minerales, a partir del supuesto de una serie de parámetros económicos, geológicos y operacionales. En la actualidad, debido a las compañías mineras han ido incrementando el uso de métodos masivos para explotar el mineral en minería subterránea. Dentro de los métodos masivos disponibles los métodos por caving tienen el atractivo de generar menor costos, altos ritmos de producción y la posibilidad de llegar a zonas mineralizadas más profundas.

El objetivo de este trabajo es desarrollar, implementar y evaluar la relevancia que tiene la incertidumbre geológica en la planificación de una mina en panel caving. Primero, se determina la influencia en un agendamiento bajo una dirección de minado considerando distintas estrategias de incorporar esta incertidumbre, ya sea como índices de recurrencias o selección de las peores ganancias sobre un conjunto de escenarios simulados.

Los resultados obtenidos son comparados con un caso base de agendamiento tradicional, donde se utiliza una sola representación geológica estimada. Posteriormente se hace el ejercicio de observar la relevancia de la incertidumbre geológica, pero a un horizonte de decisión más macro, es decir, donde se define la dirección de hundimiento que entregue el mejor valor presente neto (VAN), pero conteniendo la información del conjunto de escenarios de leyes en esta decisión.

Los planes de producción, el secuenciamiento de bloques, la alimentación a planta y las variaciones del VAN se analizan basados en las diferentes estrategias utilizadas en el agendamiento. Estas estrategias corresponden a (i) un caso base, donde se determina un agendamiento tradicional a basado en la ley estimada por kriging, (ii) un agendamiento por índice de recurrencia, donde se utiliza un índice de confiabilidad de acuerdo a la frecuencia que tiene un bloque de ser extraído en un período en función de los distintos planes generados para cada escenario de ley, y (iii) un agendamiento considerando la peor ganancia que se obtiene a escala de bloque valorizado según los distintos escenarios de leyes.

Considerando una misma dirección de minado, comparando las tres estrategias descritas, no superan el 1.83 % del VAN con respecto al caso base. Además, cambiando la escala de evaluación a una dirección de minado, se tiene que para todas las estrategias y considerando solo la valorización de la ley estimada por kriging, se tiende a optar por la dirección Sur-Oeste ya que entrega un valor 1.29 % superior que la dirección Norte-Este. Sin embargo, evaluando sobre el valor esperado del conjunto de simulaciones, la decisión es otra, donde la

dirección Norte-Este presenta un mayor VAN que la dirección contraria, cercano a un 7% superior. Si se hace un análisis de riesgo a esta toma de decisión, en base la información de la incertidumbre geológica, si se escoge la dirección Norte-Este podría ahorrar un monto de 20 [MUSD] de posibles pérdidas al escoger esta dirección que la Sur-Oeste, en donde la valorización obtenida por el kriging no fue capaz de reflejar.

**ABSTRACT OF THE THESIS TO OBTAIN  
THE GRADE OF MASTER IN MINING ENGINEERING  
BY: MARCOS FELIPE BARBOZA ROCO  
FECHA: AUGUST 2019  
THESIS ADVISOR: NELSON MORALES VARELA  
THESIS ADVISOR: ENRIQUE JÉLVEZ MONTENEGRO**

## METHODOLOGY FOR THE DETERMINATION OF MINED IN CAVING PANEL MINES UNDER GEOLOGICAL UNCERTAINTY

Long term mine planning seeks to establish the best extraction strategy of mineral resources, based on the assumption of economic, geological and operational parameters. At present, mining companies are increasing the use of massive mining methods to extract minerals in underground mining. Among the available methods, caving methods are favored because of their low cost, high production rates and the possibility to reach deeper ore zones.

The purpose of this work is to develop, implement and evaluate the relevance of the geological uncertainty in the planning of a Panel Caving mine. First, the influence of a scheduling under a mining direction is determined considering different strategies to incorporate the geological uncertainty, whether as recurrence indexes or selection of the worst profits in simulated scenarios.

The obtained results are compared with a traditional scheduling base case, that uses an estimated geological representation. Subsequently, the relevance of the geological uncertainty is observed in a macro way; in other words, where the representing caving direction of the best Net Present Value (NPV) is defined, including the information of the grade group scenarios in this decision.

The production schemes, the block scheduling, the feeding plant and the NPV variations are analyzed based on different strategies used on the scheduling. These strategies refer to a base case (i), where a traditional scheduling is determined based on an estimated grade by kriging, (ii) a scheduling by a recurrence index, that uses a reliability index according to the extracted block frequency in function of different plans for each grade scenario, and (iii) a scheduling considering the worst profit obtained in different grade scenarios.

Considering the same mining direction and comparing the three described strategies, the NPV does not exceed the 1.83% respect to the base case. Moreover, changing the evaluation scale to a mining direction and considering the value of the estimated grade by kriging, South – West is the best direction for all the strategies because its value is 1,29% more than North – East direction. But, the decision changes when the evaluation is based on an expected value of the simulation group, where the North – East direction shows a high NPV of 7% more. A risk analysis based on the geological uncertainty information and the North-East direction, could save an amount of 20 [MUSD] instead of choosing the South- West direction, where kriging did not work well due to a lack of a risk analysis.



# Dedicatoria

*Con cariño para kathy y maxito. . .*

# Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mi hijo, a mi señora, a mi madre y a mi hermano, por su apoyo incondicional en momentos muy difíciles de la vida, espero algún día retribuir todo lo que me han dado.

A mi profesor guía Nelson Morales, por su apoyo, paciencia y la oportunidad de trabajar con grandes personas.

A Maximiliano Alarcón, por tus consejos y apoyo en una situación muy complicada. Sin tener la confianza me brindaste tu apoyo sin pedir nada a cambio.

También agradecer de manera especial a mí profesor co-guía Enrique Jélvez, por tu seguimiento, preocupación, paciencia, retos y principalmente por enseñarme, no solo el conocimiento técnico sino experiencias de vida y consejos, sin duda éstos son el mejor legado que me llevo de esta etapa.

Doy gracias por haber conocido al grupo humano que conforma Delphos, la gran diversidad de distintas personalidades hace que este laboratorio sea único, gente muy brillante con una calidad de sencillez admirable. Ada, Espejo, Diego, JP, Pierre, Christopher, Nelis, Orellana, Vale, Gerson, Emilio, Consuelo, Héctor, Fabián, Raúl, Walter, y en especial a Manuel Rodríguez alias el guerrillero.

A los muchachos de pregrado Mauricio, Pedraza, Jupu, Zurita, Claudio, Luis, Seba, entre otros.

Al departamento de postgrados del Departamento de Minas de la Universidad de Chile, tanto profesores como funcionarios y compañeros que hicieron de éste un lugar grato donde estudiar.

Y en especial a mis compañeros de magister y nuevos amigos. Melissa, Roberto, David, Mireya, Alex, Nick y Mr. Chow. Por los grandes momentos que vivimos juntos y también por los domingos, navidades, años nuevos y 18, que compartimos como familia junto a la mía.



# Tabla de Contenido

<b>Dedicatoria</b>	<b>v</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>vi</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Introducción . . . . .	1
1.2. Descripción del problema . . . . .	2
1.3. Objetivos . . . . .	4
1.3.1. Objetivo general . . . . .	4
1.3.2. Objetivos específicos . . . . .	4
1.3.3. Alcances . . . . .	4
1.4. Organización de la tesis . . . . .	5
<b>2. Problema de la planificación de la producción de largo plazo en minas de hundimiento</b>	<b>6</b>
2.1. Minería Subterránea . . . . .	6
2.1.1. Método de explotación Block/Panel Caving . . . . .	7
2.2. Planificación Minera . . . . .	9
2.3. Criterios de secuencias de explotación . . . . .	10
2.3.1. Aspectos geomecánicos en el punto de inicio del caving . . . . .	10
2.3.2. Aspectos geomecánicos en la secuencia de explotación . . . . .	10
2.3.3. Control de caveback en la secuencia de explotación . . . . .	12
2.4. Fuentes de incertidumbre en la planificación minera . . . . .	14

2.5. Uso de las simulaciones de leyes en la planificación minera . . . . .	15
2.6. Planificación minera bajo incertidumbre . . . . .	17
2.7. Introducción medida de riesgo . . . . .	18
2.7.1. Ejemplo de aplicación, medida de riesgo en la planificación minera . . . . .	19
2.8. Proceso de Planificación en minas tipo caving . . . . .	20
2.9. Definición de conceptos en la planificación en panel caving . . . . .	21
2.9.1. Altura de Columna . . . . .	21
2.9.2. Dilución . . . . .	22
2.9.3. Modelo de comportamiento de dilución de Laubscher . . . . .	22
2.9.4. Footprint y Envolvente Económica en Minas explotadas por Block/Panel Caving . . . . .	24
<b>3. Análisis Bibliográfico</b>	<b>27</b>
3.1. Planificación minera en Block/Panel Caving . . . . .	27
3.2. Planificación minera bajo incertidumbre . . . . .	29
3.3. Planificación minera en block/panel caving, bajo incertidumbre . . . . .	30
3.4. Discusión del estado del arte . . . . .	32
<b>4. Metodología</b>	<b>34</b>
4.1. Etapa de elaboración de los modelos de optimización . . . . .	35
4.1.1. Desarrollo del modelo de optimización para agendamiento tradicional . . . . .	35
4.1.2. Desarrollo del modelo de optimización para agendamiento por frecuencia de pertenencia por periodo . . . . .	38
4.1.3. Desarrollo del modelo de optimización para agendamiento por la peor ganancia de cada bloque . . . . .	39
4.2. Desarrollo de precedencias entre bloques para el método de panel caving . . . . .	40
4.2.1. Precedencias de Avance de Hundimiento . . . . .	40
4.2.2. Precedencias Verticales . . . . .	40
4.3. Estrategias de agendamiento . . . . .	41

4.4.	Análisis de los planes de producción . . . . .	42
4.5.	Metodología de resolución para todos los casos de estudio . . . . .	43
4.5.1.	MineLink . . . . .	44
4.5.2.	DOPPLER . . . . .	45
<b>5.</b>	<b>Caso de Estudio</b>	<b>46</b>
5.1.	Generalidades . . . . .	46
5.2.	Definición de reservas . . . . .	47
5.3.	Rebloqueo y definición de área de hundimiento . . . . .	49
5.4.	Posición de los puntos de inicio . . . . .	50
5.5.	Agendamiento a largo plazo . . . . .	51
5.6.	Estrategias de agendamiento . . . . .	52
5.6.1.	Estrategia de Agendamiento tradicional Dirección NE . . . . .	52
5.6.2.	Estrategia de Agendamiento tradicional Dirección SW . . . . .	53
5.6.3.	Estrategia de agendamiento por índice de frecuencia de pertenencia por periodo . . . . .	55
5.6.4.	Estrategia de agendamiento por índice de frecuencia de pertenencia por periodo, dirección NE . . . . .	56
5.6.5.	Estrategia de agendamiento por índice de frecuencia de pertenencia por periodo, dirección SW . . . . .	58
5.7.	Estrategia de agendamiento valorizando la peor ganancia a nivel de bloque . . . . .	61
5.7.1.	Estrategia de agendamiento a través de las peores ganancias, dirección NE . . . . .	61
5.7.2.	Estrategia de agendamiento a través de las peores ganancias, dirección SW . . . . .	62
<b>6.</b>	<b>Análisis de resultados</b>	<b>64</b>
6.1.	Introducción . . . . .	64
6.2.	Tonelaje de mineral alimentando a planta . . . . .	64
6.3.	Evaluación de finos contenidos en la alimentación a planta . . . . .	65
6.4.	Evaluación económica . . . . .	66

6.4.1. VAN acumulado por estrategia de agendamiento, bajo la misma dirección . . . . .	66
6.5. Análisis de riesgo por secuencia de hundimiento . . . . .	68
<b>7. Conclusiones y trabajos futuros</b>	<b>71</b>
7.1. Conclusiones . . . . .	71
7.1.1. Planificación minera en Panel Caving . . . . .	71
7.1.2. Métodos para incorporar la información de incertidumbre en la planificación . . . . .	71
7.1.3. Caso de Estudio . . . . .	72
7.2. Trabajo Futuro . . . . .	73
<b>8. Bibliografía</b>	<b>76</b>
<b>9. Anexo</b>	<b>80</b>
9.1. Histogramas de asignación de minado por bloques, de los 100 planes individuales. . . . .	80
9.2. Asignación de bloques para distintas estrategias y dirección. . . . .	84
9.3. Planes de producción . . . . .	86



# Índice de tablas

2.1. Tabla VaR simulado para muestras de tamaño de 100, 260 y 520 con un nivel de confianza del 95 % y 99 % . . . . .	20
4.1. Casos de estudio utilizados en la investigación. 45 = NE, 225 = SW . . . . .	41
5.1. Dimensiones del modelo inicial, caso de estudio. . . . .	46
5.2. Parámetros técnicos y económicos, para cálculo de reservas. . . . .	48
5.3. Características del modelo de bloques en estudio . . . . .	49
5.4. Parámetros de valorización del modelo de bloques . . . . .	51
6.1. Resultados económicos por estrategia NE . . . . .	68
6.2. Resultados económicos por estrategia SW . . . . .	68
6.3. Diferencia porcentual dirección NE vs SW, según estimación por Kriging . . . . .	69
6.4. Diferencia porcentual dirección NE vs SW, según simulaciones . . . . .	69
9.1. Plan de producción, agendamiento tradicional dirección NE . . . . .	86
9.2. Plan de producción, agendamiento tradicional dirección SW . . . . .	86
9.3. Plan de producción, agendamiento por índice de recurrencia, dirección NE. . . . .	87
9.4. Plan de producción, agendamiento por índice de recurrencia, dirección SW. . . . .	87
9.5. Plan de producción, agendamiento por VAN-VaR, dirección NE. . . . .	88
9.6. Plan de producción, agendamiento por VAN-VaR, dirección SW. . . . .	88



# Índice de figuras

2.1. Clasificación de métodos subterráneos. Fuente: Adaptado de ( <b>Brown 2003</b> ) . . . . .	7
2.2. Esquema de explotación Block Caving. Fuente: ( <b>Brown 2003</b> ) . . . . .	8
2.3. Panel Caving Mecanizado, ( <b>Brown 2003</b> ) . . . . .	8
2.4. Distintos términos que interfieren en la geometría de frentes. Fuente: ( <b>Guía de diseno Codelco 2006</b> )	11
2.5. Orientación del frente en función del estado tensional tensional preminería (donde $1\sigma$ $\rho$ es la proyección de $1\sigma$ en el plano del nivel de hundimiento) y entes estructurales. Fuente: ( <b>Guía de diseno Codelco 2006</b> ) . . . . .	12
2.6. Geometrías de frente en un block/panel caving. Fuente: ( <b>Laubscher 2000</b> ) . . . . .	12
2.7. Esquema sobre el monitoreo del caveback. Fuente: ( <b>Laubscher 2000</b> ) . . . . .	13
2.8. Esquema de medición del ángulo de extracción. Fuente: ( <b>Salgado 2009</b> ) . . . . .	13
2.9. Fuentes de incertidumbre en proyectos mineros. Fuente: Adaptado de ( <b>Brady y Brown 1992</b> )	14
2.10. Mapas obtenidos por kriging (arriba izquierda) y por simulación gaussiana secuencial (tres modelos restantes). Fuente: ( <b>Ortiz 2006</b> ) . . . . .	16
2.11. Esquema de las aplicaciones de las simulaciones de leyes. Fuente: Adaptado de los apuntes de ALGES . . . . .	17
2.12. Cálculo del VaR para una distribución de las peores perdidas . . . . .	19
2.13. Altura de interacción (HIZ). Fuente: ( <b>Laubscher 2011</b> ) . . . . .	23
2.14. Draw Control Factor. Fuente: ( <b>Laubscher 2011</b> ) . . . . .	24
2.15. Footprint Finder example (DOZ mine), los bloques de color purpura representan las columnas con beneficios acumulados mayores, y los bloques de color azul a las columnas con los beneficios acumulados más bajos. Fuente: ( <b>Diering 2010</b> ) . . . . .	25
2.16. Proceso de suavizamiento de la envolvente económica, limpieza de columnas. Fuente: ( <b>Vargas 2014</b> )	26

3.1. Optimización de caserones basado en un 80 % de confiabilidad, ( <b>Grieco y Dimitrakopoulos 2007</b> )	30
4.1. Secuencia de Caving (Vista en planta)	40
4.2. Restricciones de avance de hundimiento (Vista Perfil)	41
4.3. Diagrama de flujo de las tres estrategias de agendamiento utilizada en los casos de estudios	42
4.4. Heurística de Ventanas. Fuente: ( <b>Cullenbine; Wood y Newman 2011</b> )	43
4.5. Interfaz DOPPLER.	45
5.1. Vista isométrica del modelo de bloques. a) Ley de Cobre; b)Primer escenario de simulación de leyes de cobre	46
5.2. Curva Tonelaje Ley	47
5.3. Vistas de la envolvente económica, cota 3,550 [m], (a) Vista YZ, (b) Vista XZ, (c) Vista XY, (d) Vista Isométrica.	48
5.4. Vista isométrica, despliegue de ley diluida por Modelo de dilución Laubscher. (a) Envolvente económica en tamaño de 10x10x10 [m], (b) Envolvente económica rebloqueada a 30x30x30 [m]	49
5.5. Contorno piso de agendamiento cota 3,550[m], vista planta	50
5.6. Dirección NE (Flecha azul), Dirección SW (Flecha roja)	50
5.7. Distribución de leyes de cobre diluida en el Footprint (Imagen [a]), Distribución de beneficio acumulado por columna en el Footprint (Imagen [b]).	50
5.8. Plan de producción para el caso de estudio por agendamiento tradicional utilizando la valorización por kriring, bajo una dirección NE	53
5.9. Resultado de agendamientos de bloques desde la dirección NE, utilizando el enfoque tradicional de agendamiento. (a) Vista Vista Isométrica. (b) Vista en Planta	53
5.10. Plan de producción para el caso de estudio por agendamiento tradicional utilizando la valorización por kriring, bajo una dirección SW	54
5.11. Resultado de agendamientos de bloques desde la dirección SW, utilizando el enfoque tradicional de agendamiento. (a) Vista Vista Isométrica. (b) Vista en Planta	54
5.12. Esquema de procedimiento de agendamiento por índice de frecuencia de pertenencia por periodo	55
5.13. Perfiles de valores de cada plan obtenido por cada simulación condicional	56

5.14. Gráficos de frecuencia de asignación por periodo. (a) Bloques ubicados a nivel de piso. (b) Bloques ubicados en el techo de la envolvente . . . . .	57
5.15. Plan de producción para el caso de estudio por índice de frecuencia de pertenencia por periodo, bajo una dirección NE . . . . .	58
5.16. Resultado de agendamientos de bloques desde la dirección NE, utilizando estrategia de agendamiento por índice de recurrencia. (a) Vista Vista Isométrica. (b) Vista en Planta . . . . .	58
5.17. Perfiles de valores de cada plan obtenido por cada simulación condicional . . . . .	59
5.18. Gráficos de frecuencia de asignación por periodo. (a) Bloques ubicados a nivel de piso. (b) Bloques ubicados en el techo de la envolvente . . . . .	59
5.19. Plan de producción para el caso de estudio por índice de frecuencia de pertenencia por periodo, bajo una dirección SW . . . . .	60
5.20. Resultado de agendamientos de bloques, por índice de frecuencia de pertenencia por periodo, bajo una dirección SW. (a) Vista Vista Isométrica. (b) Vista en Planta . . . . .	61
5.21. Estrategia de agendamiento a través de las peores ganancias, dirección NE . . . . .	62
5.22. Resultado de agendamientos de bloques, a través de las peores ganancias, dirección NE. (a) Vista Vista Isométrica. (b) Vista en Planta . . . . .	62
5.23. Estrategia de agendamiento a través de las peores ganancias, dirección SW . . . . .	63
5.24. Resultado de agendamientos de bloques, a través de las peores ganancias, dirección NE. (a) Vista Vista Isométrica. (b) Vista en Planta . . . . .	63
6.1. Planes de producción de acuerdo a estrategias y dirección. (a) Dirección NE. (b) Dirección SW	65
6.2. Incertidumbre de Finos contenidos de Cu por periodo y estrategia de agendamiento. (a) Dirección NE. (b) Dirección SW . . . . .	66
6.3. Gráfico de VAN Acumulado, por estrategia dirección NE . . . . .	67
6.4. Gráfico de VAN Acumulado, por estrategia dirección SW . . . . .	67
6.5. Gráfico de violín, para cada estrategia de agendamiento. (a) Dirección NE. (b) Dirección SW	69
9.1. Bloques evaluados por nivel. . . . .	80
9.2. Histogramas de frecuencias de asignación, para distintos bloques, cota 3,570 [m]. (a) Dirección NE. (b) Dirección SW . . . . .	81

9.3. Histogramas de frecuencias de asignación, para distintos bloques, cota 3,630 [m]. (a) Dirección NE. (b) Dirección SW . . . . .	81
9.4. Histogramas de frecuencias de asignación, para distintos bloques, cota 3,720 [m]. (a) Dirección NE. (b) Dirección SW . . . . .	82
9.5. Histogramas de frecuencias de asignación, para distintos bloques, cota 3,780 [m]. (a) Dirección NE. (b) Dirección SW . . . . .	82
9.6. Histogramas de frecuencias de asignación, para distintos bloques, cota 3,810 [m]. (a) Dirección NE. (b) Dirección SW . . . . .	83
9.7. Histogramas de frecuencias de asignación, para distintos bloques, cota 3,840 [m]. (a) Dirección NE. (b) Dirección SW . . . . .	83
9.8. Asignación de bloques por periodos, por agendamiento tradicional, sección piso. (a) Dirección NE. (b) Dirección SW . . . . .	84
9.9. Asignación de bloques por periodos, por agendamiento por índice de recurrencia, sección piso. (a) Dirección NE. (b) Dirección SW . . . . .	84
9.10. Asignación de bloques por periodos, por agendamiento por índice de recurrencia, sección piso. (a) Dirección NE. (b) Dirección SW . . . . .	85
9.11. Asignación de bloques por periodos, por agendamiento por VAN-VaR, sección piso. (a) Dirección NE. (b) Dirección SW . . . . .	85

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Introducción

La minería es la actividad de extracción de minerales que están en el subsuelo bajo una determinada secuencia a fin de maximizar el flujo descontado (**Hustrulid y Kutchta 2006**). Planificar esta secuencia de extracción requiere de un conocimiento de la disponibilidad de mineral que está dominado por la incertidumbre del muestreo y a los métodos de estimación que definen la ley del mineral en cada ubicación. Estas estimaciones están sujetas a valores promedios que no describen la incertidumbre geológica inherente sobre el depósito. Si se define la vida de una mina como un cronograma de producción, es de vital importancia analizar las distribuciones de incertidumbre en el contenido de mineral a lo largo del tiempo. La suposición de conocimiento perfecto dado por un solo modelo de estimación de mineral, es una práctica limitada, incapaz de evaluar la incertidumbre geológica local, la cual relaciona el contenido de metal y valor económico de los bloques en el espacio, (**Marinho 2009**).

El testimonio anterior se enlaza con el escenario actual de la minería chilena, donde los depósitos que se encuentran más a la superficie han sufrido un constante desgaste producto de décadas de explotación intensiva por cielo abierto, en contraposición al potencial que ha ido adquiriendo los depósitos en profundidad. Los reportes efectuados por la Comisión Chilena del Cobre, indican que, dado a los últimos descubrimientos de los depósitos evaluados, solo un 20,6 % presenta una mineralización económica en superficie y el resto se encuentran a profundidades mayores a 600 metros. Considerando lo anterior hoy toman fuerza los métodos de explotación subterráneo del tipo caving, debido a su gran tasa de producción y bajo costo de operación, pasando a ser los seleccionados por grandes proyectos mineros. Los métodos por hundimiento, son una técnica de explotación subterránea que utiliza la gravedad para fragmentar el macizo rocoso, la que se propaga de forma vertical generando una columna de material esponjado que es extraído por puntos de extracción ubicados en la parte inferior. Comparando este método con la extracción por cielo abierto, los métodos por hundimiento poseen una alta restricción en cuanto a definir las metas de producción, ya que, para este tipo de minas, las secuencias de extracción están sujetas a mantener una estabilidad geomecánica, y de una continuidad en la extracción. Dentro de estos métodos, está el Panel Caving que permite el hundimiento continuo a través de

aperturas de áreas que se generan de forma discreta a una gran escala, presentando ventajas comparativas con otros métodos por su mayor rapidez, ritmos de producción y alta mecanización reflejándose en sus menores costos de explotación. (Brown 2003). La definición de plan de producción, o agendamiento en un proyecto minero; corresponde a la decisión de escoger el tiempo y sector de la mina, que será minado bajo el objetivo de cumplir metas específicas de la compañía respetando las restricciones físicas de producción.

La planificación de cualquier proyecto minero implica delimitar parámetros que muchas veces son estipulados de manera determinista y que enlazan una alta variabilidad que no es considerada en los cálculos. Dimitrakopoulos (1998) , define estas incertezas y las categoriza en tres grandes grupos: (i) La incerteza proporcionada por el modelamiento del cuerpo mineralizado, en particular, de las leyes y tipo de material; (ii) La incerteza asociada a la operación y a la capacidad de minado; y (iii) la incerteza debido a factores económicos y costos de producción.

Es justamente que uno de estos parámetros que es la base de una planificación de minas, los modelos geológicos de recursos, construidos a partir de estimaciones de valores que se le atribuyen la variable espacial tales como leyes, densidad de la roca, tipo de litología, entre otras, mediante estimación geostadísticas. Esto significa que la información tomada como representación y predicción de la realidad sobre la cual se planifica y opera está conformada por un conjunto de datos exactos, pero generalmente imprecisos, producto de la escasez de información que caracteriza el recurso geológico al utilizar mallas de sondajes.

En las últimas dos décadas las investigaciones relacionadas a la planificación en donde consideran distintos escenarios de modelos geológicos (incertidumbre geológica), pertenecen en su gran conjunto al área de la minería a cielo abierto, donde ha existido un gran avance al respecto abarcando en la incorporación de esta incertidumbre en distintos horizontes de la planificación. Contrarrestando con otros métodos de explotación, específicamente en los métodos por hundimiento la situación es distinta, donde el estudio de la incorporación de la incertidumbre geológica se ha limitado básicamente en el cálculo de las reservas de mineral, esto se puede deber a la complejidad del agendamiento en sí mismo lo que dificultaría el proceso de generar múltiples escenarios, o simplemente por la suposición de que el mezclado de material que ocurre durante el flujo gravitacional, disminuye la importancia de esta incertidumbre geológica en la evaluación de un plan minero.

Uno de los problemas más relevantes que afectan hoy en día el negocio minero es la desviación de los planes productivos y los resultados de operación, que son reflejado en altos porcentajes de variabilidad en el cumplimiento de metas productivas, malas conciliaciones, alto impacto en los casos reales de operación, y en particular, en lo que respecta la planificación de largo plazo, una gran dificultad para estimar oportunidades de negocio y valorizarlos de manera adecuada.

## **1.2. Descripción del problema**

La incertidumbre asociada a la cantidad de tonelaje y leyes del recurso geológico es un factor clave en el análisis de riesgo y la toma de decisiones de la industria minera. Las técnicas de estimación de los recursos

comúnmente usadas en la industria no son del todo satisfactorias. Si bien las técnicas geostatísticas como el kriging proveen una medida de la varianza del error asociada a la estimación de las leyes, resulta ser poco atractiva al no depender de los valores de los datos sino del arreglo geométrico de éstos. Otro defecto de estas técnicas es que no logran capturar la variabilidad real del fenómeno, dando como resultado un modelo más suave (menos disperso) que la realidad.

A consecuencia de lo anterior los valores estimados son menos dispersos que los reales y puede tener sesgo al momento de estimar una función no lineal de la variable en estudio, por ejemplo, tonelaje, metal, ley media sobre una ley de corte. Un modo de abordar la caracterización de la incertidumbre en leyes y en la aparición de cierta unidad geológica, es a través del concepto de simulaciones condicionales, cuyo objetivo es generar numerosos modelos estocásticos del yacimiento homologables a la realidad, es decir, cada modelo reproduce ciertas características presentes en los datos junto con respetar los valores en los sitios de muestreo. Cada modelo corresponde a un escenario de una potencial realidad. Comparando numerosos escenarios se logra cuantificar la incertidumbre en los valores de la variable de interés y su variabilidad en los sitios no muestreados.

Los modelos de incertidumbre a través de simulaciones condicionales buscan caracterizar los valores desconocidos de la variable regionalizada no por estimaciones, sino que por distribuciones de probabilidad. Capturar la variabilidad local, que presenta el yacimiento con la información que se tiene en el momento de generar un plan, permite generar un análisis de riesgo a las directrices de agendamiento que se desean evaluar.

Para una mina de tipo caving, preguntarse el cómo y dónde empezar la secuencia de minado, va de acuerdo a una multitud de variables que no solo depende de los sectores de las mejores leyes, sino también de la calidad del macizo rocoso que permita generar un caving lo más temprano posible, futuros desarrollos de infraestructuras y/o componentes de esfuerzos que hacen generar un caving más seguro. Sin embargo, una variable que no ha sido tomada en cuenta al momento de iniciar un proyecto minero de este tipo es la incertidumbre de las leyes asociadas. Más aun cuando se debe tomar la decisión del sector en cual se va empezar a minar, esta decisión tiene un gran impacto en la sensibilidad del VAN de la mina, ya que corresponde a los primeros periodos del flujo económico de la misma. Es ahí donde se presentan las mayores oportunidades de mejoras, por lo tanto, tener en ese momento una mejor calidad de información sobre el proyecto permite a largo plazo un mejor plan.

Este estudio pretende investigar cómo impacta la incertidumbre de las leyes en un proyecto de Panel Caving, para un depósito altamente masivo y homogéneo, donde en la toma de decisión del punto de inicio de la secuencia de extracción se incorpora la incertidumbre geológica a través simulaciones condicionales.

Esta variabilidad de las leyes es capturada en distintos planes de extracción bajo una misma dirección considerando 100 escenarios de leyes en el plan de producción, en la cual permiten obtener bajo una cierta confiabilidad si esa dirección de minado es la que presenta una mayor variabilidad o no en el agendamiento. A la vez se utiliza distintas estrategias para incorporar esta incertidumbre en el agendamiento de minado, a fin de comparar cada de una de ellas y observar si existe una variabilidad en el plan de alimentación de acuerdo a

la función objetivo utilizada.

La principal dificultad de este trabajo de investigación no solo está en capturar todas las precedencias que involucran una extracción por Panel Caving, sino que replicarlo para cada uno de los escenarios en un tiempo prudente como para llevarlo a cabo en la industria.

## **1.3. Objetivos**

### **1.3.1. Objetivo general**

Proponer una metodología que genere un agendamiento de acuerdo a una dirección, para una mina de panel caving, atendiendo a un conjunto de realizaciones de leyes simuladas, manteniendo las restricciones de operación como: aperturas de áreas, direccionamiento, control del caveback y ritmos de producción por periodo, a fin de comprender la importancia que genera la incertidumbre geológica en la evaluación de un proyecto de panel caving.

### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Analizar la influencia de la incertidumbre geológica en distintas tomas de decisión que conllevan en la planificación de largo plazo en Panel Caving.
- Implementar distintas técnicas de incorporación de la incertidumbre geológica contenida en el modelo de bloques hacia el plan minero.
- Buscar la mejor orientación de minado para una mina de panel caving involucrando la incertidumbre geológica en la decisión.
- Implementar una evaluación de riesgo económico para cada plan minero.

### **1.3.3. Alcances**

En este trabajo, se definen los siguientes alcances dentro de su planteamiento y desarrollo.

- La incertidumbre geológica es manifestada como un conjunto de 100 escenarios de leyes dentro del modelo de bloques.
- Los parámetros como precios, costos, capacidad de producción se mantienen constantes y no se le integra incertidumbre en la evaluación.
- El ejercicio conlleva definir dos direcciones de hundimientos opuestas.
- Se asume un modelo estático en el agendamiento de extracción, es decir, no existe mezclado de material durante el plan minero.

- El agendamiento se limita solo al interior de la envolvente económica definida.
- A pesar de la relevancia de los aspectos de la dilución (sustancialmente la dilución lateral) en la toma de decisión del direccionamiento, este análisis se excluye de este trabajo. Debido a que el enfoque es generalizado y no busca evaluar de manera independiente las singularidades de cada caso. Por lo tanto, se considera un modelo estático en el agendamiento.

## 1.4. Organización de la tesis

Los contenidos del resto de la tesis se encuentran desarrollados en los siguientes capítulos:

**Capítulo 2.** Problemas de la planificación de la producción de largo plazo. Se presenta la definición del problema que interesa en este trabajo de tesis. Se hace una descripción por separado de cada uno de los criterios que deben ser evaluados al momento de la obtención de un plan de producción para el largo plazo en una mina de panel caving.

**Capítulo 3.** Revisión bibliográfica. Contiene una síntesis de los conceptos fundamentales del trabajo de investigación. Además de un análisis de trabajos anteriores relacionados al agendamiento en minería subterránea específicamente a los métodos por hundimiento y también una discusión de los modelos que capturan la información de la incertidumbre geológica en minería subterránea.

**Capítulo 4.** Metodología. Se presenta la metodología y procedimiento utilizado para obtener los resultados de esta tesis. En ella, se describen los modelos de optimización matemática que se utilizarán para generar el plan de producción, el caso de estudio, y el método de resolución en la optimización.

**Capítulo 5.** Caso de Estudio. A partir de modelo de bloques que presenta un conjunto de simulaciones condicionales, se desarrolla las distintas estrategias de agendamiento propuestas en esta investigación, a fin de comparar en un caso práctico, la evaluación y decisión de dirección de minado más idónea, en función de maximizar el beneficio y minimizando el riesgo.

**Capítulo 6.** Análisis de resultados. De acuerdo a los planes de producción obtenidos en el caso de estudio, se evalúa a través de indicadores el desempeño de cada estrategia utilizada.

**Capítulo 7.** Conclusión y trabajos futuros. Se presentan las conclusiones del trabajo y las posibles extensiones para trabajos futuros.

## Capítulo 2

# Problema de la planificación de la producción de largo plazo en minas de hundimiento

### 2.1. Minería Subterránea

Los yacimientos profundos involucran una alta tasa de razón estéril y mineral, para un método de explotación como el cielo abierto, donde aumenta considerablemente los costos asociados a la extracción de material, y a esto también se le suma que las normativas medioambientales son cada vez más estrictas y además el impacto visual que genera una extracción por superficie es mucho mayor que por una subterránea. Es por ello que los métodos subterráneos presentan una gran variedad de ventajas, cuando el depósito mineral está a una considerable profundidad, sin embargo, la principal desventaja es que en comparación con el open pit los rangos de capacidad de producción son más acotados. Existen distintos métodos subterráneos, para extraer el mineral de acuerdo a la morfología del depósito, condiciones geotécnicas y distribución de leyes del yacimiento, pero tales métodos presentan ventajas y desventajas en sus operaciones.

Es por ello que (**Hamrin 1982**) propuso agrupar estos métodos de explotación en 3 grupos.

- Métodos auto soportados: Estos métodos corresponden a aquellos en que se extrae el mineral cediendo una cavidad que se debe mantener estable de forma natural. En esta clasificación figuran los métodos de explotación como el Room and Pillar, Stope and Pillar y Sublevel Stopping.
- Métodos soportados artificialmente: En estos métodos se utiliza material de relleno para generar soporte, es un método de alto costo y está asociado a la minería selectiva. En este grupo se encuentra el Cut and fill Stopping, Bench and Fill y Shrinkage Stopping.
- Métodos de hundimiento: Son aquellos que no consideran la aplicación de soporte alguno, ya sea a través de pilares o relleno. Son métodos de explotación masiva que aprovechan el hundimiento gravitacional, ya sea natural o inducido, del cuerpo mineral. Son métodos mecanizables de bajo costo de explotación.

Los métodos típicos son: Longwall Mining, Block/Panel Caving y Sub-Level Caving.

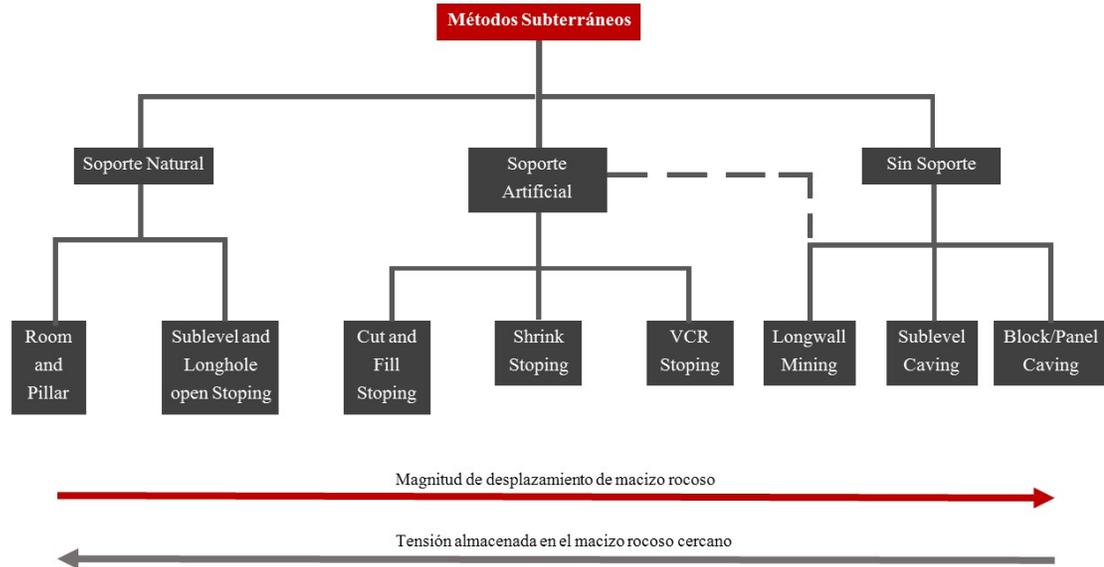


Figura 2.1: Clasificación de métodos subterráneos. Fuente: Adaptado de (Brown 2003)

### 2.1.1. Método de explotación Block/Panel Caving

El uso de métodos masivos de explotación ha ido en incremento dada a la ventaja de economía de escala que se genera para la industria minera. Dentro de los métodos subterráneos, la minería por hundimiento es considerado como apropiado por sus bajos costos y altos ritmos de producción que pueden ir en rangos de 10.000 a 150.000 toneladas al día. El principio de los métodos por hundimiento está en romper el equilibrio de los esfuerzos que se presentan en la corteza terrestre, generando un vacío que permita una redistribución de los esfuerzos. Esta cavidad dependerá de su extensión, de la competencia de la roca y orientación de los esfuerzos. La socavación se propaga a través de un corte basal en la cota donde se ubica el nivel de hundimiento y el material quebrado es retirado en puntos de extracción a través de vehículos de carga y transporte (LHD) o por métodos manuales (Grizzly)(Brown 2003) .

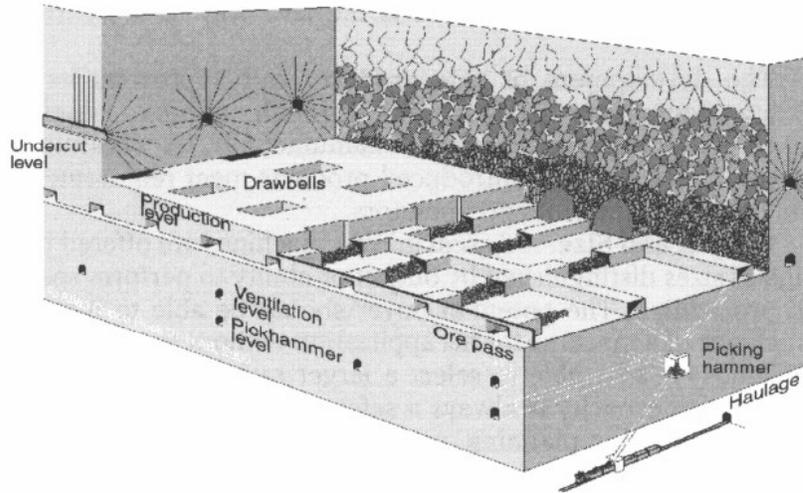


Figura 2.2: Esquema de explotación Block Caving. Fuente: (Brown 2003)

Si bien el Block Caving ver figura (2.2) y el Panel Caving ver figura (2.3), ambos llamados métodos PC/BC, usan el mismo principio de hundimiento, no son métodos iguales.

El Block Caving socava totalmente el bloque a hundir realizando un corte basal por completo y extendiendo el Caving de forma vertical. Es un método de bajo costo y con un alto grado de automatización (Tota 1997). Sin embargo, se requiere de un alto grado de inversión en infraestructura y de desarrollo para entrar en producción. Históricamente, este método es usado en yacimientos que presentan leyes bajas y un alto grado de fragmentación.

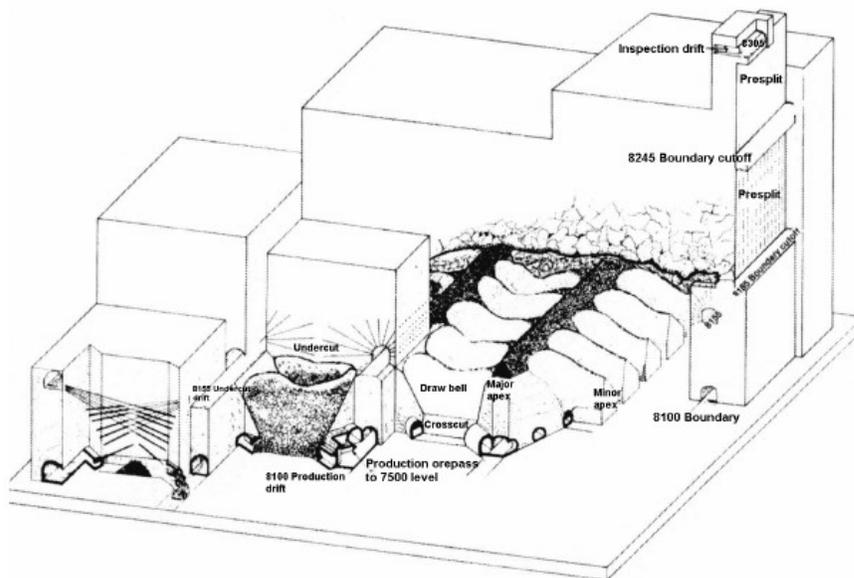


Figura 2.3: Panel Caving Mecanizado, (Brown 2003)

Por otro lado, en el Panel Caving se realiza un corte basal de manera gradual en una determinada dirección de avance, con el fin de construir y realizar la extracción a medida que el hundimiento avanza, añadiendo áreas de producción en forma de paneles, principalmente es utilizado para la extracción de mineral primario. La explotación de un área por este método se hace siguiendo una serie de pasos. Primero, se divide el área en paneles cuadrados o rectangulares cuya dimensión mínima se relaciona con la hundibilidad de la roca y la máxima se diseña en función de parámetros operacionales y económicos. Segundo, se diseñan paneles que abarquen toda el área de un extremo a otro; en este caso, el hundimiento es un proceso continuo a lo largo del área y se deja una barrera de contención o pilar para impedir que el estéril del panel agotado diluya el mineral de la nueva explotación. Y tercero, se mantiene un hundimiento continuo en ambas direcciones sin dejar barreras ni pilares; este frente de hundimiento continuo impide la formación de puntos o líneas de alta presión, generando menos problemas de estabilidad.

(**Tobie y Julin 1998**) analizaron las ventajas y desventajas de los métodos por hundimiento. Dentro de las ventajas están: i) El bajo costo de minado comparado con otros métodos subterráneos, obteniendo un ahorro en perforación, tronadura y en desarrollos.; ii) Un mejor control operacional en el área de producción presentando un alto nivel de producción y de seguridad; iii) Mejor control en el sistema de ventilación; iv) Altos ritmos de producción; y v) Es apropiados para depósitos masivos de baja ley. Dentro de las desventajas, destacan: i) Se necesita una gran cantidad de tiempo y de dinero para entrar en producción; ii) Parte del Opex utilizado es destinado en mantención de las calles y de los puntos de extracción; iii) Puede existir una baja recuperación de mineral; iv) No es tan flexible para aumentar la producción debido a un incremento de la demanda del producto, debido a los altos tiempos de preparación para nuevos sectores de explotación; v) Este método no es posible de combinar con otros métodos subterráneos.

## 2.2. Planificación Minera

Para entender el concepto de planificación minera, se debe puntualizar que la industria minera está conformada por distintos procesos productivos, como lo son la exploración, planificación, extracción, transporte y proceso del mineral. Una característica común de las distintas operaciones mineras, es la gran inversión que es necesaria para la puesta en marcha del proyecto, consecuentemente, cualquier mejora en las etapas tempranas del proyecto puede repercutir en un incremento en el valor actual neto del mismo. Por lo tanto, se entiende la planificación minera como el conjunto de actividades necesarias para realizar la programación de la producción de las reservas mineras, en función de criterios técnicos y económicos. A su vez, (**Rubio 2006**) define a la planificación minera, como el proceso de ingeniería en minas mediante el cual el recurso mineral se transforma en el mejor negocio productivo del dueño. La planificación minera se clasifica, según el nivel de decisiones que deben llevarse a cabo, en tres etapas (i) la planificación a largo plazo, desarrolla la estrategia de la operación minera, en la cual define la envolvente económica método de explotación y ritmos de extracción (ii) la planificación mediano plazo, se prepara para adaptar los alineamientos de la planificación de largo plazo, en donde se producen los planes de producción que permiten definir las metas de producción definidas;

(iii) la planificación de corto plazo, se encarga de cumplir los indicadores productivos y de recopilar la información operacional de modo de retroalimentar al largo plazo, (Alarcon 2014) . Otro concepto propuesto por (Chanda 1990), indica que el beneficio de crear un plan de producción está en optimizar la recuperación del mineral, reducir los costos, incrementar la utilización de los equipos, mantener los ritmos de producción a tope y de ingresar material a proceso de buena calidad.

## **2.3. Criterios de secuencias de explotación**

Por definición un proyecto minero presenta varias etapas de estudios e ingenierías que se deben realizar antes de la puesta en marcha, en este sentido la ingeniería conceptual resulta ser la más importante, debido a que en esta etapa se toman las grandes decisiones y se establecen las consideraciones técnicas generales para dar respuesta a las interrogantes de viabilidad y factibilidad técnica de explotación, en donde los aspectos geomecánicos y valor del proyecto son relevantes. La secuencia corresponde a la dirección en la cual comenzara la extracción de los bloques a producción que están en la envolvente económica, se toman en cuenta parámetros técnicos y económicos, y se extrae el máximo de material cuyas leyes de corte sean mayores o iguales a las planeadas.

### **2.3.1. Aspectos geomecánicos en el punto de inicio del caving**

Para la minería de caving, el inicio de la explotación, es uno de los temas con mayor relevancia para la definición de los hitos de un proyecto. Se puede realizar de forma natural o inducir la propagación del hundimiento, esta toma de decisión dependerá del riesgo sísmico asociado al sector. La propagación del caving se puede dar bajo dos condiciones; la primera es con cara libre, es decir, se presenta un sector ya explotado o de una cara libre inducida (slot), la ventaja que tiene la propagación por este método está que en las existen condiciones geomecánicas más favorables en la propagación del hundimiento, manifestada en un tiempo para llegar a estado de régimen mucho menor y con un comportamiento sísmico mucho más benigno. El otro caso que se puede dar, es la del caving completamente virgen, la cual tiene relación con la hundibilidad que se debe generar a partir de una dimensión crítica para propagar el caving en altura. Dentro de los consejos geomecánicos para el inicio de caving virgen, está en escoger las unidades geotécnicas que presenten una buena hundibilidad, es decir, material primario con una mayor cantidad de vetillas con rellenos blandos, y fragmentación fina. El otro consejo está en encontrar aquel sector que presente una menor altura de roca primaria sólida, ya que a mayor altura de roca la condición de riesgo sísmico del sector aumenta.

### **2.3.2. Aspectos geomecánicos en la secuencia de explotación**

Bajo el punto de vista de la estabilidad de las frentes en relación a sus dimensiones, la formación de frentes activos excesivamente planos y extensos, genera un desconfinamiento excesivo delante del frente de socavación y simultáneamente, se producen mayores concentraciones de esfuerzos en sus extremos, aumentando la

posibilidad de ocurrencia de daños locales. Para esto de acuerdo a las experiencias obtenidas en terreno, aquellas operaciones que han trabajado con frentes únicas de gran tamaño (entre 600 y 700 metros), han presentado problemas geomecánicos y mayores interferencias operacionales. Es por ello que, de acuerdo a criterios de expertos, no se recomienda utilizar frentes mayores a 300 metros.

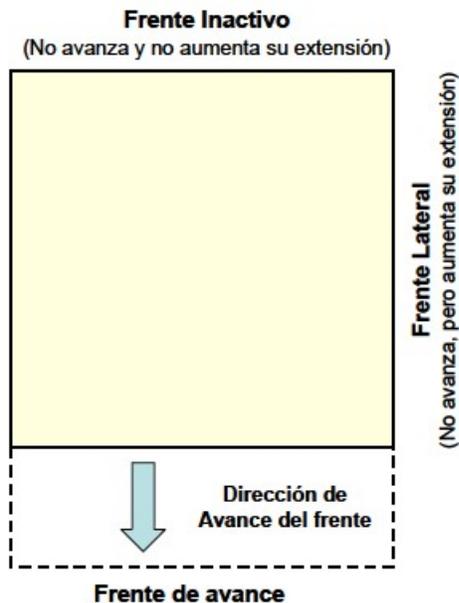


Figura 2.4: Distintos términos que interfieren en la geometría de frentes. Fuente: (Guía de diseño Codelco 2006)

Con respecto a la orientación de la frente de hundimiento, debe orientarse en 90 (con una tolerancia  $\pm 30$ ), de acuerdo a la dirección del esfuerzo principal mayor, ya que en la zona de concentración de esfuerzos delante de la frente de socavación, será más benigna. Este criterio es idéntico respecto a los entes estructurales principales, el objetivo principal es reducir la concentración de esfuerzos entre dichos entes estructurales y el área hundida. En el caso de que se presenten distintas familias de estructuras con distintos rumbos y no es posible orientar la frente perpendicular a todos los entes estructurales, se debe evitar formar ángulos menores a 25.

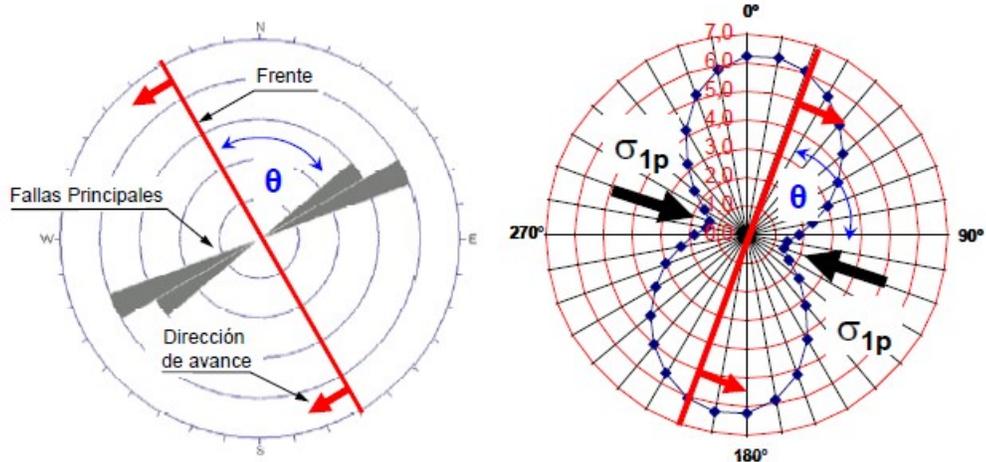


Figura 2.5: Orientación del frente en función del estado tensional preminería (donde  $1\sigma\rho$  es la proyección de  $1\sigma$  en el plano del nivel de hundimiento) y entes estructurales. Fuente: (Guía de diseño Codelco 2006)

Con respecto a la definición de la frente se deben cumplir con reglas generales que aseguran un correcto control de la estabilidad geomecánica. Es decir, el frente de socavación debe presentar una forma cóncava en su avance, escalonada y sin gran extensión a fin de inducir un confinamiento estructural en torno a la frente de hundimiento, ver figura (2.6.b). Un frente convexo induce tracción y, por lo tanto, reduce la resistencia del macizo, ver figura (2.6.a).

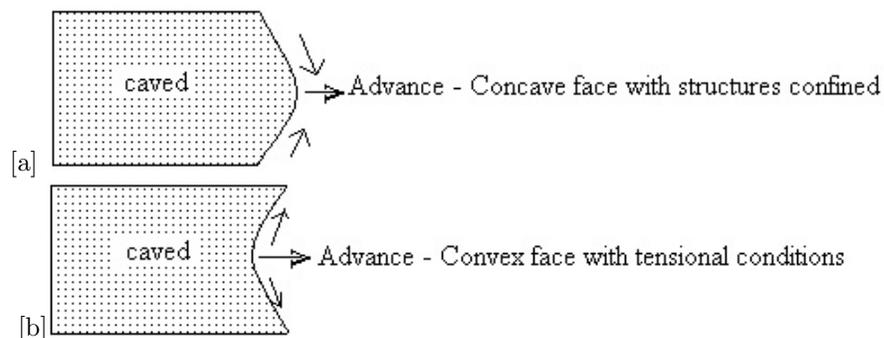


Figura 2.6: Geometrías de frente en un block/panel caving. Fuente: (Laubscher 2000)

### 2.3.3. Control de caveback en la secuencia de explotación

En su forma general se puede entender como caveback al límite que existe entre el material quebrado y el material insitu en el proceso de hundimiento. Mantener su control es uno de los factores claves en la operación minera de panel caving, su control esto se realiza a través de razones de extracción por punto y la tasa de incorporación de área.

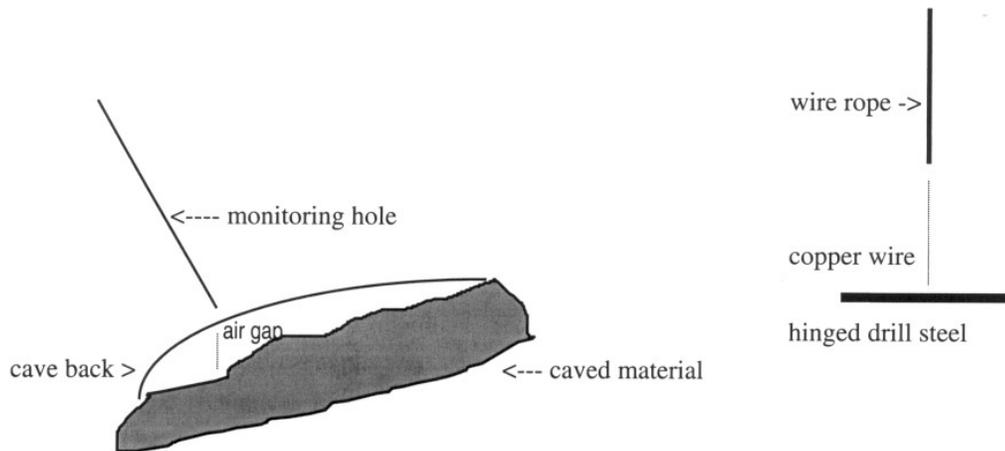


Figura 2.7: Esquema sobre el monitoreo del caveback. Fuente: (Laubscher 2000)

Un manejo inadecuado del caveback puede derivar en inestabilidades geomecánicas, como lo son estallidos de rocas y colapsos en los niveles productivos de esfuerzos inducidos en el nivel de producción. El ángulo de extracción se considera entre la próxima batea a ser incorporada a la producción y el último punto de extracción en quiebre (zona de extracción en quiebre, menor al 30% de extracción de la altura sólida de mineral primario). Se mide a cota piso del Nivel de Hundimiento, desde el centro de la batea a ser incorporada, y en la dirección de avance del frente de hundimiento.

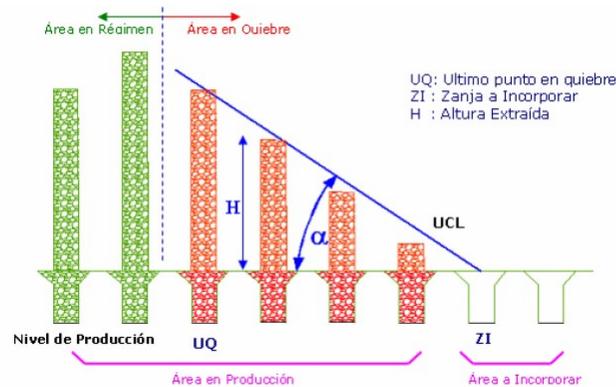


Figura 2.8: Esquema de medición del ángulo de extracción. Fuente: (Salgado 2009)

Empírica y analíticamente, se ha estimado que al extraer un 30% de la columna sólida de roca primaria se logra quebrar completamente dicha columna. En consecuencia, la velocidad de extracción se encuentra en función creciente respecto a la columna de mineral primario, debido a que la actividad sísmica (que representa el quiebre), va creciendo en altura a medida que la extracción aumenta. Su valor varía, en general, entre 30° a 45° y relaciona la velocidad de extracción con la velocidad de socavación, debido a que el ángulo de extracción se origina por el vector de extracción y el vector de socavación. Si la velocidad de socavación aumenta, este ángulo disminuye, pero si esta velocidad aumenta en la misma magnitud que la velocidad de

extracción, el ángulo no cambia y la restricción se cumple. El ángulo de extracción es uno de los parámetros más importantes, junto con el desfase de frente extracción/socavación, en el control del desarme progresivo del volumen activo, por lo tanto, mantener este parámetro regulado es de vital importancia para asegurar la producción de un sector.

### 2.4. Fuentes de incertidumbre en la planificación minera

En la planificación minera se distinguen distintas fuentes de incertidumbre, las cuales se clasifican según su origen, pudiendo ser internas (endógenas) o externas (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, (Rudloff 2013) .

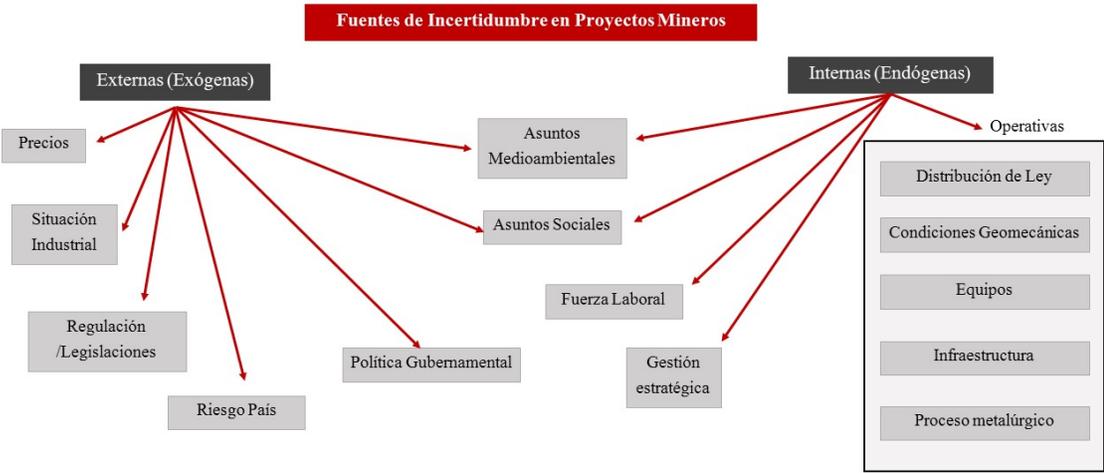


Figura 2.9: Fuentes de incertidumbre en proyectos mineros. Fuente: Adaptado de (Brady y Brown 1992)

Dentro de las fuentes de incertidumbre endógenas está la incertidumbre geológica, que 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. Entendiendo por variable regionalizada, a la variación espacial de ciertas magnitudes las cuales se dan de forma natural. 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 2009).

Además, otra de las fuentes de incertidumbres internas, es la del tipo operacional, que tiene relación con la realidad de la operación, específicamente respecto al uso de los equipos y recursos humanos, donde se

encuentran limitados por la variabilidad de los rendimientos, disponibilidad de recursos, posibilidad de fallas y condiciones climáticas. Y por último, las fuentes de incertidumbres externas tienen relación con la incapacidad de predecir con exactitud cómo se comportarán 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.

## 2.5. Uso de las simulaciones de leyes en la planificación minera

A lo largo del proceso de la planificación minera se hacen estimaciones a fin de modelar el recurso mineral, por ejemplo modelos geológicos, y leyes minerales. Sin embargo, en la realidad estos parámetros no son deterministas y su caracterización es muy difícil por la escasez de información. El desconocimiento que se tiene de la zona mineralizada se trata de remediar mediante el uso de sondajes que toman muestras del yacimiento y técnicas geoestadísticas que buscan una representación de las zonas no muestreadas, luego, el modelo de bloques que alimenta las etapas de planificación de la producción minera es una estimación de la realidad, produciendo discrepancias entre las producciones planificada y real e implicando un riesgo que debe ser controlado.

Durante el proceso de estimación de leyes de mineral se distinguen dos tipos de fuentes de variabilidad en la estimación de recursos y reservas, la primera es la variabilidad propia del yacimiento producto de su génesis, y la otra es la variabilidad introducida artificialmente por errores de muestreo. Esta variabilidad geológica, representa el grado de ignorancia que se tiene de la caracterización mineralógica, en particular, de los distintos tipos de material y de sus respectivas concentraciones. El principio de una simulación consiste en reproducir la continuidad/variabilidad espacial de la variable regionalizada, de manera de representar las características estadísticas relevantes de la mineralización. Este proceso genera un modelo numérico del yacimiento, el que reproduce la realidad otorgando valores simulados con iguales parámetros estadísticos, principalmente en términos de histograma y variogramas asociados, a diferencia del método de interpolación por kriging que conducen una imagen suavizada de la realidad.

(Ortiz 2006), indica que las distribuciones de probabilidad condicional describen la incertidumbre que se tiene localmente sobre los valores de la variable regionalizada, tomando en cuenta los valores de los datos circundantes. Por ejemplo, en un sector que contiene muestras, no hay incertidumbre y se obtiene el valor del dato en todas las realizaciones. En cambio, si nos alejamos del sector muestreado la distribución condicional se parece a la distribución a priori, es decir, se vuelve menos condicional a los datos muestreados. Por lo tanto, la incertidumbre se ve representada como un conjunto de escenarios generados por una simulación condicional, la que busca construir mapas de valores que reproducen la variabilidad real de la variable. Estos escenarios guardan el efecto proporcional de la correlación espacial, es decir, aquellos sectores con valores extremos presentan una mayor variabilidad, sin embargo, si en ese sector con valores extremos presenta una

alta correlación con los datos condicionantes la variabilidad disminuye.

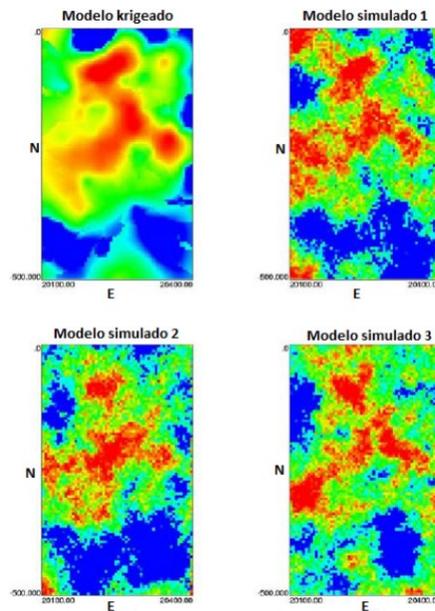


Figura 2.10: Mapas obtenidos por kriging (arriba izquierda) y por simulación gaussiana secuencial (tres modelos restantes). Fuente: (Ortiz 2006)

Cada realización constituye un escenario posible de lo que “podría ser” la variable regionalizada en estudio, por lo que se puede trabajar con ella como si fuera la realidad y obtener una respuesta insesgada al problema planteado. Con un conjunto de realizaciones, se obtiene un conjunto de respuestas que reflejan la incertidumbre que podría haber en la respuesta real desconocida. En cambio, la respuesta del modelo del kriging podría estar sesgada, debido a que el kriging no posee la misma distribución que la variable real.

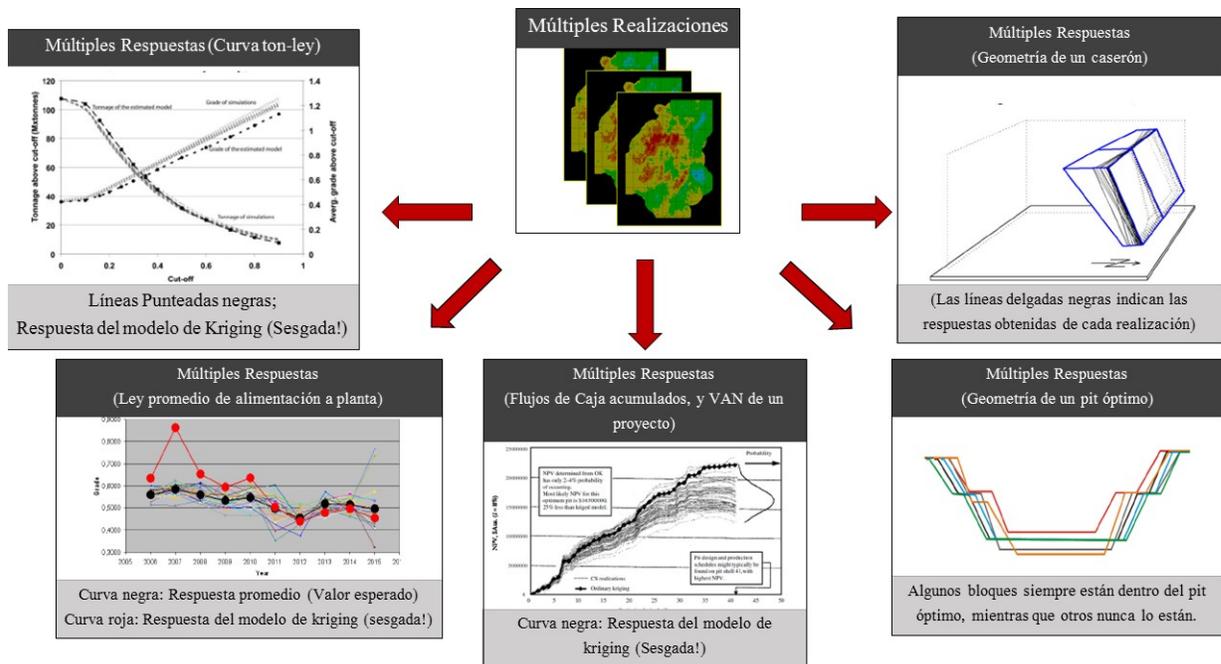


Figura 2.11: Esquema de las aplicaciones de las simulaciones de leyes. Fuente: Adaptado de los apuntes de ALGES

Dentro de las aplicaciones del uso de las realizaciones en el contexto minero se encuentran:

- La evaluación de incertidumbre en los recursos recuperables sobre una determinada ley de corte (respuestas asociadas a la curva de tonelaje –ley en varias realizaciones vs el modelo de kriging)
- Evaluación de la incertidumbre en el cumplimiento de metas de producción de largo plazo (respuestas asociadas en ley de alimentación a planta calculadas en varias realizaciones vs el modelo de kriging)
- Evaluación de la incertidumbre en flujos de caja y van de un proyecto (respuestas asociadas en flujos de caja acumuladas calculadas por realización vs el modelo de kriging)
- Evaluación de la incertidumbre en la geometría del pit óptimo (respuesta de la geometría del pit final para cada realización)
- Evaluación de la incertidumbre en la geometría de un caserón (respuesta de la geometría de un caserón calculada para cada realización)

## 2.6. Planificación minera bajo incertidumbre

La minería es diferente a la mayoría de las otras industrias, la razón se encuentra en que el conocimiento del producto que se desea vender, se basa esencialmente en estimaciones, que por su propia naturaleza proporcionan un grado de incertidumbre. Los precios de las materias primas, y los costos asociados a la

extracción, generan en gran medida fluctuaciones en los ingresos que se ve reflejado en el tamaño del inventario de minería eficiente es aquella que toma control de estos riesgos. Un plan de producción es el mecanismo crítico en un proyecto minero, donde el ideal es el manejo efectivo de la producción y del flujo de caja que muchas veces está en escalas de millones de dólares. La importancia de incorporar la incertidumbre y el riesgo desde lo técnico, geológico, y mineros en el agendamiento, es de particularmente controlar la variabilidad perteneciente a la ley presente en el yacimiento y calidad del mineral. Durante la última década, el desarrollo de métodos que permitan realizar optimización estocástica, han logrado incorporar la incertidumbre geológica en el plan de la vida mina de diversos proyectos open pit, esto se contrarresta con el escaso avance con respecto a esta misma área, pero en minería subterránea.

## 2.7. Introducción medida de riesgo

Al ejecutar evaluaciones que atienden a diversas fuentes de incertidumbres, es útil considerar el impacto de la variabilidad que ellas son capaces de generar. Por tal razón existen herramientas que ayudan a la toma de decisión que contrarrestan el beneficio económico y riesgo de sufrir pérdidas. Una de las medidas de riesgos utilizadas ampliamente es el *VaR* (Value at Risk)(Linsmeier y Pearson 1996), que en términos generales corresponde a la pérdida máxima que ocurre por periodo de tiempo en específico a un nivel de confianza dado. Como una explicación formal el *VaR* a un nivel de confianza  $\alpha$  denotado  $\alpha - VaR$ , es la máxima pérdida potencial de un portafolio de inversión con un nivel de nivel de confianza  $\alpha$ . Si denotamos con la variable aleatoria “ganancias y pérdidas de alguna inversión”, con  $f(x)$  la función de densidad de probabilidad de  $X$  y con  $F(x)$  su distribución de probabilidad acumulativa, entonces el *VaR* de  $X$  a un nivel de confianza  $\alpha$ , con  $0 \leq \alpha \leq 1$ , está dado por:

$$VAR_{\alpha} = \min z \mid F_x(z) \geq \alpha \quad (2.1)$$

En otras palabras el  $VAR_{\alpha}$  corresponde al peor valor que se puede obtener de la variable aleatoria cuando se descarta el  $(1 - \alpha)\%$  de las peores pérdidas.

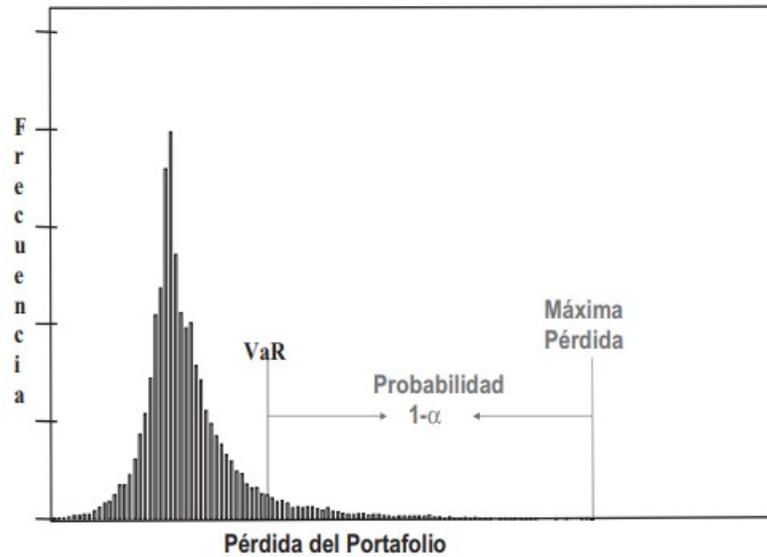


Figura 2.12: Cálculo del VaR para una distribución de las peores pérdidas

Dentro de las virtudes del VaR está que es una medida simple de utilizar y muy reconocida en el estándar de la industria financiera, sin embargo, tiene la deficiencia de ser una medida poco coherente cuando se analizan elementos que no tienen una distribución normal, cuando las colas de las distribuciones son más anchas y la pérdida esperada aumenta, en estos casos el VaR subestima la peor pérdida.

### 2.7.1. Ejemplo de aplicación, medida de riesgo en la planificación minera

Para el cálculo del VaR, existen diversas metodologías en las que destacan tres: (i) la analítica/paramétrica, utiliza datos de rentabilidad estimados y asume una distribución normal de la rentabilidad; (ii) la simulación histórica, utiliza datos históricos; (iii) y la simulación de Montecarlo, se generan cientos o miles de posibles resultados según los datos iniciales que introduce el usuario.

A pesar de que el VaR es un instrumento financiero, es posible utilizar el VaR como una herramienta para evaluar el riesgo asociado a un plan minero.

Por ejemplo, se cuenta con una decisión de plan de minado, este plan es valorizada en función de las 100 simulaciones de leyes, obteniendo 100 valorizaciones distintas par el mismo plan. Cada una de estas valorizaciones están descontadas por el factor de temporalidad producto del agendamiento de extracción del mineral.

Por lo tanto, el objetivo de utilizar esta herramienta bajo el contexto de evaluación de riesgo es de obtener bajo una probabilidad determinada, la peor ganancia que se pueda obtener si se aplica este plan de producción, considerando el conjunto total de las valorizaciones de las leyes simuladas.

Entonces, se tiene un plan minero con un agendamiento de bloques, en la cual contiene una muestra de  $N$

simulaciones condicionales, en que cada uno de ellas representan  $N$  ganancias,  $G_1, G_2, G_3, \dots, G_N$ . A continuación, se ordenan los valores de menor a mayor:

$$L_{1:N} < L_{2:N} < \dots < L_{j:N} < \dots < L_{N:N} \quad (2.2)$$

Donde  $L_{1:N}$  es la peor ganancia observada en la muestra simulada de tamaño  $N$ ,  $L_{2:N}$  es la segunda mayor ganancia, y así sucesivamente.

Es así que para una estimación del VaR por simulación para un nivel de confianza  $p$ , viene dado por:

$$\text{VAR}(p) = L_{j^*:N} \quad (2.3)$$

donde  $j^*$  es el número entero que satisface la siguiente condición.

$$\frac{j^* - 1}{N} < 1 - p \leq \frac{j^*}{N} \quad (2.4)$$

Para muestras de tamaño 100, 260, 520 y niveles de confianza del 95 % y 99 %, podemos construir el siguiente cuadro para el VaR simulado:

p	n=100	n=260	n=520
0.95	L(5:100)	L(13:260)	L(26:520)
0.99	L(1:100)	L(3:260)	L(6:520)

Tabla 2.1: Tabla VaR simulado para muestras de tamaño de 100, 260 y 520 con un nivel de confianza del 95 % y 99 %

## 2.8. Proceso de Planificación en minas tipo caving

Uno de los principales objetivos de la planificación conceptual es la identificación de el o los sectores de interés contenidos en el depósito, generalmente aquellos que tienen mayor beneficio, para posteriormente

evaluarlos y determinar qué tan atractivo es el proyecto para continuar con los estudios. Para cumplir con este objetivo, el proceso de planificación considera la realización de una serie de actividades, a través del uso de técnicas y metodologías, para generar información que permita tomar decisiones asociadas al futuro y estrategia del proyecto en estudio. Estas actividades se pueden agrupar en dos etapas; la determinación de reservas y el desarrollo del plan minero. Por una parte, la determinación de reservas consiste en una etapa que permite definir la fracción de material del depósito que tiene un valor económico (o de otra índole) para el negocio minero. Por otra parte, el desarrollo del plan minero permite maximizar su valor de este a través de una adecuada estrategia de consumo de las reservas. De acuerdo a lo anterior, las etapas del proceso de planificación se traducen a la realización de las siguientes dos actividades:

- Definición del piso de hundimiento
- Maximización del valor presente del negocio

La definición del piso de hundimiento es análogo a la determinación de reservas y considera el cálculo de reservas diluidas y mineras. Por su parte, la maximización del valor presente del negocio considera el cálculo de reservas y el desarrollo del plan de producción.

## **2.9. Definición de conceptos en la planificación en panel caving**

### **2.9.1. Altura de Columna**

Existen dos definiciones de altura de columna y estos varían de acuerdo al punto de vista que es tratado. Bajo la perspectiva física, (**Flores y Manca 2013**), definen la altura de columna como la altura del bloque a ser hundido desde el nivel de hundimiento hasta la superficie o hasta la base de una mina a cielo abierto preexistente o hasta un nivel agotado en la parte superior. Esta definición es utilizada para estimaciones de esfuerzos u otros aspectos relativos a la geomecánica, donde es importante considerar el material de sobrecarga.

La otra definición corresponde a la económica, que es básicamente la porción de la altura de columna que es rentable extraer y que se define por cada punto de extracción. Dependiendo de distintas condiciones (mineralización, niveles superiores) cada columna puede llegar a tener dimensiones muy variables. Como forma de simplificación se define una altura media de las columnas económicamente extraíbles, pero la dispersión de estas se considera para calcular, por ejemplo, la variabilidad de la máxima capacidad productiva.

(**Vergara; Y. 2014**), describe dos metodologías tradicionales que calculan la altura de columna económica, entre estas se encuentran:

Criterio de costo de oportunidad (**Lane; 1982 De la Huerta; 1994**) : Este criterio busca responder cuál es el porcentaje óptimo de extracción de un cierto bloque, considerando que un porcentaje de extracción elevado por bloque, posterga la extracción de bloques con mejor ley.

Best Height of Draw (**Diering 2000**): Tiene como objetivo definir la altura de columna según la que obtiene el máximo beneficio acumulado. Los parámetros utilizados son costo de desarrollo , costo de mantenciones y costo de producción y tratamiento a partir de los cuales se realiza una valorización de bloques.

### 2.9.2. Dilución

Se entiende por dilución en minería, a la reducción de la ley, debido a la cantidad de material por debajo de la ley mínima de corte que se mezcla con el mineral económico. Es decir, la dilución es aquel material que se extrae junto con el mineral cuyo valor no paga por si solo sus costos de extracción. Los métodos por caving al ser de gran envergadura en sus operaciones, se pierde selectividad al extraer el mineral para ser procesado, en consecuencia, es fundamental controlar el umbral máximo de material diluyente que permita maximizar la recuperación del mineral.

Por definición, existen dos formas de medir la dilución, la primera va en función del mineral extraído (Dilución Operacional) y la segunda con respecto al material total que es enviado a proceso (Dilución Metalúrgica).

$$\text{Dilucion Operacional} = \frac{\text{MaterialDiluyenteExtraido(ton)}}{\text{MineralExtraido(ton)}} \quad (2.5)$$

$$\text{Dilución Metalurgica} = \frac{\text{MaterialDiluyenteExtraido(ton)}}{\text{MineralExtraido(ton)} + \text{MaterialDilExtraido(ton)}} * 100 \quad (2.6)$$

En el caso de la minería de hundimiento, la dilución actúa en función de las características de la roca. La mezcla que se produce al extraer el material desde los puntos de extracción hace que el modelo sea totalmente dinámico, por lo tanto, la incorporación de un modelo de dilución a un modelo de bloques permite trabajar en un modelo estático, donde los bloques ven modificado su densidad y ley, de manera de representar este fenómeno en el plan de producción.

### 2.9.3. Modelo de comportamiento de dilución de Laubscher

Este modelo propuesto por (**Laubscher 1994**), permite estimar gráficamente el comportamiento de la dilución. Corresponde a un modelamiento del mecanismo de mezcla de los materiales producto del hundimiento, el cual reasigna leyes a las unidades básicas de cubicación pertenecientes a una columna de extracción, considerando la ley insitu de esa misma columna y el punto de entrada de la dilución. Laubscher en su modelo anticipa el momento de aparición de la dilución, conocido como "Punto de entrada de la dilución" (PED) expresado como porcentaje de la columna de mineral a extraer, el cual es estimado según la formula siguiente:

$$PED(\%) = \frac{H_c - \frac{HIZ}{S}}{H_c} * DCF * 100 \quad (2.7)$$

Donde:

- PED (%): Porcentaje de columna extraída donde se registra entrada de dilución.
- Altura medida desde el punto de extracción hasta la interfaz mineral/diluyente.
- S: Esponjamiento, el cual es dependiente de la fragmentación esperada. (Laubscher 1994) propone que los factores de esponjamiento típicos según el tipo de fragmentación esperada de la roca corresponden a 1.16 para fragmentación fina, 1.12 para fragmentación media y 1.08 para fragmentación gruesa.
- HIZ: Altura de interacción de elipsoides de extracción. Laubscher afirma que es en función de la diferencia en la calidad de roca, medida a través de la diferencia entre el Rock Mass Rating del material diluyente y el mineral, contemplando también el espaciamiento de los puntos de extracción a través del ápex mayor, ver figura (2.13)

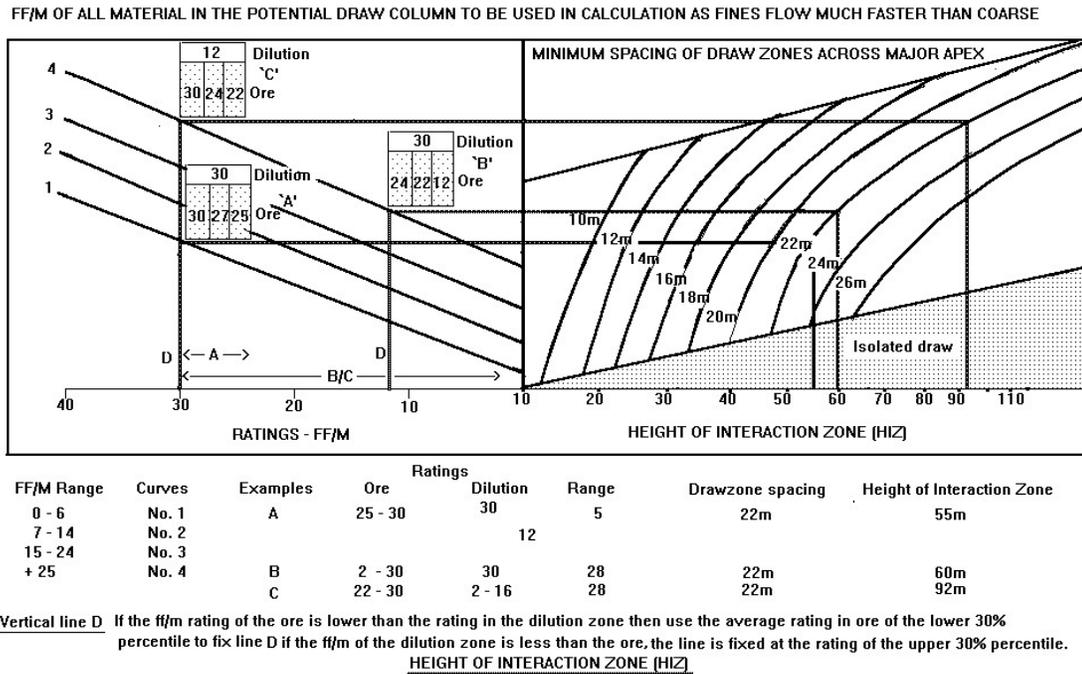


Figura 2.13: Altura de interacción (HIZ). Fuente: (Laubscher 2011)

- • DFC: Diferencias de toneladas entre un punto y sus vecinos en un determinado período de tiempo, basada en la desviación estándar de los toneladas extraídos. (Laubscher 1994) propone una medida de esta diferencia a través de un índice de control de tiraje, ver figura (2.14).

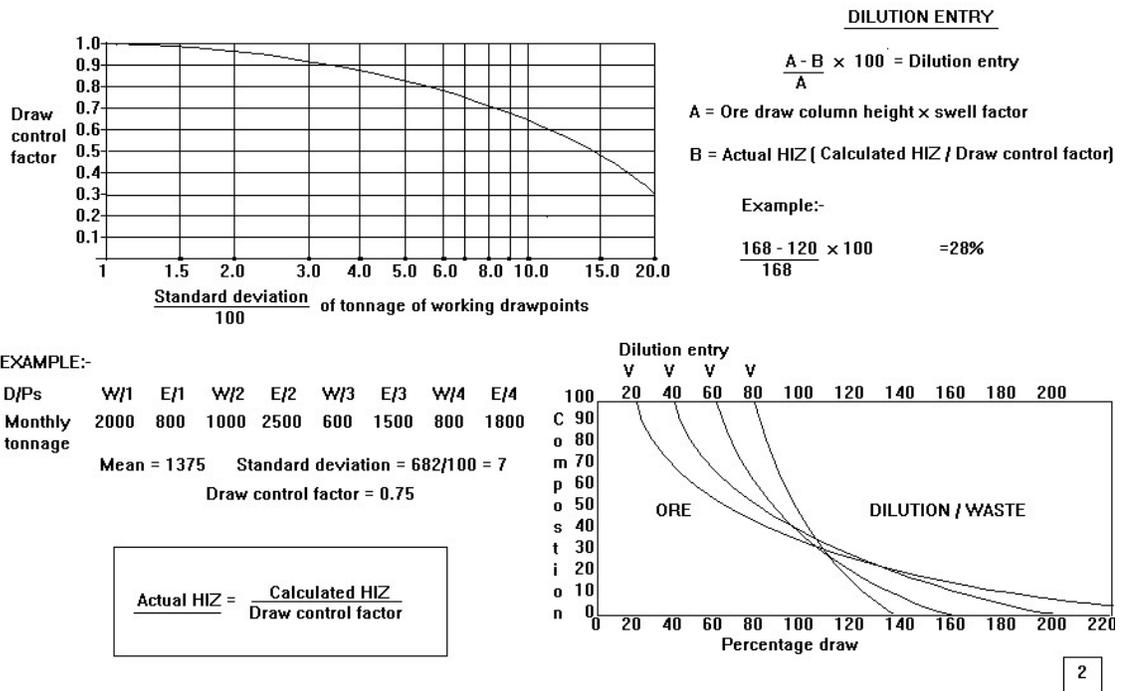


Figura 2.14: Draw Control Factor. Fuente: (Laubscher 2011)

### 2.9.4. Footprint y Envolvente Económica en Minas explotadas por Block/Panel Caving

Footprint hace referencia al piso económico, esto quiere decir el nivel desde el cual se construirá la mina, más específicamente, a la cota donde estará ubicado el nivel de hundimiento y la forma que éste tendrá. Los criterios utilizados para fijar esta cota van desde el punto de vista económico, así como tonelaje e incluso área asociada. Para lograr esto se consideran variables de entrada el modelo de bloques geológico, el costo mina, costo proceso, y precio del commodity. La metodología de cálculo del footprint consiste en que, para cada nivel del modelo de bloques, se calcula la suma acumulada de los beneficios de las columnas verticales superiores. En la siguiente figura se observa el resultado, de la aplicación del cálculo del footprint.

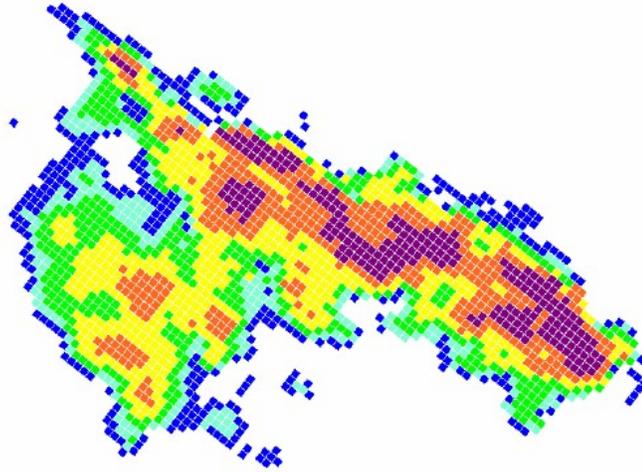


Figura 2.15: Footprint Finder example (DOZ mine), los bloques de color purpura representan las columnas con beneficios acumulados mayores, y los bloques de color azul a las columnas con los beneficios acumulados más bajos. Fuente: (Diering 2010)

Para (Vargas 2014), la metodología de cálculo de las envolventes en block/panel caving considera una serie de pasos para delimitar los bloques dentro del modelo, que involucra la aplicación de conos invertidos, dilución y redondeamiento. El proceso de obtención de la envolvente económica consiste en una serie de pasos de ellos están:

- Dilución del modelo: Se utiliza el método de dilución volumétrica de Laubscher para diluir el modelo de bloques de acuerdo a una sección dada, y a los parámetros de entrada de dilución calculados.
- Inversión del eje z: Se invierten todos los atributos del modelo de bloques, es decir, bloques que se encuentran en el fondo del modelo son trasladados a la parte superior del mismo
- Cálculo del pit final: A través de la metodología de (Lerchs Y Grossmann 1965) , utilizando precedencias verticales con distintos ángulos por cota a fin de conseguir paredes verticales en las primeras cotas y paredes con ángulos más agudos en las últimas.
- Inversión del eje z: Se vuelve a invertir el modelo y se redondean las paredes a fin de mantener un techo de la envolvente continuo, además se eliminan del modelo aquellas columnas solitarias irregulares, ver figura (2.16).

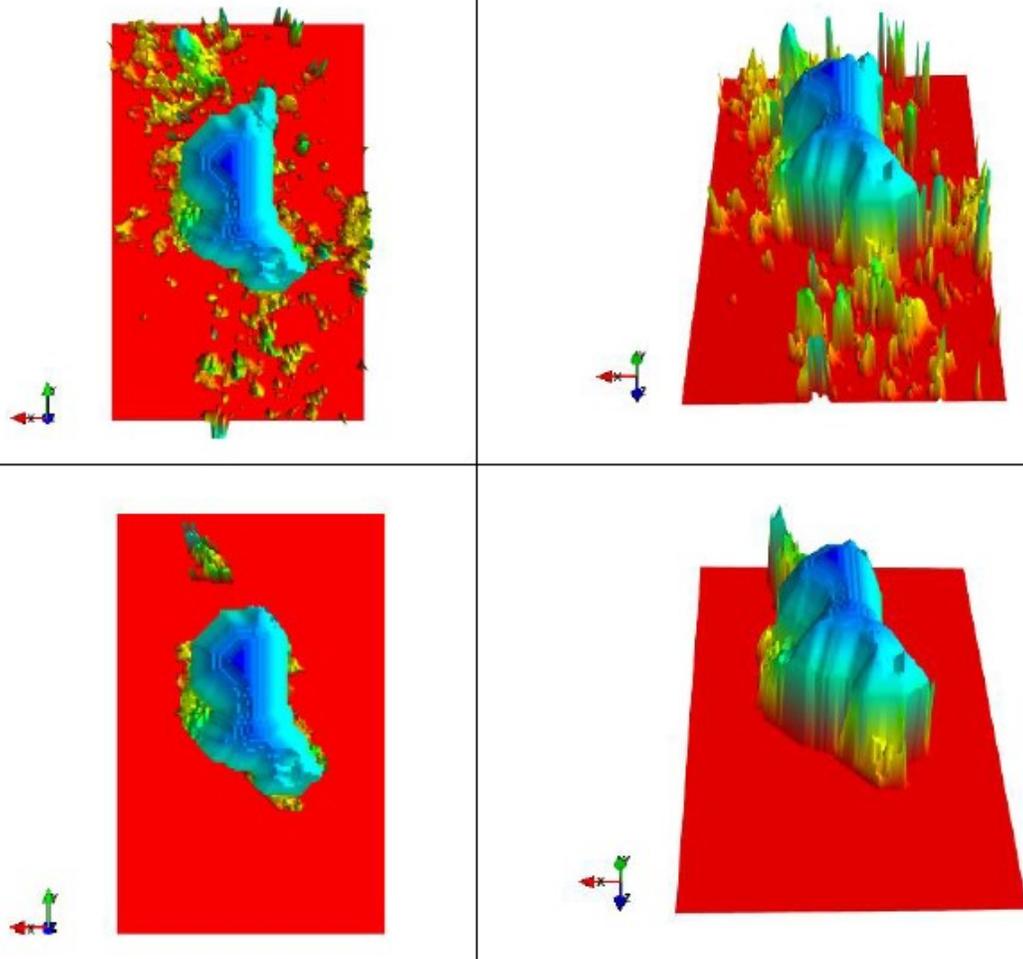


Figura 2.16: Proceso de suavizamiento de la envolvente económica, limpieza de columnas. Fuente: (Vargas 2014)

## Capítulo 3

# Análisis Bibliográfico

En el presente capítulo se mencionan los antecedentes relacionados a la planificación minera en panel caving, y los distintos conceptos que la involucran. Éste se organiza en función de los principales temas abordados y bajo los cuales se desarrolla la metodología propuesta.

### 3.1. Planificación minera en Block/Panel Caving

Bajo el tópico de la investigación para el agendamiento de minas tipo block/panel caving, distintos autores han implementado modelos de optimización matemática que satisfacen distintos elementos que benefician una óptima extracción del mineral, esto de acuerdo a criterios relevantes para la operación, y que dependen del horizonte de tiempo en que el problema es tratado. Además, las últimas investigaciones relacionadas en la materia se concentran en concatenar distintas fuentes de incertidumbre al problema de optimización, obteniendo como resultado un plan más robusto que el obtenido por la metodología tradicional. Consiguientemente, a fin de analizar la historia de la planificación minera en block/panel caving, se procede a describir los trabajos más relevantes en esta materia.

Uno de los primeros trabajos, relacionado a la planificación minera subterránea, es de (**Chanda 1990**), propone un modelo de agendamiento a corto plazo mediante programación entera mixta, con la función objetivo de disminuir la fluctuación de leyes entre puntos de extracción todo esto para un turno en operación. Posteriormente (**Guest et. al. 2000**), aborda el problema de asignación de la carta de tiraje, utilizando la información obtenida por el monitoreo de los puntos de extracción en donde actualiza los recursos existentes que retroalimentan la información para el departamento encargado de generar el plan a largo plazo, este modelo maximiza el tonelaje de mineral que debe ser extraído en los puntos de extracción bajo restricciones de capacidad mina, económicos, y geometalúrgicos

En lo que se refiere a planificación a largo plazo, (**Rubio 2002**), aplica un modelo que maximiza el valor actual neto y optimiza la vida útil de la mina en la generación del plan de producción. Él considera aspectos geomecánicos, capacidades mina y de proceso.

(**Rahal; Smith; Van Hout y Von Jahannides 2003**), describe un modelo de programación lineal entera mixta multiobjetivo, que minimiza la desviación del perfil entre puntos de extracción manteniendo las metas de producción. Dentro de los parámetros que considera el modelo son el consumo de la altura de columna planificada con la real, el estado del panel, conservación del flujo, y producción. Así mismo, (**Rahal 2008**) presenta un modelo que define la estrategia de cumplir la producción mensual bajo la restricción de la propagación del caving y reglas de control de tiraje.

(**Diering y Rubio 2004**) implementan un modelo matemático que optimiza la estrategia de producción en minas de block caving. Este maximiza el valor del proyecto, y minimiza la diferencia en el consumo de altura de columnas contiguas, a fin de disminuir explícitamente el ingreso temprano de la dilución. Uno de los aspectos más relevantes de este trabajo de investigación, se encuentra en el concepto de la mejor altura de columna que presenta el mejor costo de oportunidad.

(**Smoljanovic; Rubio y Morales 2011; Smoljanovic 2012**) combina la robustez de la constructibilidad del plan sujeto a restricciones de precedencias y geometalúrgicos, este es uno de los primeros trabajos en la que involucra la importancia de la forma de la apertura de área y direccionamiento en el valor del proyecto.

Con respecto a las aperturas de áreas, (**Parkinson 2012**) implementa una metodología para generar distintas formas de aperturas de áreas en el agendamiento a largo plazo, para minas de block/panel caving, estas son: i) Basic, la cual consiste en secuenciar los puntos de extracción escogiendo priorizando aquellos de mas alto valor acumulado sin garantizar la continuidad del hundimiento; ii) Malkin, secuencia los puntos de extracción desde un punto central extendiéndose como diamante al resto del footprint; iii) 2Cone, la extensión de la extracción es similar al Malkin, pero considerando una continuación del hundimiento por distintas frentes; iv) ColGen, genera la misma secuencia de patrón de diamante pero por una sola frente por periodo; y v) Greedy, que es muy similar a la modelo de extracción ColGen. Este trabajo fue implementando posteriormente al software PCBC, para la generación de planes de producción.

Uno de los autores que ha tenido una mayor participación en la planificación minera de los métodos por hundimiento, es (**Diering 2012**), quien introduce un modelo de programación no lineal para el agendamiento de una mina tipo block caving. La razón de implementar este tipo de modelo, se encuentra en la limitación propia del modelo lineal al generar un plan de producción entre puntos de extracción, eso se debe a que en un modelo lineal, busca soluciones que se encuentran en los límites la región factible, siempre buscará extraer una mayor cantidad de toneladas en aquellos puntos de extracción que contengan un mayor valor, generando así, una gran diferencia con aquellos puntos que presentan un bajo valor. Al implementar un modelo de programación cuadrática, éste busca la solución dentro de la región factible y no en sus extremos, por lo tanto, implícitamente se genera un suavizamiento en el perfil de las columnas de extracción. Además, el modelo que implementa el autor no maximiza el VAN, sino que su función objetivo está en minimizar las desviaciones de tonelaje entre puntos de extracción. Básicamente Diering, quiere hacer frente a uno de los problemas más relevantes para este tipo de método de explotación, y es la de generar un agendamiento con un tiraje uniforme a fin de retrasar la entrada de la dilución vertical.

También dentro del marco de la planificación minera a largo plazo, se encuentra el trabajo de investigación de (**Pourrahimian et al. 2013**), quienes implementa un método de agendamiento largo plazo llamada multi-etapa, la cual, a través de la estrategia de discretizar el problema en tres grandes conjuntos de elementos, reduce significativamente el tamaño del modelo logrando una mayor eficiencia en los tiempos de cálculo. Esta formulación implementa tres tipos de niveles de resolución: primero a nivel de conjunto de puntos de extracción, segundo a nivel de punto de extracción y tercero a nivel de porción de la altura de columna (Slice).

Finalmente, (**Villa et al. 2014**), implementa una metodología que evalúa la sensibilidad del proyecto, en función de la dirección de la secuencia de minado, esto lo hace a través de un software comercial (**Geovia Gems; Dassault Systemes**), que itera distintos tipos de secuencia y lo evalúa. El autor desarrolla el concepto de mejor y peor caso, que proviene de la búsqueda del punto de inicio de hundimiento y dirección que entrega una cota máxima y mínima VAN posibles para el proyecto. A pesar de que el concepto entrega una mejor representación del valor descontado que el método por el VMR (Vertical Mining Rate), generalmente utilizado para realizar un ejercicio de ingeniería conceptual, sin embargo, este también tiene la desventaja de considerar la temporización del valor de la columna completa, es decir, de acuerdo a una dirección dada, se considera que se extraer toda la columna.

## 3.2. Planificación minera bajo incertidumbre

Varios investigadores han considerado el efecto de la incertidumbre de las leyes en minas open-pit bajo distintas metodologías para abordar estos efectos, (**Dowd 1994**) presenta un algoritmo iterativo basado en el riesgo para la generación de las reservas en open-pit, considera las variables como el precio, costo de procesamiento, el costo de minado, costo de proceso, leyes y tonelajes, bajo una función de distribución predefinida. Posteriormente (**Dimitrakopoulos 2004**) usa la programación lineal entera mixta, con la función objetivo de maximizar el VAN para cada realización. Luego calcula la probabilidad de extracción de un bloque por periodo, esta probabilidad es un input para una segunda etapa de optimización con el fin de generar un plan definitivo. (**Leite et al. 2007**) incorpora la incertidumbre geológica en el agendamiento de una mina a cielo abierto, utilizando un nuevo algoritmo llamado "recocido simulado" considerando como incertidumbre geológica un conjunto de escenarios de leyes. (**Ramazan y Dimitrakopoulos 2008**) presentan un nuevo concepto en su modelo de optimización, bajo la premisa de costo por desviación de la producción. Este costo está calculado en función de una tasa de descuento llamada por los autores como tasa de descuento geológica.

Al contrario de lo que ocurre en minería a cielo abierto, los esfuerzos de los investigadores por abordar el problema en subterránea han sido menor. Dentro de los pocos trabajos que se pueden encontrar que han considerado la incertidumbre geológica en minería subterránea se destacan el de (**Grieco y Dimitrakopoulos 2007**) que implementan un modelo de optimización entera mixta para determinar los caserones óptimos para minería sublevel caving, ver figura (3.1). (**Montiel et al. 2015**) incorpora la incertidumbre geológica bajo una metodología de optimización de la operación minera que incorpora elementos como el blending, procesamiento y transporte, utilizando la técnica de recocido simulado. (**Ayuso et al. 2014**) considera dos fuentes de

incertidumbres en el modelo: como el precio del cobre bajo un horizonte de tiempo y la ley. La incertidumbre es trabajada bajo el concepto de escenarios multi-etapa resultando un árbol de decisión que es implementado en el modelo.

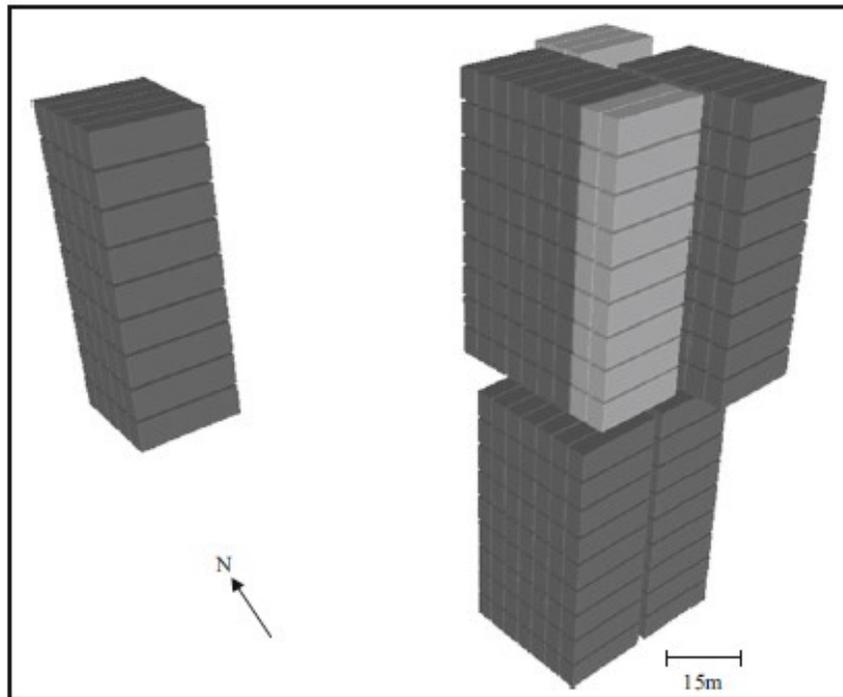


Figura 3.1: Optimización de caserones basado en un 80% de confiabilidad, (Grieco y Dimitrakopoulos 2007)

### 3.3. Planificación minera en block/panel caving, bajo incertidumbre

La disponibilidad de múltiples escenarios puede ser utilizado como información para tomar mejores decisiones, ya que la elaboración de planes mineros de la manera tradicional a partir de cada uno de los escenarios supone igual número de posibles estrategias de extracción lo cual permite evaluar la volatilidad del proyecto mismo. Es así, que varios autores han incorporado la información de distintas fuentes de incertidumbres a la planificación de una mina tipo block caving.

A continuación, se describen los trabajos de investigación que otorgan un enfoque de incertidumbre dentro de la planificación en Block y Panel Caving. (Troncoso 2006), Simula una operación de Block/Panel Caving considerando interferencias operacionales. Esto a través de distribuciones probabilísticas de interferencia en donde es ingresada a un modelo de simulación de una zona del nivel de producción, determinando así la productividad máxima de un cruzado de producción.

(Alarcon 2014), Introduce la metodología de Opciones Reales en la consideración de la disponibilidad de los

puntos de extracción en métodos Block/Panel representándolo a través del castigo de la velocidad máxima de extracción por punto, el autor introduce la incertidumbre en el modelo de agendamiento de apertura de puntos a través de datos históricos de planos, velocidades de extracción, ritmos de producción obtenidas en terreno.

En lo que a estimación de recursos para minas subterránea se refiere, (**Vargas 2014**) realizó uno de los trabajos pioneros en el área, introduciendo una metodología que permite incorporar la incertidumbre geológica mediante el uso de simulaciones de leyes, para el cálculo de reservas de minas Block/Panel Caving, utilizando el mismo algoritmo que se aplica para determinar el pit final, pero esta vez de forma invertida, con la finalidad de obtener la envolvente económica acorde a mina de Block/Panel Caving. Posteriormente se valoriza el resultado de aquella envolvente y se evalúa el riesgo asociado a tomar esa decisión.

Otro trabajo relacionado a la aplicación de incertidumbre es el del autor (**Lobiano 2016**), quien incorpora a través de un modelo empírico la probabilidad de ocurrencia de un evento sísmico con una cierta magnitud en función de parámetros geotécnicos, operacionales y los incorpora al plan de producción a fin de disminuir la interferencia operacional por eventos sísmicos.

Uno de los trabajos que tiene el mismo enfoque que esta tesis es la de (**Malaki 2016**), su trabajo de investigación se divide en dos partes; la primera corresponde en generar una estimación de las reservas para una mina Block Caving utilizando el promedio de 20 escenarios de leyes y la segunda genera un agendamiento para una mina de block caving utilizando el e-type.

En la primera etapa, busca el nivel que le genere un mayor beneficio para el footprint utilizando el promedio de los escenarios (e-type), a la vez hace el mismo ejercicio de búsqueda, pero esta vez considerando los 20 escenarios, con la finalidad de medir la tasa de recurrencia del nivel que presente el máximo valor. En la segunda etapa define los contornos del footprint a través de un kriging indicador para clasificar lo que está dentro y fuera de la envolvente a través de una ley de corte, seguidamente genera un plan de producción a largo plazo considerando las restricciones propias de una mina de block caving, utilizando como soporte los bloques del modelo de bloques y la ley como el promedio de las 20 simulaciones.

Otro trabajo relacionado con esta investigación es la de (**Dirkx 2016**), quien a través de un ejercicio simple plantea visualizar el comportamiento del agendamiento, al incorporar dos fuentes de incertidumbre, para esto propone un modelo matemático que incluye el promedio de un total de 15 distintos escenarios correspondientes a eventos por colgadura y simulaciones de leyes. El autor genera distintas combinaciones de estos escenarios en el agendamiento, con la finalidad de obtener distintos planes de producción a largo plazo, como resultado preliminar indica que la relevancia de la incertidumbre operacional manifestada como eventos por colgaduras es más relevante que la incertidumbre geológica asociada a las leyes, cuando se trata de aperturas de los puntos de extracción. Sin embargo, el autor también enfatiza de la importancia de investigar en el área de la estimación de los eventos por colgaduras ya que para realizar este ejercicio se basó en la generación de escenarios dictadas por las experiencias de los expertos.

### 3.4. Discusión del estado del arte

En este capítulo se ha presentado los antecedentes más relevantes sobre el agendamiento de la producción en minas de panel caving. Comenzando por su definición y la importancia que radica en determinar, los planes estratégicos para un proyecto minero, y como una desviación con respecto al target de producción puede causar daños irreversibles en el valor del proyecto. La mayoría de la literatura relacionada a la planificación en minas de hundimiento han tenido el foco de presentar un modelo matemático y búsqueda de algoritmos para planificar en minas de Block Caving, utilizando modelos de programación matemática lineal, entera mixta y cuadrática, donde cada una de ellas presenta una función objetivo, definida a criterio del autor, a fin de solucionar problemas específicos como por ejemplo, cumplir la producción a corto plazo, maximizar el valor del proyecto, mantener un tiraje uniforme durante el agendamiento, etc. Específicamente los estudios en el agendamiento a largo plazo, la mayoría de los trabajos corresponden a modelamientos para operaciones mineras relacionadas Block Caving, a excepción del planteamiento realizado por (**Smoljanovic; Rubio y Morales 2011**), los cuales generan un buen modelamiento de una operación de panel caving.

Con respecto a la incorporación de la incertidumbre al plan de producción, gran parte de los trabajos relacionados en estas últimas dos décadas, han correspondido al agendamiento de la minería a cielo abierto, donde han existido grandes avances, como, por ejemplo, en la planificación de corto plazo se puede utilizar la información de los pozos de tronaduras para obtener polígonos con una cierta confiabilidad de acuerdo a criterios geo-metalúrgicos.

Sin embargo, los estudios que incluyen la incertidumbre dentro en la minería subterránea, específicamente la de hundimiento, han sido más recientes, por lo tanto, no tan abundantes. Los trabajos de (**Lobiano 2016**), (**Alarcon 2014**) y (**Troncoso 2006**) permiten incluir distintas fuentes de incertidumbre operacional al plan de producción o de constructibilidad de una mina de hundimiento, generando así indicadores de confiabilidad en los planes. Atribuyendo el elemento de variabilidad geológica, (**Vargas 2014**) permite incluir ésta fuente de incertidumbre al cálculo de reservas para las minas de caving. Con respecto a la secuencia de extracción que incorpore la variabilidad geológica, se han propuesto metodologías similares a las utilizadas en cielo abierto como por ejemplo (**Malaki 2016**), quien genera un modelo matemático que produce un agendamiento para el E-Type y los evalúa considerando un conjunto de realizaciones, o el trabajo de (**Dirkx 2016**) quien propone un modelo matemático que maximiza el valor del agendamiento, pero considerando un costo por desviación de la producción bajo un conjunto de escenarios.

El escaso avance relacionado a este tema, se debe principalmente a la complejidad que presentan los modelos de optimización para el agendamiento subterráneo, dada a la alta cantidad de restricciones de precedencia. Esto ocasiona que agendar grandes cantidades de área sea una tarea lenta, mayor aun cuando se incorporan distintos escenarios de leyes en la optimización. Actualmente para estimar la sensibilidad del proyecto hacia distintas fuentes de incertidumbre, la industria utiliza simulaciones de Montecarlo en la valorización de la decisión de agendamiento, variando parámetros como leyes, costos o precios, a través de softwares propios y/o

comerciales. Sin embargo, esta metodología no permite reflejar la variabilidad espacial del depósito y que responde a características propias de la génesis del yacimiento.

Otra fuente de discusión, es sobre la incorporación de la incertidumbre geológica en los planes de producción en panel caving. Las investigaciones relacionadas a esta área, han tenido el enfoque de utilizar a través de distintos escenarios a un proceso de optimización iterativa para cada escenario a fin de obtener estadísticas que permitan cuantificar la posible variabilidad en la producción entre realizaciones.

Junto con los antecedentes anteriores, en el proceso de evaluación de un proyecto de hundimiento específicamente en panel caving, existe una mayor restricción espacial en la definición de la secuencia de minado, dado a las limitaciones geotécnicas, y operativas de este método. Generalmente estas restricciones limitan el agendamiento a dos direcciones opuestas, la cual son evaluadas a través de ranking de indicadores como VAN, producción, accesos, etc.

Con esto, incorporar un análisis incorporando la incertidumbre geológica a esta toma de decisión, es un avance que facilita el trabajo del planificador, es por ello, que se pasará de un enfoque agendamiento secuencial propuestos por la literatura, a un enfoque de agendamiento en conjunto donde se proponen metodologías que permitan una optimización robusta para definir un plan de producción que se comporte de manera eficiente para todo el rango de realizaciones, sujeto a todas las restricciones geomecánicas y operacionales presentes en esta revisión bibliográfica.

## Capítulo 4

# Metodología

En este capítulo se describe los pasos para generar un agendamiento en panel caving en presencia de incertidumbre geológica, considerándola como un conjunto de simulaciones condicionales dentro del modelo de bloques. El proceso incluye nuevas estrategias para la etapa de evaluación de un proyecto de panel caving en la cual se considera distintas fuentes en el agendamiento, para esto se confecciona y evalúa tres modelos de optimización que tienen el foco de comparar la incorporación de la variabilidad producto de la incertidumbre de leyes en el plan de producción.

El trabajo de investigación consta de 5 etapas, las cuales se detallan en los siguientes puntos:

- Elaboración del modelo de optimización de agendamiento de bloques a través de la librería MineLink.
- Definición de agendamiento convencional (Agendamiento por decisión de kriging): A través del modelo de optimización confeccionado, se ejecuta un agendamiento convencional a través de la ley de kriging, considerando las restricciones propias del método de explotación, a fin de obtener un caso base para los agendamientos que incorporan la incertidumbre.
- Definición de agendamiento por frecuencia de pertenencia por periodo: Se incorpora la información de 100 planes de mineros al modelo de optimización, a través de un índice de frecuencia de pertenencia que tiene el bloque a ser minado por cada periodo.
- Definición de agendamiento por criterio de medición de riesgo: Se incorpora al modelo de optimización la información de los peores escenarios de valorizados a nivel de bloques con tal de generar un agendamiento que optimice el caso más pesimista.
- Caso de estudio, análisis y resultados: A través de un caso de estudio, se compara las distintas herramientas de decisión y evaluación de agendamientos propuestos en este trabajo de investigación, además se realiza el ejercicio del uso de estos modelos de optimización para la evaluar el desempeño que tiene el footprint bajo dos direcciones de minado opuestas. La finalidad es de observar la relevancia de la incertidumbre en el agendamiento en sí y en la toma de decisión de hundimiento.

## 4.1. Etapa de elaboración de los modelos de optimización

### 4.1.1. Desarrollo del modelo de optimización para agendamiento tradicional

El modelamiento para agendamiento tradicional permite obtener un plan de producción considerando las restricciones pertinentes al método de explotación por panel caving, utilizando como input la ley provista en el modelo de bloques. El modelo de optimización es elaborado a través del lenguaje de programación Python, donde se ejecutan distintas funciones provistas por la librería **MineLink**, la principal ventaja de utilizar esta herramienta es que está altamente optimizada para trabajar con modelos de bloques, por lo que brinda una gran rapidez en la carga de datos y cálculos en los modelos de optimización. El modelo de optimización tiene como función objetivo maximizar el valor descontado de los flujos de caja (VAN), proveniente del material extraído de la mina, controlando la capacidad de producción. Dentro del modelo no se incluye la restricción de blending, la razón radica en la naturaleza del método en sí, es decir, para el panel caving a diferencia de otros métodos es altamente restrictivo en su operación, por lo que se debe mantener una continuidad de extracción en las áreas que se encuentran activas. La coyuntura de incluir una restricción de ingreso de ley hace que se pierda esta continuidad de extracción, haciendo que el modelo mantenga sectores de baja ley en "stand-by" a fin de cumplir la restricción de leyes promedios por periodo, además, dada a la escala utilizada en el agendamiento (por aperturas de áreas) ingresar este tipo de restricciones al modelo pierde relevancia producto de la mezcla de grandes volúmenes de bloques que se generan por periodo.

#### Notación

Se considera un conjunto de bloques  $B$ . Los elementos que pertenecen a  $B$  (bloques) son denotados como  $b$ . El horizonte de tiempo  $T$  que corresponde al periodo de agendamiento de producción en  $t = 1, \dots, T$ , el set de periodos es denotado por  $T = \{1, 2, \dots, T\}$ . Donde existe un conjunto de destinos  $D = \{1, 2, \dots, D\}$ . El beneficio neto percibido por cada bloque  $b \in B$  destinado a  $d \in D$ , es denotado como  $v_{bd}$ . Para todo el modelo de bloques las precedencias de arcos son denotados por  $P$ , para el conjunto de destinos  $D$ , para todos los periodos  $T$ .

#### Variable de decisión

La variable de decisión principal está relacionado al minado o no del bloque.

$$x_{bdt} = \begin{cases} 1, & \text{si el bloque } b \text{ ha sido extraido y enviado al destino } d \text{ en el periodo } t, \\ 0, & \text{si no.} \end{cases}$$

## Función objetivo

La función objetivo es maximizar el valor presente neto. Los bloques que pertenecen al modelo al ser de mina subterránea, presentan único puesto de destino que es el enviar a proceso (monorecurso).

$$v_{bt} = [(P_r - C_{FyR}] * L_{bloque} * Rec * f * Ton_{bloque}] - (C_{mina} + C_{planta}) * Ton_{bloque} \quad (4.1)$$

$$máx \sum_{t=1}^{\mathbf{T}} \sum_{b=1}^{\mathbf{B}} \frac{1}{(1 + \gamma)^t} * v_{bt} * x_{bt} \quad (4.2)$$

Donde cada término:

- $\gamma$  = Tasa de descuento [%]
- $Rec$  = Recuperación metalúrgica del mineral [%]
- $P_r$ ] = Precio del cobre [USD/Lb]
- $C_{mina}$  = Costo mina [USD/Ton]
- $C_{planta}$  = Costo planta [USD/Ton]
- $C_{FyR}$  = Costo de refinación y Fundición [USD/Lb]
- $L_{bloque}$  = Ley del bloque [%]
- $f$  = Factor de conversión
- $Ton_{bloque}$  = Tonelada del bloque [Ton]

## Restricciones

Gran parte de las restricciones que pertenecen al modelo, corresponden a elementos que definen precedencias de extracción de bloques, así como también restricciones de capacidad de recursos.

$$x_{bt} \leq x_{b't}, \quad \forall (b', b) \in \mathbf{P}, t \in \mathbf{T} \quad (4.3)$$

$$Ap(1 - a_{tol}) \leq \sum_{(b \in \mathbf{B})^{floor}} d_x * d_y * x_{bt} \leq Ap(1 + a_{tol}), \quad t = 1 \quad (4.4)$$

$$\sum_{(b \in \mathbf{B})^{floor}} d_x * d_y * x_{bt} \leq DR, \quad t = \{2, 3, \dots, T\} \quad (4.5)$$

$$\sum_{b \in \mathcal{B}} w_b * x_{bt} \leq W_s, \quad \forall b \in \mathcal{B}, t = 1 \quad (4.6)$$

$$\sum_{b \in \mathcal{B}} w_b * x_{bt} \leq W_s + (W_i * t), \quad \forall b \in \mathcal{B}, t \in [2, \dots, (R_{up} - 1)] \quad (4.7)$$

$$W_{m\acute{a}x}(1 - w_{tol}) \leq \sum_{b \in \mathcal{B}} w_b * x_{bt} \leq W_{m\acute{a}x}, \quad \forall b \in \mathcal{B}, t \in [R_{up}, \dots, (T - R_{down})] \quad (4.8)$$

$$\sum_{b \in \mathcal{B}} w_b * x_{bDt} \leq W_{m\acute{a}x}, \quad \forall b \in \mathcal{B}, t \in [(T - R_{down}) + 1, \dots, T] \quad (4.9)$$

$$\sum_{t \in T} x_{bDt} \leq 1, \quad \forall b \in \mathcal{B} \quad (4.10)$$

$$x_{bDt} \in \{0, 1\} \quad (4.11)$$

donde:

- $\mathcal{B}^{floor}$  = Conjunto de bloques que pertenecen al Footprint
- $A_p$  = Área inicial para generar hundimiento [ $m^2$ ]
- $a_{tol}$  = Tolerancia de área expresada en tanto por uno
- $d_x$  = Dimensión del bloque en el eje x [ $m$ ]
- $d_y$  = Dimensión del bloque en el eje y [ $m$ ]
- $DR$  = Tasa de desarrollo máxima [ $m^2/a\tilde{n}o$ ]
- $W_s$  = Capacidad mina inicial [ $tpa$ ]
- $W_i$  = Capacidad mina incremental por año [ $tpa$ ]
- $W_{m\acute{a}x}$  = Capacidad mina incremental por año [ $tpa$ ]
- $w_{tol}$  = Tolerancia de capacidad en tanto por uno
- $w_b$  = Tonelada del bloque
- $R_{up}$  = Periodos de ramp-up
- $R_{down}$  = Periodos de ramp-down

La expresión (4.3) corresponde a las restricciones de precedencias de los bloques que mantienen una dirección de hundimiento y de ángulo de extracción de caveback en el plan minero. Las restricciones (4.4) y (4.5) corresponden a la tasa área de desarrollo por año. De igual forma, las restricciones (4.6), (4.7), (4.8) y (4.9) especifican las capacidades máximas de minado. La ecuación (4.6) indica la capacidad inicial para el periodo  $t=1$ , (4.7) revela la capacidad de minado incremental para los periodos de RampUp, (4.8) a la capacidad máxima para los periodos de régimen, y la ecuación (4.9) a la capacidad decreciente del RampDown. La restricción (4.10) indica que el bloque debe ser extraído una sola vez, y la última restricción (4.11) corresponde a la variable binaria.

Dentro del modelo dado por las ecuaciones (5.1) - (5.11) es utilizado para generar una secuencia de hundimiento por cada escenario geológico, por lo tanto, se debe resolver con la información de cada simulación, obteniendo  $S$  planes. En la siguiente sección se detallará cómo utilizar esta valiosa información para la generación de un único plan que incorpore la variabilidad de los  $|S|$  planes.

#### 4.1.2. Desarrollo del modelo de optimización para agendamiento por frecuencia de pertenencia por periodo

En este agendamiento incorpora la información contenida de un conjunto de planes mineros (uno para cada simulación condicional). A fin de englobar la volatilidad de los distintos escenarios en un solo modelo de optimización. A diferencia del modelo de agendamiento tradicional, este tiene como función objetivo maximizar el valor del índice de la tasa de recurrencia que posee un bloque a ser minado en un periodo  $t$ , el fundamento de utilizar este método de agendamiento, es el de realizar un plan minero que genere un buen desempeño para todos los escenarios de leyes. Para comenzar este proceso se debe ejecutar un agendamiento tradicional para cada simulación (ver sección 5.1.1) y guardar su asignación dentro de una variable en el modelo de bloques. Posterior a eso, se obtiene la frecuencia relativa de cada uno de los bloques para cada uno de los periodos. El nuevo modelo de optimización que incorpora los distintos escenarios, presenta las mismas restricciones de la sección anterior, pero con una función objetivo distinta.

##### **Función objetivo**

La función objetivo está en maximizar la confiabilidad de pertenencia de los bloques a cada periodo. Para esto se debe calcular un nuevo factor para cada uno de los bloques que pertenecen al modelo.

$$C^{tb} = \frac{\sum_{s=1}^S x_{bt}}{S}, \quad \forall b \in \mathcal{B}, t \in T \quad (4.12)$$

Se genera un vector de confiabilidad para cada bloque con dimensiones del tamaño de periodos de agendamiento.

$$\text{máx} \sum_{t=1}^T \sum_{b=1}^B C^{tb} * x_{bt} \quad (4.13)$$

donde:

- $C^{tb}$  = Frecuencia relativa de bloques que pertenecen al periodo  $t^*$  del conjunto de escenarios.
- $S$  = Números de escenarios de simulaciones condicionales

#### 4.1.3. Desarrollo del modelo de optimización para agendamiento por la peor ganancia de cada bloque

Otra alternativa de considerar la incertidumbre dentro del agendamiento, es a través de la valorización de cada escenario de ley y utilizar la medida de riesgo Value at Risk para encontrar los escenarios con la peor ganancia por cada bloque.

El proceso consta de obtener, para cada bloque, el beneficio de cada simulación y buscar aquel valor que esté dentro de un porcentaje de confianza que indique el peor desempeño económico para ese bloque, en la cual posteriormente será considerado en la optimización, a fin de buscar la mejor solución de agendamiento dentro de los escenarios más pesimistas de cada bloque evaluado posible

Por consiguiente, para cada bloque ,si se tiene un conjunto de escenarios de leyes  $S = \{1,2,\dots,S\}$ , donde  $s \in S$ , en la cual cada uno de ellos se obtiene un beneficio  $Profit^s$  asociado a cada escenario, entonces:

$$F_b = v_b^s, \forall s \in S, \forall b \in B \quad (4.14)$$

donde:

- $v_b^s$  = es el valor del bloque  $b$  cuando se utiliza la ley de la simulación  $s$ .

A partir de la distribución de valores para cada bloque, se calcula el valor en riesgo  $VaR_\alpha$ , es decir la peor ganancia cuando se ignora el  $(1 - \alpha)$  de los peores casos.

$$VaR_\alpha(F_b), \forall b \in B \quad (4.15)$$

donde:

- $\alpha$  = Corresponde al porcentaje de confianza utilizado para obtener la peor ganancia de cada bloque.

#### **Función objetivo**

La función objetivo corresponde en encontrar la mejor solución para las valorizaciones más pesimistas, y de acuerdo a esa valorización se desea encontrar aquella secuencia que permita maximizar el VAN del proyecto en su conjunto.

$$\text{máx} \sum_{t=1}^{\mathbf{T}} \sum_{b=1}^{\mathbf{B}} \frac{1}{(1 + \gamma)^t} * VaR_{\alpha}(F_b) * x_{bt} \quad (4.16)$$

## 4.2. Desarrollo de precedencias entre bloques para el método de panel caving

Las restricciones de precedencias generadas en el modelo se dividen en dos grupos: las precedencias verticales y precedencias de avance de hundimiento.

### 4.2.1. Precedencias de Avance de Hundimiento

Las precedencias horizontales determinan el sentido de hundimiento en función de la orientación asignada por cada frente. Para ello, se establece precedencias como se muestran en la Figura (4.2.1).

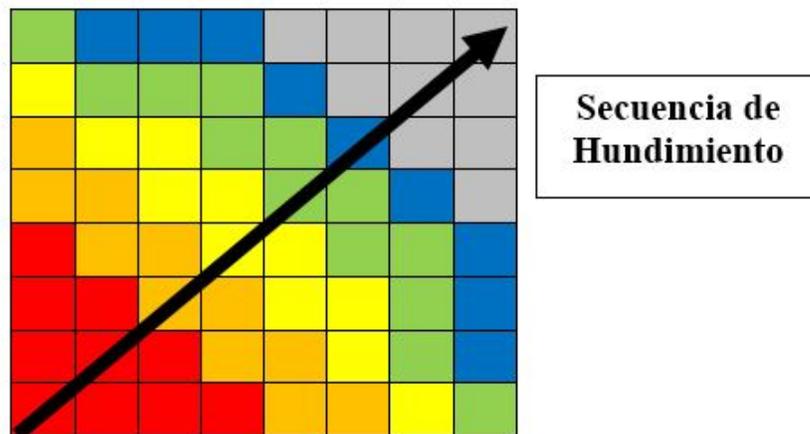


Figura 4.1: Secuencia de Caving (Vista en planta)

### 4.2.2. Precedencias Verticales

Estas precedencias se basan en la simulación del tiraje vertical, propagación del caving y control del ángulo de tiraje. Estas precedencias parten desde el punto de inicio del caving, utilizando el primer bloque ubicado en la cota inferior como precedencia, posteriormente su bloque superior y finalmente el bloque vecino de acuerdo a la orientación acordada, ver Figura (4.2.2).

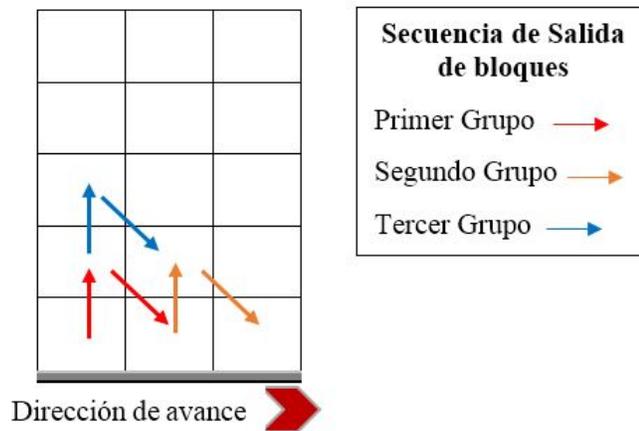


Figura 4.2: Restricciones de avance de hundimiento (Vista Perfil)

Las estructuras de precedencias obligan las aperturas de áreas en el footprint, estableciendo que cada vez que se quiera extraer el bloque superior de la columna, se deba extraer el bloque del frente, con esto se logra un ángulo de caveback cercano a los 45, con respecto al plano horizontal. Para evitar que el modelo de optimización extraiga grandes extensiones a la horizontal, se hace uso de la restricción de incorporación de área por periodo que se encuentra integrada en el modelo de optimización, a fin de evitar este problema. Ecuación (4.3) y (4.4), que corresponden a restricciones de precedencias horizontal/vertical y la de apertura de áreas respectivamente.

### 4.3. Estrategias de agendamiento

En esta etapa del trabajo, se procede a ejecutar los distintos agendamientos utilizando tres estrategias distintas. Las características de estas tres estrategias de agendamiento se presentan en la Tabla 4.1. La función objetivo de ellas varían de acuerdo al modelo de optimización utilizado, sin embargo, los parámetros económicos y de capacidades permanecen iguales para todos los casos.

Casos de Estudios	Estrategias	Modelo Utilizado en la valorización	Dirección de hundimiento en grados (°)
Caso 1	Maximizar VAN	Ley CuT, estimada por Kriging.	45 -225
Caso 2	Maximizar Confiabilidad	Tasa de frecuencia de pertenencia por periodo en cada bloque	45 -225
Caso 3	Maximizar VAN-VaR	Las peores ganancias de cada bloque	45 -225

Tabla 4.1: Casos de estudio utilizados en la investigación. 45 = NE, 225 = SW

A cada uno de los casos se evalúan dos diferentes puntos de inicio de hundimiento, para observar la influencia de éstos en el desempeño económico y en el plan minero del proyecto. Los procesos involucrados en cada caso se describen en la Figura 4.3 .

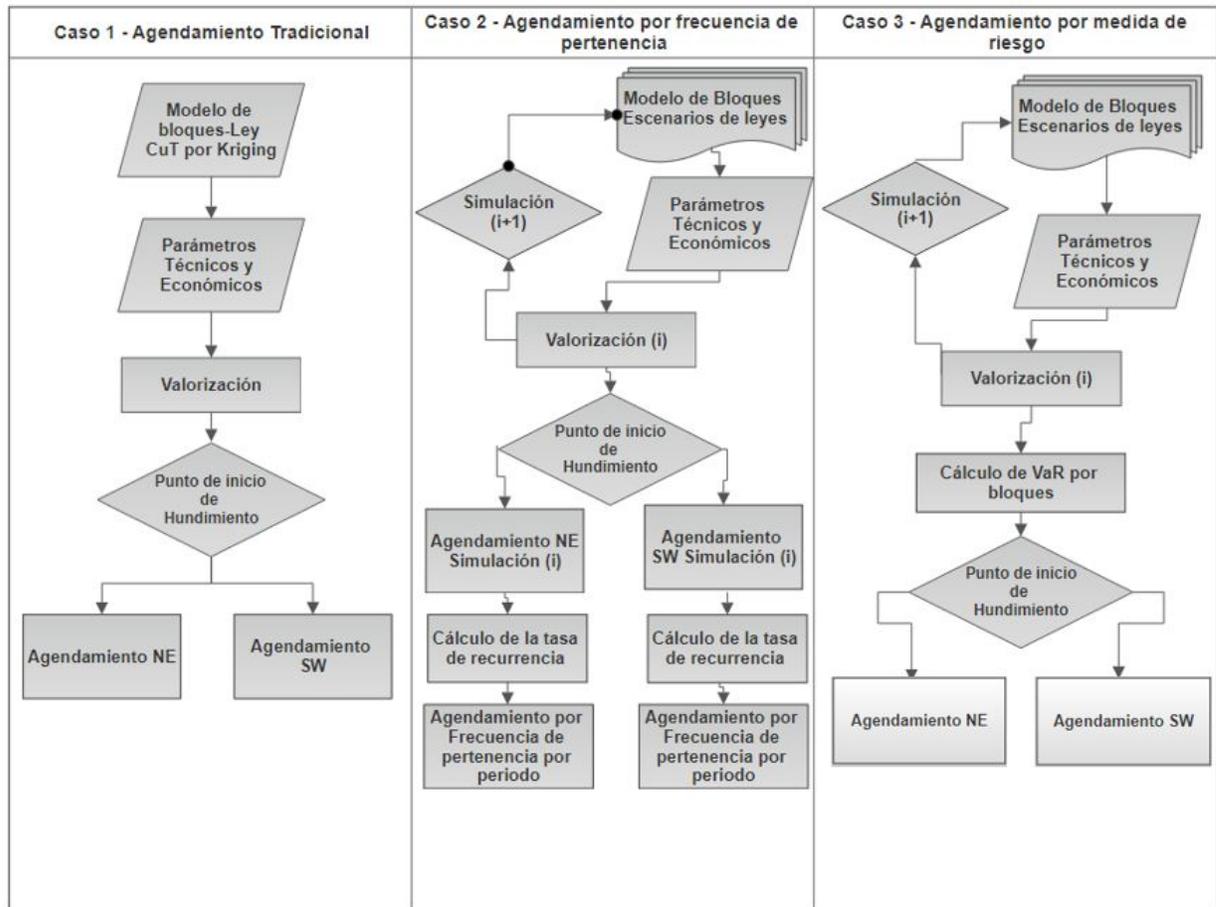


Figura 4.3: Diagrama de flujo de las tres estrategias de agendamiento utilizada en los casos de estudios

Una vez obtenidos los agendamientos, los resultados son exportados y procesados para obtener los planes de producción asociados. Esto permite comparar las diferentes estrategias en términos de tonelajes enviados a procesos, fluctuaciones de leyes por periodo, VAN, entre otros indicadores.

#### 4.4. Análisis de los planes de producción

Se evalúa cada caso anteriormente presentado mediante la comparación de los planes de producción. Para ello, se realizan evaluaciones a nivel de:

- Plan de producción anual. Es decir, observar las fluctuaciones de tonelajes y leyes enviadas a proceso en el agendamiento de la mina subterránea.
- Variación en el VAN para los distintos casos.
- Medición de riesgo asociado a cada caso.
- Ranking comparativo para cada estrategia agendamiento.

## 4.5. Metodología de resolución para todos los casos de estudio

Debido a la escala del problema de optimización, dada a la cantidad de variables y restricciones presentes en el modelo, además, de que en algunos casos corresponde a un proceso iterativo que comprende generar una solución para cada simulación condicional, se opta por la aplicación de la heurística de ventanas móviles. Para ello, se usan ventanas de tiempos que sean superiores al RampUp configurado en los casos de estudios, a fin de evitar las variaciones de tonelaje y que se mantenga una producción incremental en este periodo de tiempo, (Rodríguez 2018).

Para el agendamiento en la planificación minera, es natural discretizar el tiempo en periodos a fin de buscar la secuencia que permite el máximo valor del negocio minero, para un yacimiento. A la vez, tal como se discretiza el tiempo, también se hace el volumen de la mina a nivel de bloques en donde están sujetas a distintas restricciones como la de precedencia y limitaciones de recursos por periodo de tiempo, lo que implica en una multitud de variables que se incorporan al modelo de optimización. Una estrategia para afrontar este problema está en separar el horizonte de evaluación del agendamiento  $T$  en ventanas de tiempo  $\tau$ , donde  $1 \leq \tau \leq T$ . El algoritmo busca una solución para cada ventana de tiempo, agendando los bloques que debieran salir durante ese periodo, para luego pasar a la ventana siguiente. (Cullenbine et al. 2011) aplican una versión modificada de esta estrategia, donde dualizan las restricciones en los periodos posteriores a la ventana en una mina a cielo abierto, Figura (4.4) los bloques que se extraen por ventanas de tiempo, donde el  $\tau$  corresponde a 5 y el  $T$  a 15.

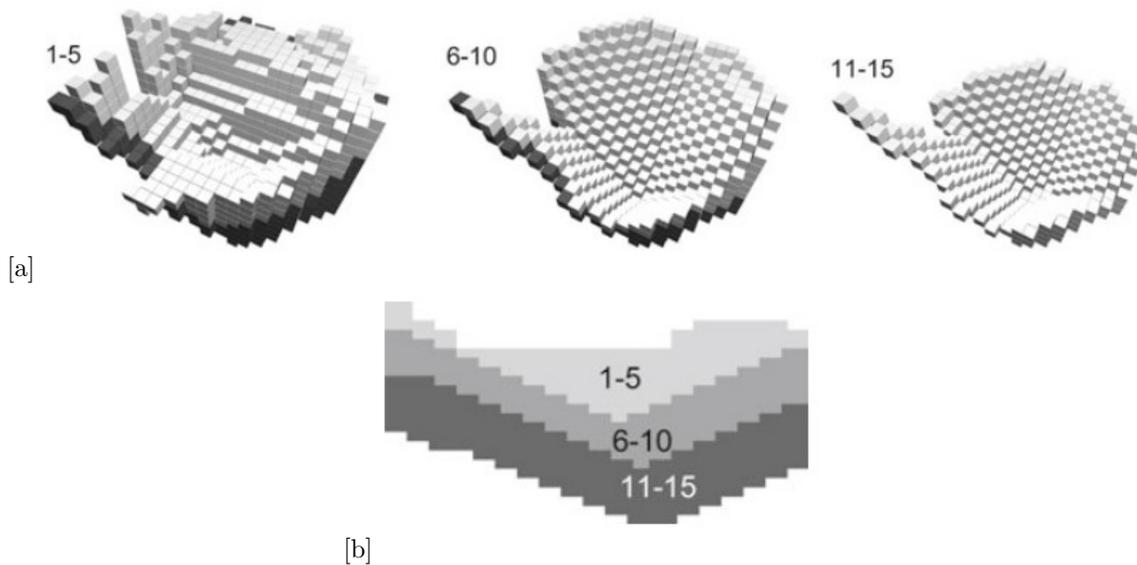


Figura 4.4: Heurística de Ventanas. Fuente: (Cullenbine; Wood y Newman 2011)

El algoritmo consiste en los siguientes pasos:

- Se escoge un tamaño de ventana como horizonte de evaluación,  $|\tau|$ .

- Como parámetro opcional, se puede escoger un tamaño de una subventana  $\xi$ , que corresponde a la cantidad de periodos donde se guardará la solución. . También define el número de periodos en que se va a mover la ventana de tiempo,(donde  $1 \leq \xi \leq \tau$ )
- Como primera iteración se agendará periodos que se encuentren dentro del rango de  $\tau$ .
- Posteriormente se guarda la información del agendamiento que corresponde a la subventana escogida  $\xi$ .
- Luego se evalúa la siguiente ventana de tiempo  $\xi + \tau$ . Los bloques que fueron agendados en la primera iteración son extraídos del problema de optimización, así hasta llegar el tiempo T.

(**Rodriguez 2018**), indica que el problema principal de esta heurística es que como son ventanas de tiempo más cortas, puede darse la posibilidad de que el problema de optimización debido a restricciones de capacidad no logre extraer bloques de mineral en profundidad durante dicha ventana, por lo que opta por no extraer material necesario para llegar a estos bloques debido a que implicaría un costo importante, lo que podría dejar estos bloques de minerales sin exponer para la siguiente ventana. Producto de lo anterior, el plan de producción generado a través de esta heurística puede presentar fluctuaciones (periodos con capacidad a tope y otros con gran holgura, con respecto al target impuesto en el modelo), (**Rodriguez 2018**), aconseja que se debe preferir subventanas que eviten estas anomalías en la producción, buscando el input adecuado para generar una extracción constante.

#### 4.5.1. MineLink

MineLink es una librería de estructura de datos para planificación minera, problemas de agendamiento y algoritmos para resolverlos. El objetivo de MineLink es ayudar el desarrollo en el área de algoritmos para planificación minera al proveer un conjunto de herramientas y problemas bien definidos sobre los cuales trabajar. Esta librería fue desarrollada por el Laboratorio de Planificación Minera Delphos, perteneciente al Departamento de Minas de la Universidad de Chile MineLink está desarrollado en el lenguaje de programación C++, pero también hay herramientas para su utilización en Python de forma de que sea posible interactuar y expandir la librería en forma simple para experimentar. MineLink ha sido desarrollado gracias al financiamiento del Advanced Mining Technology Center.

A través de la librería Minelink,toda la implementación de las distintas estrategias de agendamiento se realizó bajo funciones que pertenecen a esta librería.

Los primeros pasos con esta librería fue de utilizar las herramientas que proporciona esta librería para importar el modelo de bloques, definición de variables, rebloqueo y valorización de los bloques de acuerdo a la ley y parámetros económicos del proyecto.

Después se generan los arcos de precedencias correspondientes entre los bloques para describir un secuencia-típico de extracción para este tipo de minas. MineLink al ser una herramienta tan versátil, permite de

manera simple generar arcos bajo cualquier estructura de definición a través del lenguaje de programación Python.

Una vez ya establecidas las precedencias entre los bloques, se implementa cual va ser la función objetivo a maximizar, de acuerdo a restricciones asociadas a la capacidad de minado, precedencias y periodo de tiempo

#### 4.5.2. DOPPLER

DOPPLER (DELPHOS Open Pit Planner) es un software de planificación minera a cielo abierto enfocado a asistir al planificador en la toma de decisiones, con el objetivo de maximizar el valor del negocio. El software permite la planificación estratégica tradicional mediante el cálculo de envolvente económica, generación de pits anidados, selección de fases de producción y obtención de planes mineros. DOPPLER además ofrece herramientas de manejo y visualización de modelo de bloques, con el fin de analizar las características del yacimiento y soluciones provistas. En la Figura 4.5, muestra un ejemplo de la interfaz de DOPPLER.

Toda la interfaz gráfica utilizada en este trabajo de investigación, para observar el modelo bloques y agendamiento de extracción, fue con el Software DOPPLER, que permite con un alto rendimiento cargar modelos de grandes dimensiones y con muchos atributos.

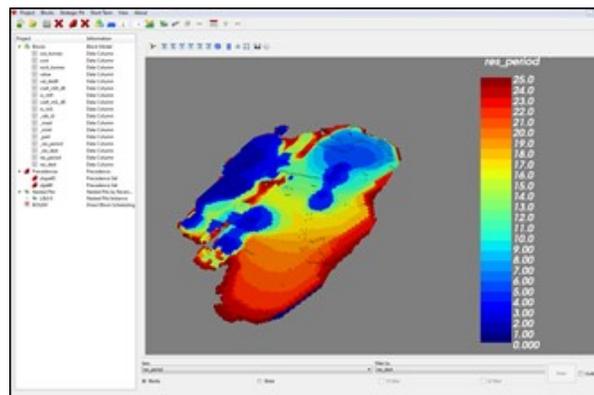


Figura 4.5: Interfaz DOPPLER

# Capítulo 5

## Caso de Estudio

### 5.1. Generalidades

El caso de estudio consiste en un modelo de bloques con una mineralización de cobre, de grandes dimensiones, con aproximadamente 6 millones de bloques. El modelo inicial contiene la información de leyes de CuT estimadas por kriging ordinario, y 100 simulaciones condicionales, además de la información de la densidad y tonelaje.

Las dimensiones del modelo inicial se presentan a continuación en la Tabla 5.1 con un tamaño por bloque de 10 x 10 x 10 [m], la cual, pertenece a una mina explotada por panel caving y corresponde a un yacimiento pórfido cuprífero de baja ley. En la Figura 5.1 muestra la información desplegada de la ley de cobre del depósito (Figura 5.1.a) y el primer escenario de simulación condicional (Figura 5.1.b).

	X	Y	Z
Máximo	25400	24200	2500
Mínimo	23900	26090	4670
N Bloques	150	189	217

Tabla 5.1: Dimensiones del modelo inicial, caso de estudio.

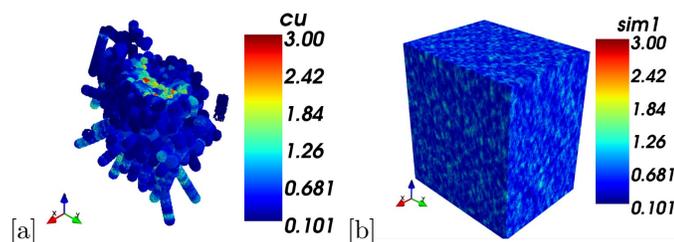


Figura 5.1: Vista isométrica del modelo de bloques. a) Ley de Cobre; b) Primer escenario de simulación de leyes de cobre

Finalmente, se construyen las curvas de tonelaje-ley para cuantificar las reservas para distintas leyes de corte. Esto se logra a través del inventario de reservas del yacimiento que se encuentran en el rango inferior de

una ley de corte dada y calculando la ley media de todos los recursos cuya ley es superior o igual al mismo valor. En la Figura 5.2 se muestra la curva tonelaje-ley para la ley estimada (kriging) y para el conjunto de realizaciones: es posible observar que las estimaciones del modelo Kriging difieren de las realizaciones. El tonelaje del modelo estimado por Kriging ordinario es subestimado para las leyes de corte bajas y para las leyes de corte altas.

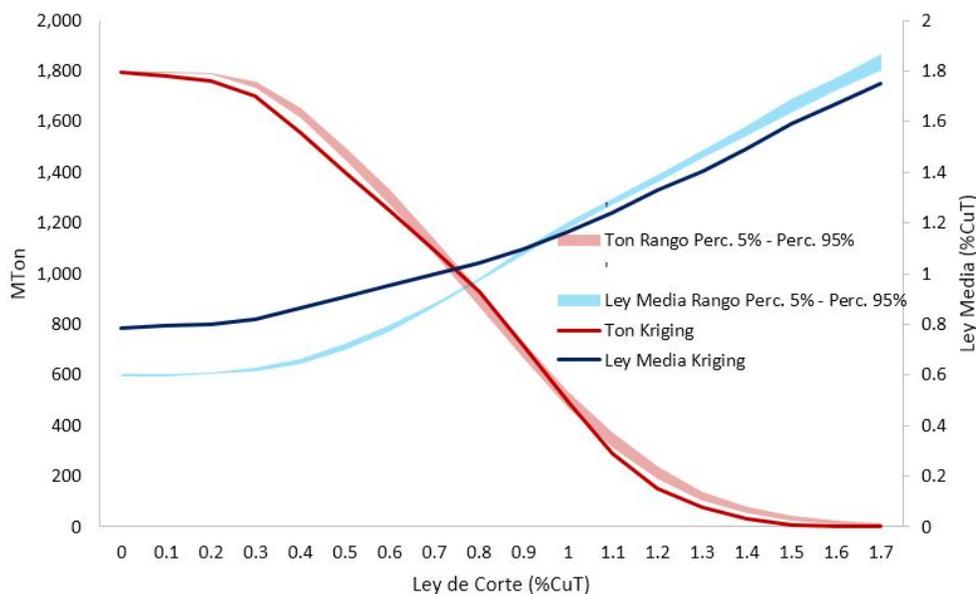


Figura 5.2: Curva Tonelaje Ley

Estas discrepancias de tonelaje y ley media se pueden atribuir al efecto suavizamiento hacia los valores extremos al realizar la estimación por Kriging. En teoría, las predicciones obtenidas de las realizaciones son más realistas con respecto a un modelo suavizado, ya que por construcción las simulaciones reproducen de mejor manera la variabilidad espacial de los datos verdaderos.

## 5.2. Definición de reservas

Antes de comenzar con la ejecución de las estrategias de agendamiento, se debe establecer la envolvente económica y posteriormente el sector de la envolvente en la que se realizará el caso de estudio.

A través del modelo de dilución de Laubscher, ver **Sección 2.2.3**, se diluyen las leyes y las simulaciones de acuerdo a los parámetros de la Tabla 5.2. Estas leyes diluidas son valorizadas para comenzar con el cálculo del piso o footprint económico, que se basa en fijar una cierta cota o nivel  $i$ , a partir del cual se calculará la valorización del bloque, dicho valor corresponde al beneficio según el nivel  $i$  en el que se encuentre el bloque. Seguidamente se obtiene el valor acumulado que contiene la suma de los bloques de los niveles superiores hasta llegar a la máxima altura de columna ingresada. Aquellas columnas con valores positivos, se le resta el costo de desarrollo por área [ $USD/m^2$ ]. Todas aquellas columnas después de descontar el costo por desarrollo

que aun sean positivos, son consideradas en calculo del recuento del beneficio por nivel.

Aquellos niveles que tienen una mayor recurrencia de obtener el valor máximo por cada escenario, es el que será considerado como cota base para el cálculo de la envolvente. Para ello se utiliza el modelo de optimización de la generación de envolvente económica que está basado, en parte, en el algoritmo de pit final y restricciones geométricas para emular la forma que tendría la envolvente de la mina (**Vargas 2014**), explicado en la **Sección 2.2.4**.

El resultado de la optimización se puede observar en la Figura 5.3. En este caso, el piso óptimo resultante corresponde a la cota 3,550 [m].

Descripción	Unidad	Valor
Precio del cobre	USD/Lb	2.6
Costo Mina	USD/Ton	9.1
Costo Proceso	USD/Ton	12.1
Costo Refinación Cu	USD/Lb	0.35
Costo Preparación Mina	USD/m <sup>2</sup>	2,000
Recuperación metalúrgica	%	87
Tasa de descuento	%	12
Altura de Columna	m	300
Regularidad de Tiraje	-	0.6
Altura de Interacción	m	90

Tabla 5.2: Parámetros técnicos y económicos, para cálculo de reservas.

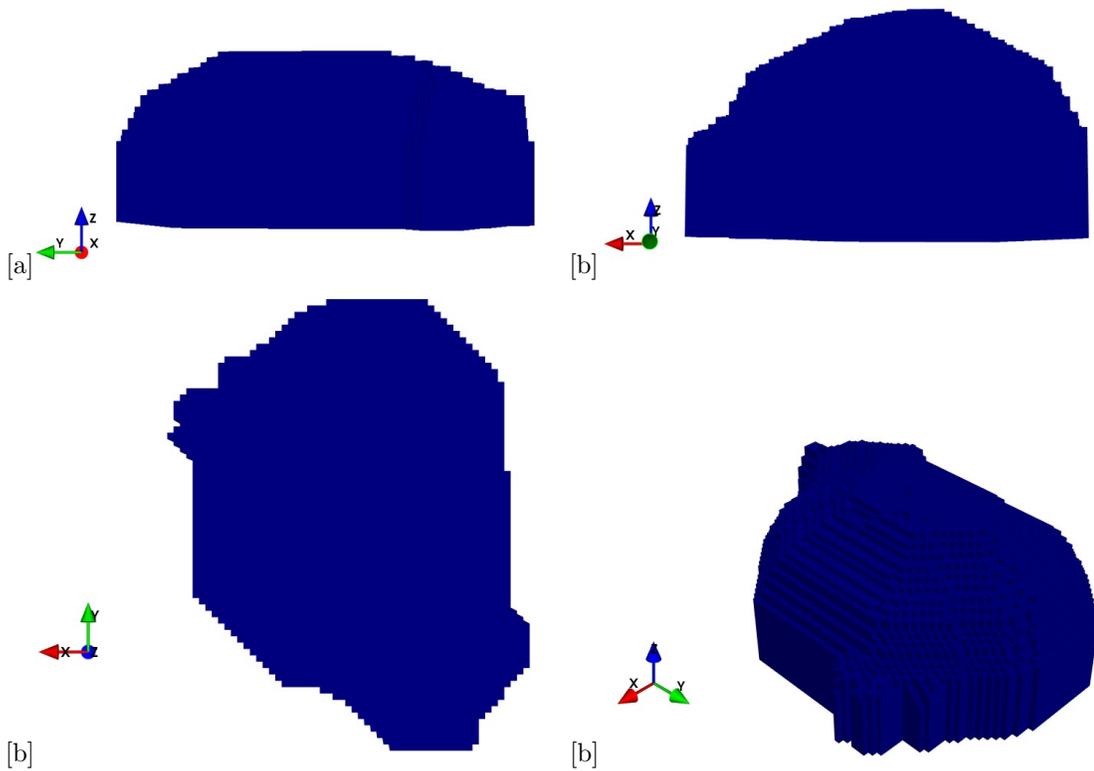


Figura 5.3: Vistas de la envolvente económica, cota 3,550 [m], (a) Vista YZ, (b) Vista XZ, (c) Vista XY, (d) Vista Isométrica.

### 5.3. Rebloqueo y definición de área de hundimiento

A fin de disminuir la cantidad de variables en el proceso de optimización, en la ejecución de los agendamientos múltiples, se aplica un rebloqueo cambiando los tamaños de los bloques a 30 x 30 x 30 m. Además, se reduce la extensión del modelo de bloques limitándolo solo a la cantidad de niveles presentes en la envolvente. Por lo tanto, el nuevo modelo de bloques queda con las siguientes características:

Items	Modelo Rebloqueado	Modelo Original
N de Bloques	89,782	6,151,950
Dimensión del bloque [dx, dy, dz]	30 m x 30 m x 30 m	10 m x 10 m x 10 m

Tabla 5.3: Características del modelo de bloques en estudio

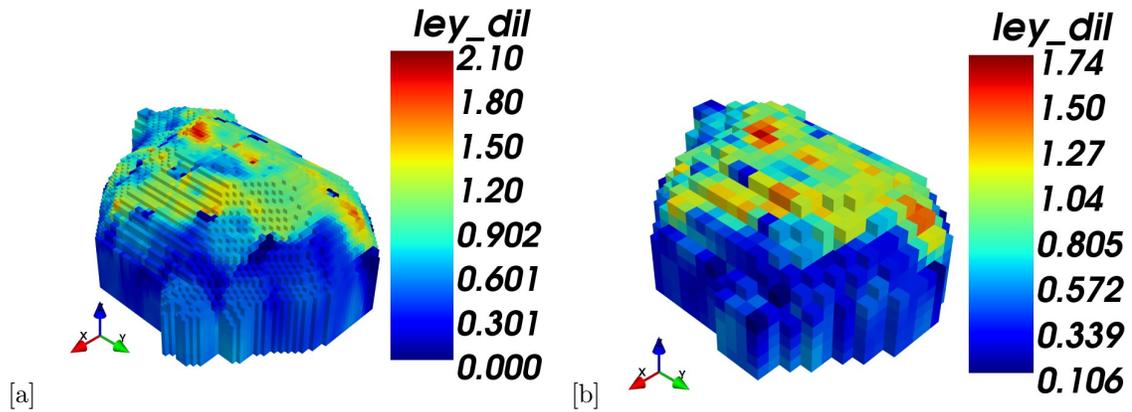


Figura 5.4: Vista isométrica, despliegue de ley diluida por Modelo de dilución Laubscher. (a) Envolvente económica en tamaño de 10x10x10 [m], (b) Envolvente económica rebloqueada a 30x30x30 [m]

Para generar el caso de estudio se define un área que cumpla con los criterios de anchos y máximos recomendados para este tipo de explotación, como se especifica en la **Sección 1.4.1**. Es así que se selecciona un área que tiene una extensión máxima es de 510 [m] de largo y 270 [m] de ancho, con un área total de aproximadamente 147,600 [m<sup>2</sup>].

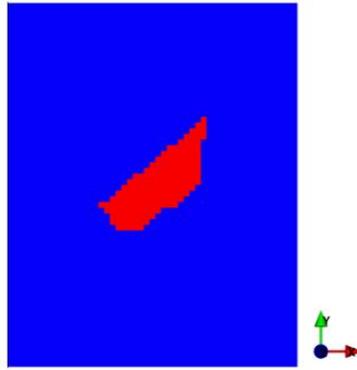


Figura 5.5: Contorno piso de agendamiento cota 3,550[m], vista planta

## 5.4. Posición de los puntos de inicio

Ya establecido el área para el agendamiento, se utilizan 2 direcciones opuestas que corresponden a NE y SW, como se observa en la Figura (5.6) . A la vez la distribución de leyes de cobre y beneficios acumulados por columna presenta una mayor concentración en el centro del piso.

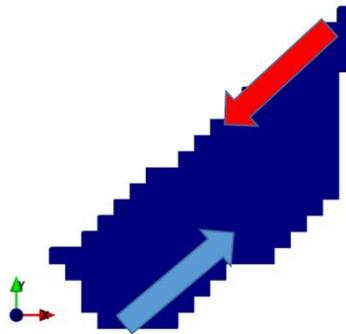


Figura 5.6: Dirección NE (Flecha azul), Dirección SW (Flecha roja)

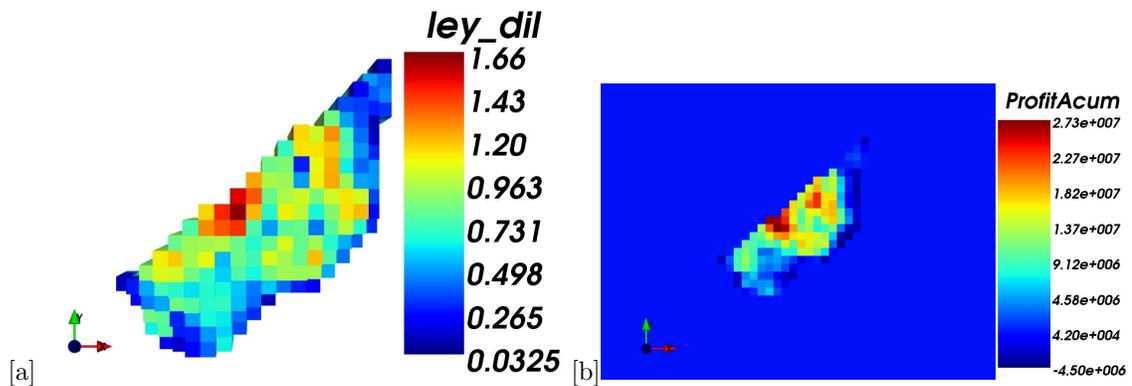


Figura 5.7: Distribución de leyes de cobre diluida en el Footprint (Imagen [a]), Distribución de beneficio acumulado por columna en el Footprint (Imagen [b]).

## 5.5. Agendamiento a largo plazo

Los modelos de agendamiento desarrollados en este trabajo tienen una base de periodicidad anualizado, considerando parámetros económicos y operacionales, incorporando temporalidad al problema de optimización a través de capacidades de procesamiento y tasa de descuento. Como criterio general, los parámetros presentados en la Tabla (5.4) son iguales para todos los casos de estudios, a la vez dado que el problema a resolver posee un tamaño relativamente grande (proceso iterativo con muchas restricciones y periodos), se utilizó para resolver todos los problemas involucrados en este trabajo de investigación la heurística de ventanas móviles descrita en la Sección de metodologías.

Los otros parámetros requeridos por el modelo de secuenciamiento y que se mantienen invariables para todas las estrategias, son los siguientes:

- Horizonte o periodos de planificación: se considera la extracción de todos los recursos de la envolvente.
- Tasa de descuento: 12 % anual.
- Para la secuencia de extracción cada bloque ubicado en el Footprint de la cota 3,550[m], representará a dos puntos de extracción de 15 x 15 [m].
- La metodología de resolución para todos los casos, será por la heurística de ventanas móviles incorporada en la Liberia MineLink con un tamaño de ventana de 9 periodos, de subventana de 8 periodos .

Descripción	Unidad	Valor
Numero de Periodos	Años	20
Capacidad Mínima de minado por periodo en Régimen	Mt	4.56
Capacidad Máxima de minado por periodo en Régimen	Mt	5.77
Capacidad Máxima de minado por periodo en Periodo inicial	Mt	0.9 * t
Periodos de Ramp-Up	Años	6
Tasa de desarrollo	m2/Año	9,000
Área Inicial	m2/Año	12,000
Precio del cobre	USD/Lb	2.6
Costo Mina	USD/Ton	9.1
Costo Proceso	USD/Ton	12.1
Costo Refinación Cu	USD/Lb	0.35
Recuperación metalúrgica	%	87
Tasa de descuento	%	12
Escenarios	S	100
Dirección		45-225
Frentes Activas	unidad	1
Área del Footprint	m2	147,600
Altura de columna promedio	m	300

Tabla 5.4: Parámetros de valorización del modelo de bloques

## 5.6. Estrategias de agendamiento

Las estrategias a evaluar en esta etapa del trabajo utilizan como base una sola asignación de destino configurado para todas las estrategias (agendamiento monorecurso, con bloques enviados a proceso). A continuación, se detallan las estrategias de agendamiento que se implementan, donde cada uno de ellos se utilizan 2 puntos diferentes de inicio del caving, correspondientes a los de la Figura (5.6) .

- **Estrategia de agendamiento tradicional por kriging:** Esta estrategia considera como variable económica la valorización obtenida por la ley de CuT estimada por Kriging ordinario será el caso base para la evaluación de las siguientes estrategias.
- **Estrategia de agendamiento por índice de recurrencia de pertenencia por periodo:** A través de un proceso iterativo, se generan múltiples agendamientos considerando como variable económica la obtenida por la ley de CuT generadas en las simulaciones condicionales. Posteriormente se almacena la información de los diferentes planes a través de un índice en la cual es considerado como una nueva variable para el agendamiento. La función objetivo de este nuevo plan es encontrar la decisión de agendamiento que permita maximizar la confiabilidad del sistema.
- **Estrategia de agendamiento utilizando medida de riesgo:** Esta estrategia considera como variable económica en la valorización de los peores beneficios obtenidos por el rango de simulaciones condicionales a escala de bloques, por lo tanto la función del plan de producción es maximizar el VAN en función de las peores ganancias obtenidas a escala de bloques, de acuerdo al conjunto de simulaciones de leyes valorizadas.

### 5.6.1. Estrategia de Agendamiento tradicional Dirección NE

Los resultados del agendamiento con respecto a una dirección de NE se pueden observar en la Figura (5.8). Este corresponde al plan de producción utilizando la decisión de kriging con un ramp-up 6 años, operando por 20 periodos entregando un VAN total de 337 [MUSD] con respecto al valor por kriging y de 449 [MUSD] considerando el promedio de las realizaciones. Las fluctuaciones en la producción para los periodos de régimen corresponden a la permitida por el rango de tolerancia permitida en el modelo de optimización +- 10%, a fin de que se genere una solución factible al problema de agendamiento. Con respecto a la ley media enviada a proceso se observa que las realizaciones vs la ley estimada por kriging difieren en los primeros periodos, causando una subestimación del valor de aquellos bloques que son extraídos durante estos periodos.

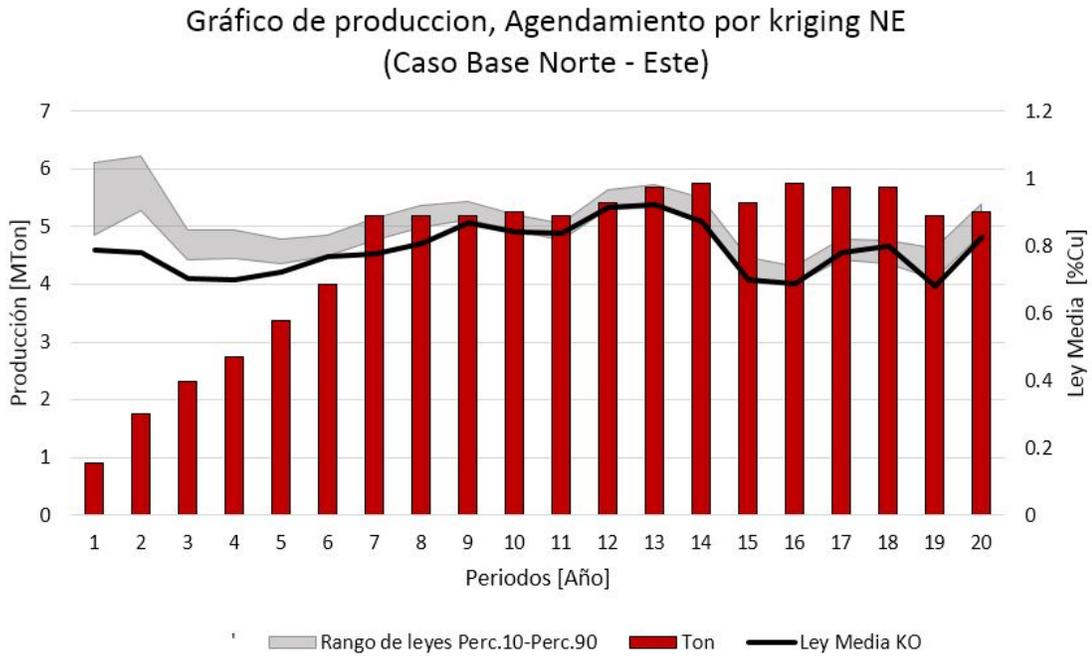


Figura 5.8: Plan de producción para el caso de estudio por agendamiento tradicional utilizando la valorización por kriging, bajo una dirección NE

Para las Figuras (5.9.a) y (5.9.b), se presentan todos los bloques que se agendan durante la vida de la mina.

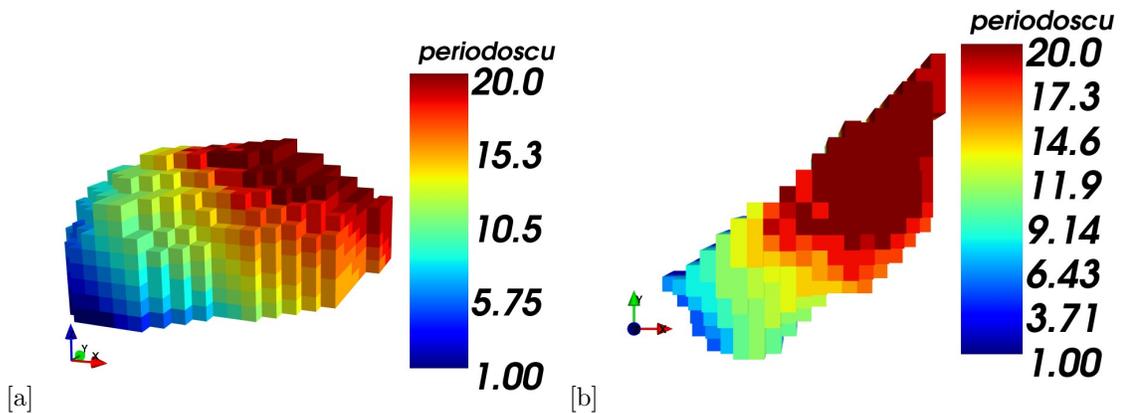


Figura 5.9: Resultado de agendamientos de bloques desde la dirección NE, utilizando el enfoque tradicional de agendamiento. (a) Vista Vista Isométrica. (b) Vista en Planta

### 5.6.2. Estrategia de Agendamiento tradicional Dirección SW

Los resultados del agendamiento con respecto a una dirección de SW se pueden observar en la Figura (5.10) . Este corresponde al plan de producción utilizando la decisión de kriging con un ramp-up 6 años, operando por 20 periodos entregando un VAN total de 378 [MUSD] con respecto al valor por kriging y de 418 [MUSD] considerando el promedio de las realizaciones. En este caso no existe fluctuaciones durante el periodo de régimen, manteniendo las capacidades de producción a tope. Sin embargo, la baja de producción en los

últimos 5 periodos, es debido a que, en la génesis del modelo de optimización, se libera la restricción del límite inferior en la producción para permitir un descenso de la capacidad productiva. Con respecto a la ley media a diferencia del punto anterior, se observa que las realizaciones versus la ley estimada por kriging no difieren en gran medida a los inicios de la producción.

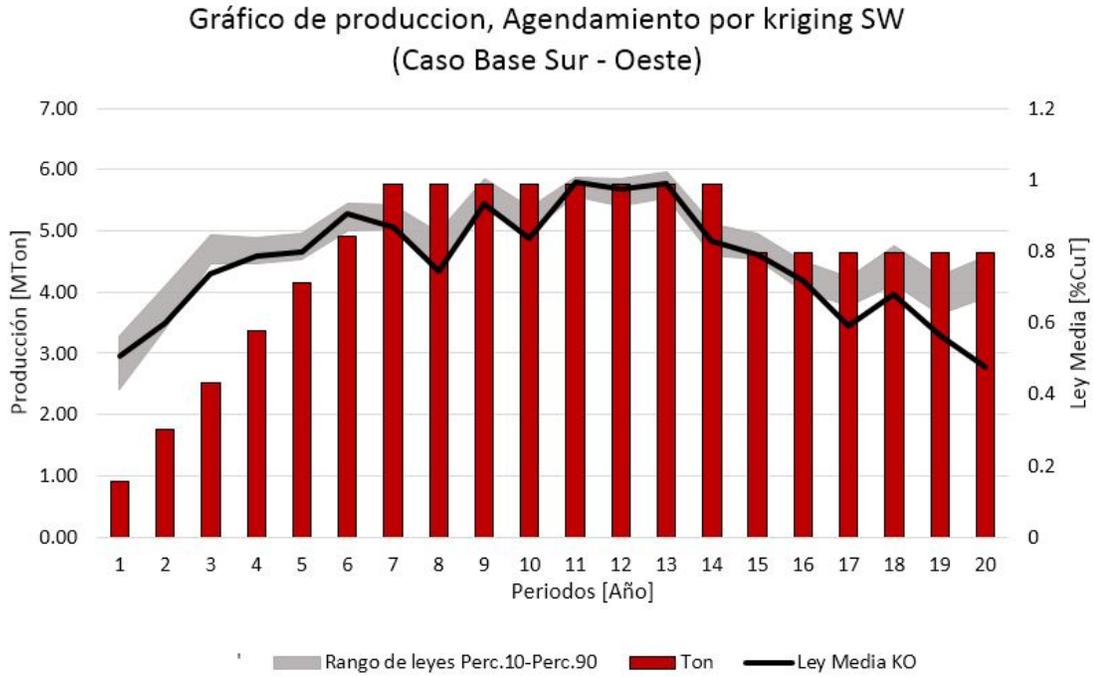


Figura 5.10: Plan de producción para el caso de estudio por agendamiento tradicional utilizando la valorización por kriging, bajo una dirección SW

En la Figura(5.11.a) y (5.11.b) se presenta los agendamientos para todos los periodos bajo una dirección de minado SW, se debe destacar que, a diferencia con respecto al agendamiento anterior, existe una mayor variabilidad en la asignación de periodos por bloque.

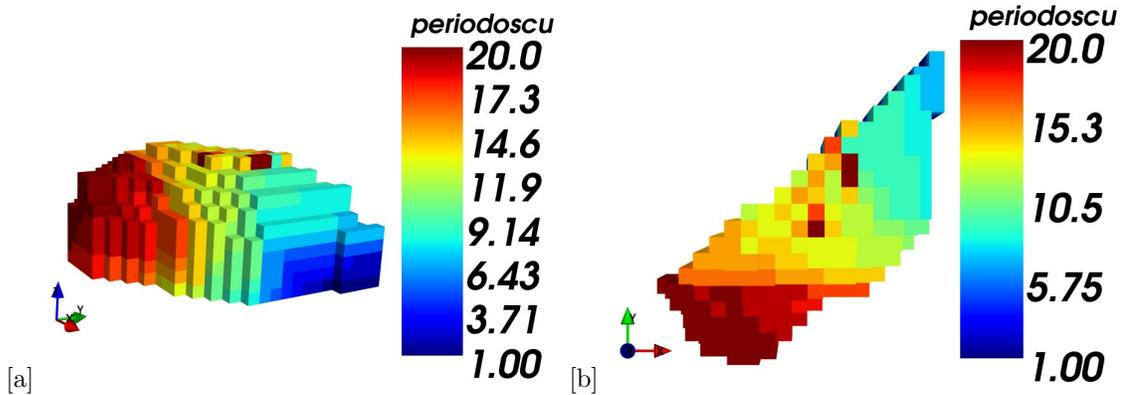


Figura 5.11: Resultado de agendamientos de bloques desde la dirección SW, utilizando el enfoque tradicional de agendamiento. (a) Vista Vista Isométrica. (b) Vista en Planta

### 5.6.3. Estrategia de agendamiento por índice de frecuencia de pertenencia por periodo

En las secciones anteriores se han utilizado las realizaciones como parámetro evaluador del desempeño en la decisión de agendamiento basado a la información obtenida por la metodología tradicional como la ley estimada por Kriging. Como resultado se obtuvo un plan de producción bajo una dirección determinada optimizadas específicamente para el escenario utilizado. Evidentemente algunas secuencias bajo cierto escenario responderán mejor que otras frente a la incertidumbre del depósito. En este aspecto se busca contener toda la información proporcionada por cada plan de agendamiento como fuente de nivel de riesgo producto de la incertidumbre. El procedimiento para evaluar la incertidumbre se esquematiza a través de la Figura (5.12). El proceso consiste en evaluar cada plan utilizando las realizaciones obteniendo indicadores importantes (VAN, toneladas, leyes, etc.) para finalmente calcular sus estadísticas asociadas.

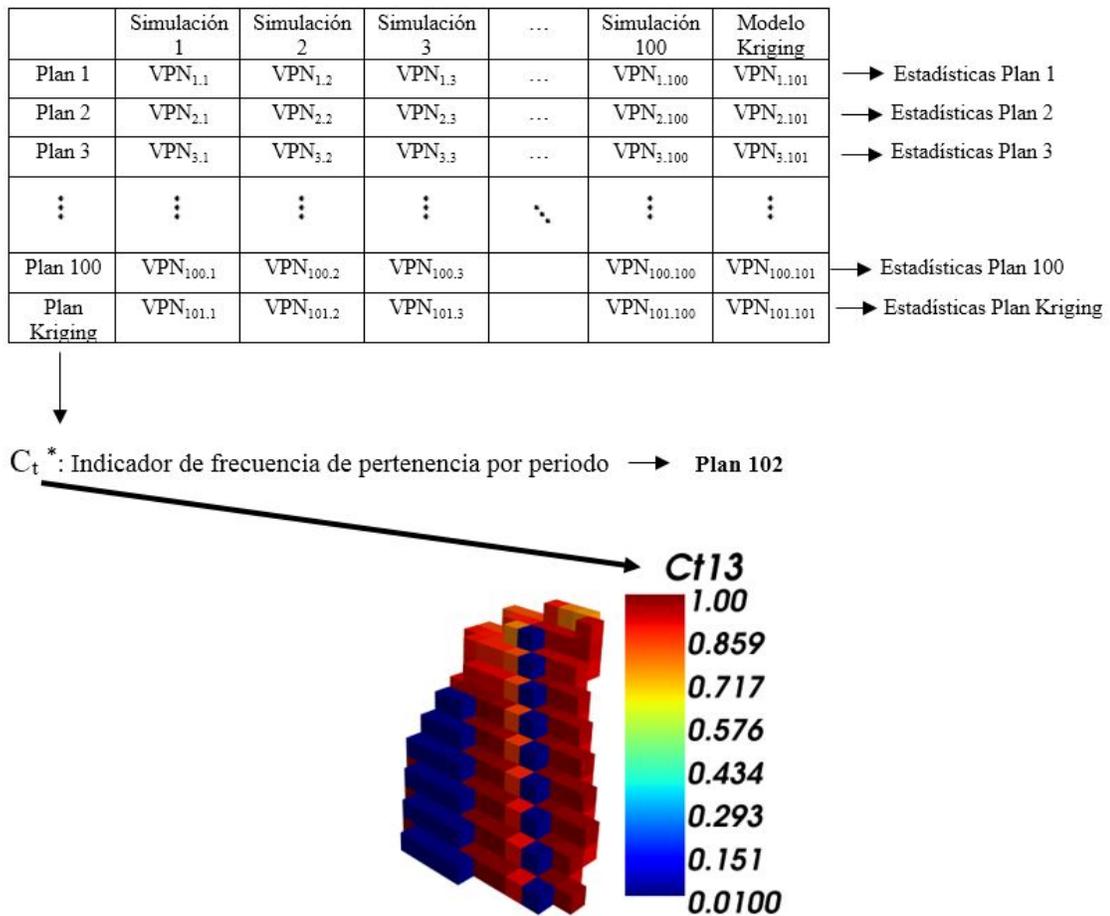


Figura 5.12: Esquema de procedimiento de agendamiento por índice de frecuencia de pertenencia por periodo

#### 5.6.4. Estrategia de agendamiento por índice de frecuencia de pertenencia por periodo, dirección NE

Como preanálisis, en la Figura (5.13) se presenta un gráfico de Boxplot donde se despliega el rango de las valorizaciones obtenidas por la decisión de agendamiento de cada plan, que están sujetas a cada escenario de ley.

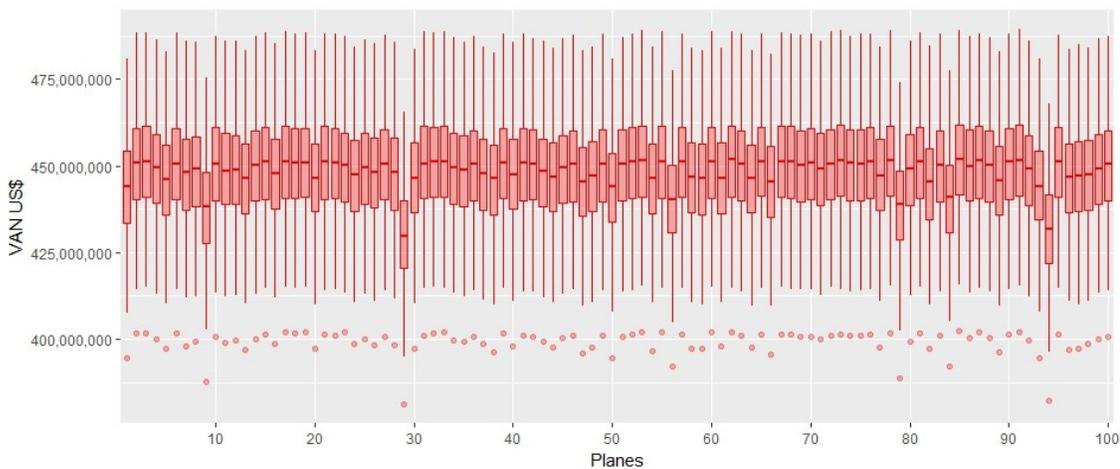


Figura 5.13: Perfiles de valores de cada plan obtenido por cada simulación condicional

Como se observa en el gráfico boxplot, de acuerdo al conjunto de valorizaciones por cada plan de producción obtenidas para cada escenario, la esperanza del VAN es casi lineal para cada uno de los planes, donde el plan generado dentro de la realización 85 es la que logra el mejor VAN esperado con un valor de 462 [MUSD], alcanzando +22 [MUSD] (5.1%) adicionales con respecto al peor plan (Escenario 29). A fin de cuantificar la variabilidad de la asignación de los distintos planes, se obtiene un histograma de frecuencias de asignación de periodos, para un conjunto de bloques ubicados a distintos niveles de la envolvente, Figura (5.14).

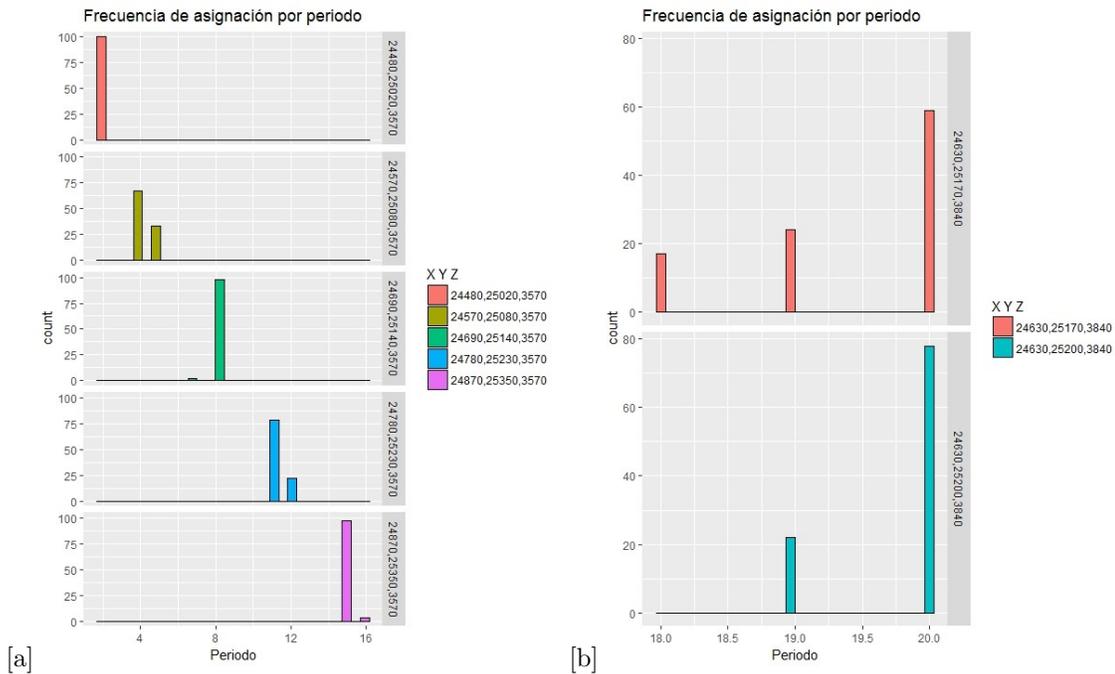


Figura 5.14: Gráficos de frecuencia de asignación por periodo. (a) Bloques ubicados a nivel de piso. (b) Bloques ubicados en el techo de la envoltente

Dado al set de bloques analizados en el ANEXO, se observa que existe una tendencia de aumentar la variabilidad de asignación a medida que sube la cota con respecto al nivel de producción. La razón de este comportamiento, se debe a que los bloques ubicados en los niveles superiores, se encuentran liberados de las restricciones de las precedencias para el control de caveback y aperturas de áreas.

Una vez calculado el índice de asignación por periodo a cada bloque, los resultados de esta estrategia de agendamiento bajo una dirección NE se puede observar en la Figura (5.15). Comparando esta misma secuencia de minado con respecto a la metodología tradicional, se puede observar que existen diferencias en el cumplimiento de la producción, especialmente en el periodo de régimen donde la capacidad se mantiene constante durante gran parte de la vida de la mina sin llegar a su máxima capacidad.

La razón de este comportamiento, radica en que el modelo de optimización utiliza la información de los 100 planes y solo asigna aquellos bloques para cada periodo  $t$  a los bloques que tienen la mayor tasa de recurrencia de ser extraído durante ese periodo.

Por lo tanto, de acuerdo a los resultados obtenidos por el plan de producción utilizando la decisión por índice de recurrencia con un ramp-up 6 años, y operando por 20 periodos entrega un VAN total de 370 [MUSD] con respecto al valor por kriging y de 441 [MUSD] considerando el promedio de las realizaciones. Con respecto a la ley media enviada a proceso se comporta de manera muy similar a la obtenida por el agendamiento tradicional, esto se debe a la alta restricción que presenta el modelo optimización para la secuencia de minado que es invariante para todos los casos.

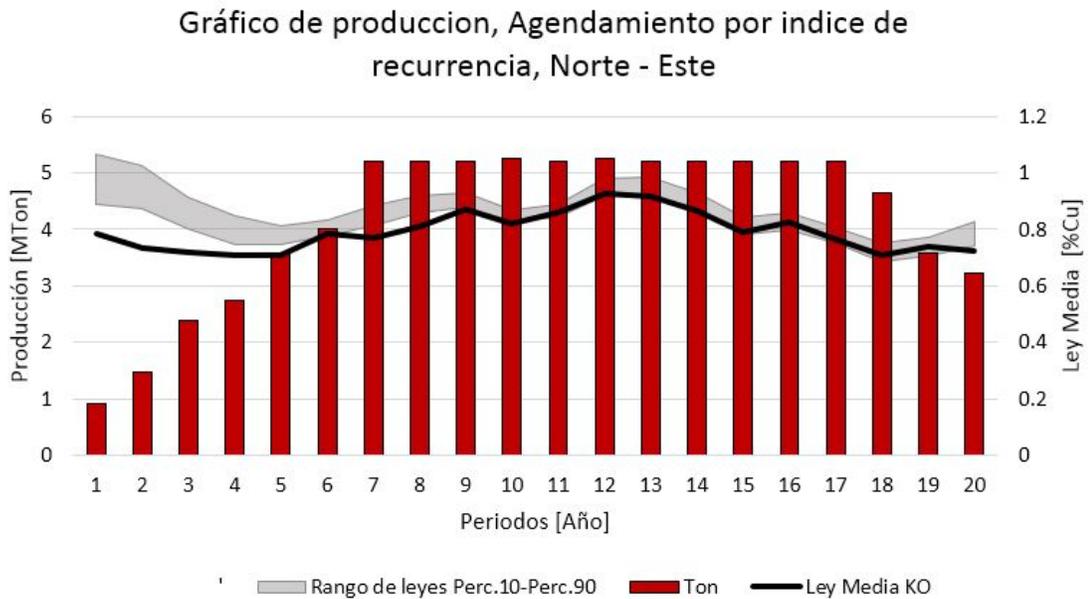


Figura 5.15: Plan de producción para el caso de estudio por índice de frecuencia de pertenencia por periodo, bajo una dirección NE

Los resultados del agendamiento utilizando este indicador, presenta diferencias en la secuencia de extracción de bloque, al compararlo con la metodología tradicional, esencialmente en los sectores donde se ha liberado la columna al requerimiento de apertura de área, es decir, la asignación de bloques cambia en gran medida en los contornos en el techo de la envolvente.

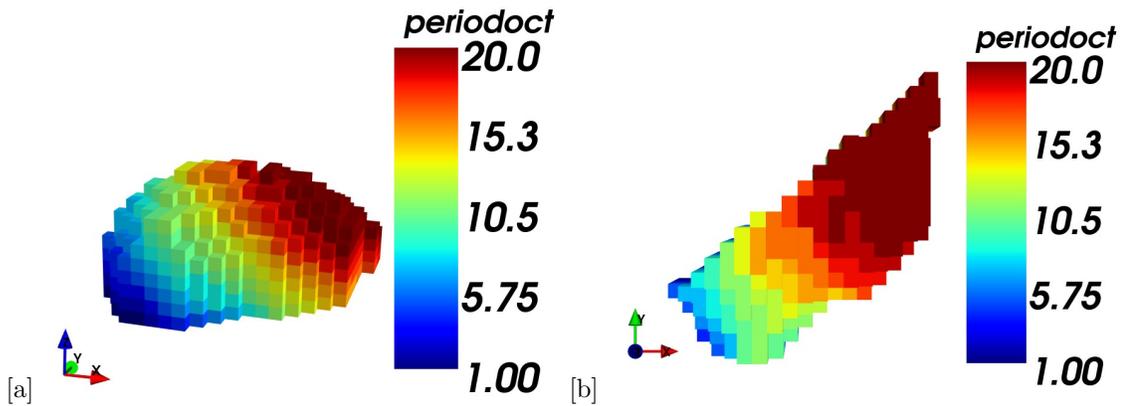


Figura 5.16: Resultado de agendamientos de bloques desde la dirección NE, utilizando estrategia de agendamiento por índice de recurrencia. (a) Vista Vista Isométrica. (b) Vista en Planta

### 5.6.5. Estrategia de agendamiento por índice de frecuencia de pertenencia por periodo, dirección SW

Al igual que el punto anterior, se presentan los rangos de valor de presente neto de los 100 planes obtenidos, pero esta vez de acuerdo a una dirección de minado SW. Figura (5.17).

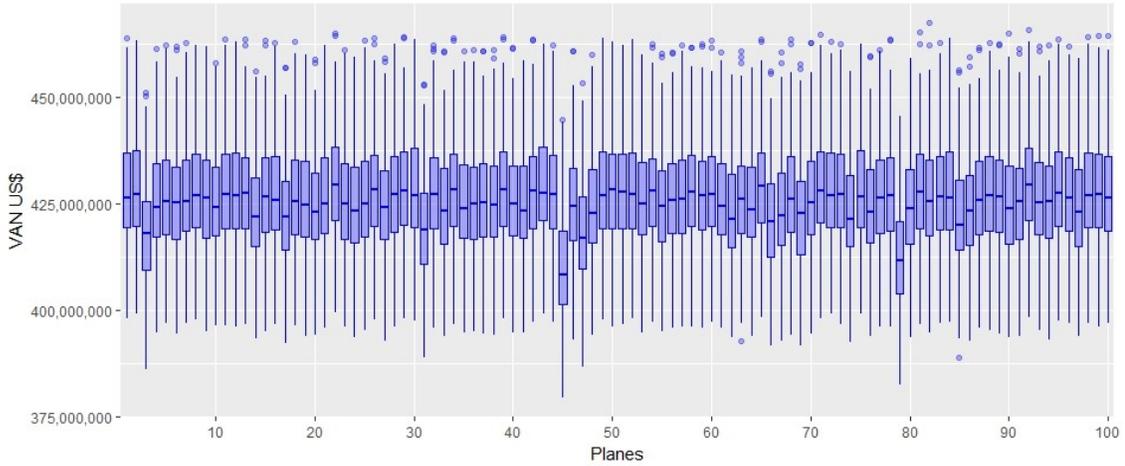


Figura 5.17: Perfiles de valores de cada plan obtenido por cada simulación condicional

Como se observa en el gráfico boxplot anterior, las distintas secuencias obtenidas para cada escenario, la esperanza del VAN es casi lineal para cada uno de los planes, sin embargo, se debe destacar que la tendencia global es cercano a los 425 [MUSD] a diferencia de los 450 [MUSD] obtenido por la secuencia NE (5.13) así también el plan generado dentro de la realización 22 es la que logra el mejor VAN esperado con un valor de 430 [MUSD], alcanzando +22 [MUSD] (5.0%) adicionales con respecto al peor plan (Escenario 45). De igual forma, con el fin de evaluar la variabilidad de las asignaciones, se procede plantear un histograma a nivel de bloques que mida la frecuencia de recurrencia de periodo de extracción. (ver Figura (5.18))

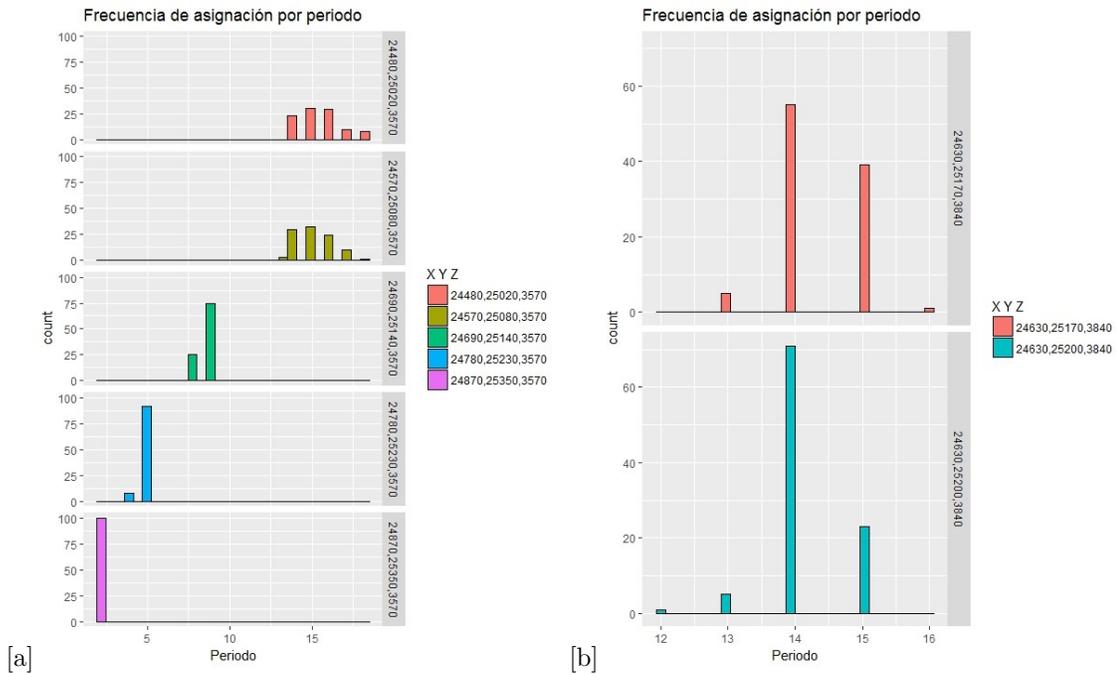


Figura 5.18: Gráficos de frecuencia de asignación por periodo. (a) Bloques ubicados a nivel de piso. (b) Bloques ubicados en el techo de la envolvente

Al igual que en el punto anterior el patrón se repite, existiendo una mayor variabilidad en la decisión de asignación de los bloques cuando estos se encuentran en la parte superior de la envolvente, a consecuencia de que estos bloques que representan a la columna que ya ha sido liberada de las restricciones operacionales (precedencias en función del caveback y apertura de área), tienen un mayor grado de libertad de decisión de minado en el modelo de optimización que los bloques que se encuentran en el primer nivel.

Los resultados del agendamiento con respecto a una dirección de SW, utilizando el índice de frecuencia se pueden observar en la Figura (5.19). Comparando este plan de producción con respecto al agendamiento tradicional, se observa que la capacidad de producción se mantiene constante, manteniéndose debajo de la capacidad máxima otorgada en el modelo. Además, se aprecia que en los últimos periodos la tasa de producción aumenta aproximadamente 10

Al igual que en el punto anterior donde se produce el mismo plan de producción, pero en sentido contrario, el modelo de optimización se encarga de asignar aquellos bloques que tienen la mayor probabilidad de ser minado en ese instante, considerando la información de los 100 planes individuales, lo relevante es que el modelo de agendamiento posterga para los últimos años de la vida de la mina aquellos bloques que presentan una mayor variabilidad.

El resultado obtenido utilizando esta estrategia con un ramp-up 6 años y operando por 20 años entrega un VAN total de 372 [MUSD] con respecto al valor por kriging y de 412 [MUSD] considerando el promedio de las realizaciones. Con respecto a la ley media la diferencia con la metodología tradicional, se mantiene un comportamiento mucho más suavizado, disminuyendo fluctuaciones de la ley media entre periodos.

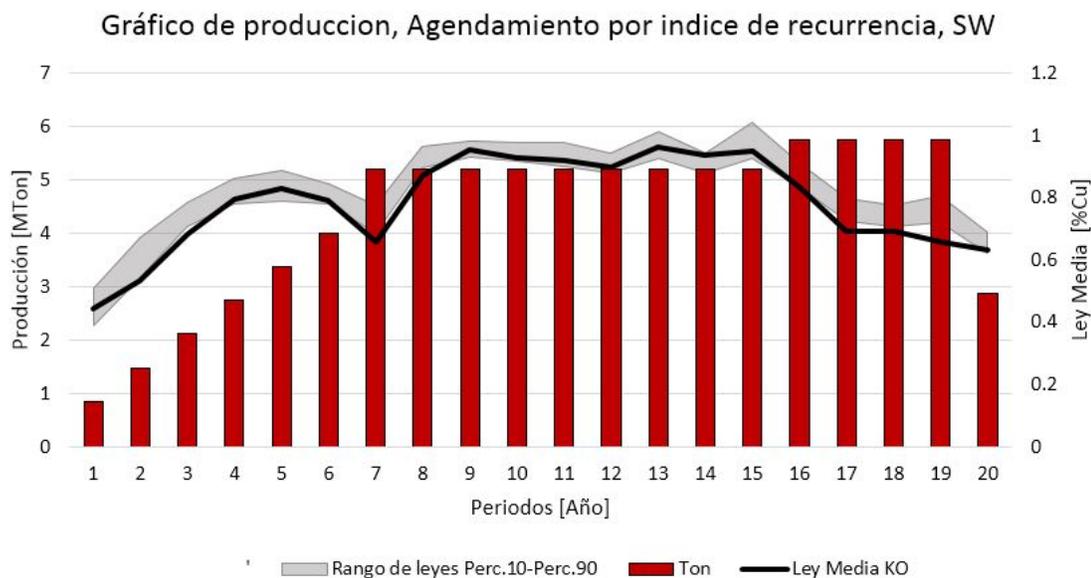


Figura 5.19: Plan de producción para el caso de estudio por índice de frecuencia de pertenencia por periodo, bajo una dirección SW

Tal como sucedió con el agendamiento NE, esta estrategia de planificación afecta principalmente a los bloques

que se encuentran en los límites de los envolventes, a los cuales corresponden a sectores del modelo que ya se ha liberado de la restricción de apertura de área y control de caveback.

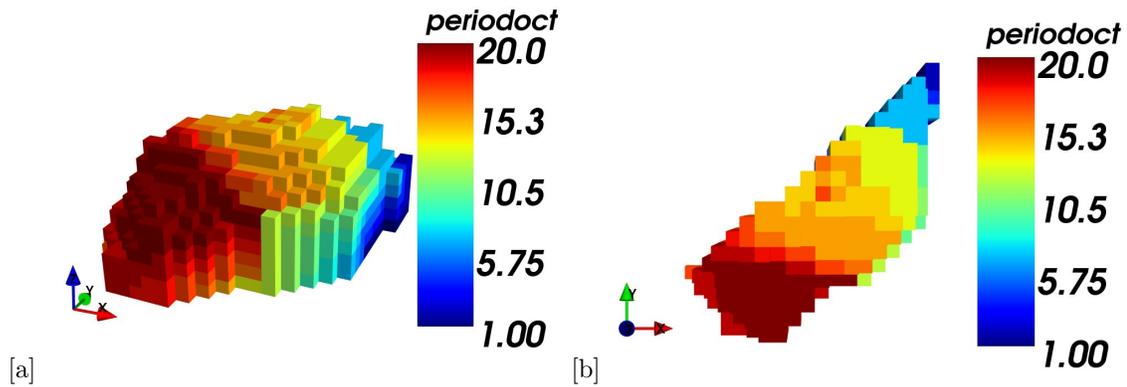


Figura 5.20: Resultado de agendamientos de bloques, por índice de frecuencia de pertenencia por periodo, bajo una dirección SW. (a) Vista Vista Isométrica. (b) Vista en Planta

## 5.7. Estrategia de agendamento valorizando la peor ganancia a nivel de bloque

El agendamento de esta estrategia de extracción, es de incorporar en la valorización del modelo de optimización el límite del 5% de los peores casos de la distribución de ganancias que se obtiene a nivel de bloques.

### 5.7.1. Estrategia de agendamento a través de las peores ganancias, dirección NE

Los resultados del agendamento con respecto a una dirección de NE se pueden observar en la Figura (5.21). Comparando este plan de producción con el agendamento tradicional, éste tiene un comportamiento con fluctuaciones de producción que ocurren entre periodos más intensificado que la estrategia de agendamento por el valor del kriging.

La razón de este comportamiento, es dada a la alta variabilidad que presenta el utilizar la información del peor escenario que tiene cada bloque en el agendamento, por lo que el modelo de optimización trata de buscar el conjunto de bloques que presenten el mejor valor en cada periodo generando fluctuaciones en el material que es enviado a proceso. El plan de producción utilizando esta estrategia con un ramp-up 6 años, operando por 20 periodos entregando un VAN total de 381 [MUSD] con respecto al valor por kriging y de 452 [MUSD] considerando el promedio de las realizaciones.

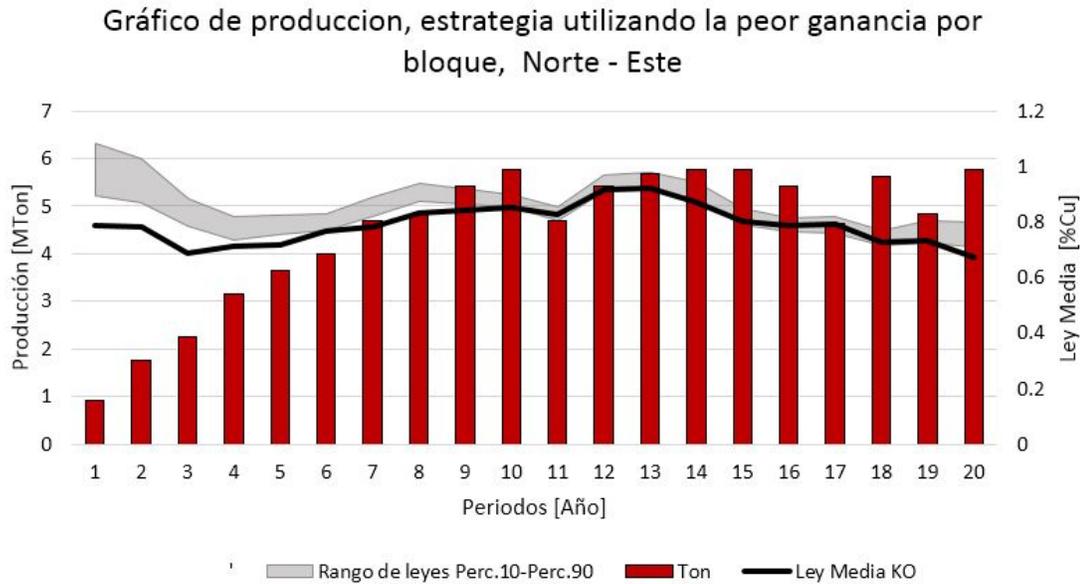


Figura 5.21: Estrategia de agendamiento a través de las peores ganancias, dirección NE

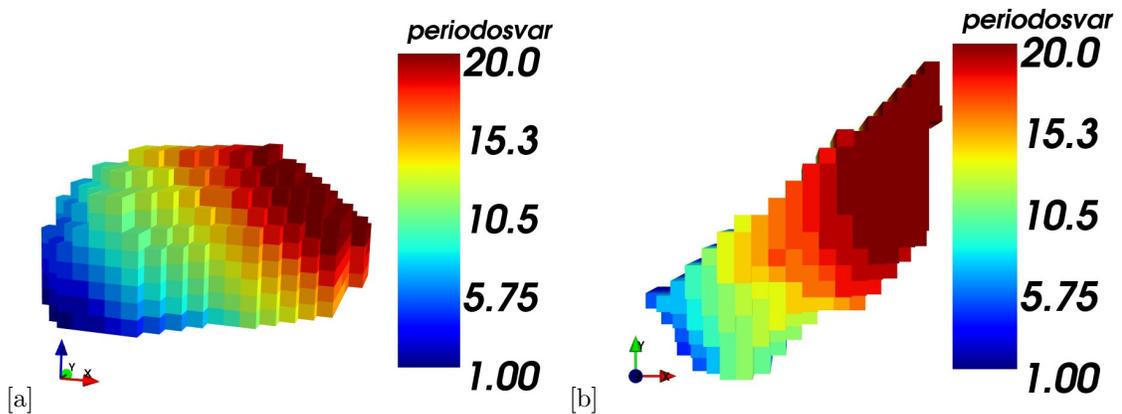


Figura 5.22: Resultado de agendamientos de bloques, a través de las peores ganancias, dirección NE. (a) Vista Vista Isométrica. (b) Vista en Planta

### 5.7.2. Estrategia de agendamiento a través de las peores ganancias, dirección SW

Los resultados del agendamiento con respecto a una dirección de SW se pueden observar en la Figura (5.23). En donde se puede verificar que tiene un patrón muy similar al plan de producción del caso base bajo la misma dirección de hundimiento. El plan de producción utilizando ésta estrategia con un ramp-up 6 años, operando por 20 periodos entregando un VAN total de 386 [MUSD] con respecto al valor por kriging y de 418 [MUSD] considerando el promedio de las realizaciones.

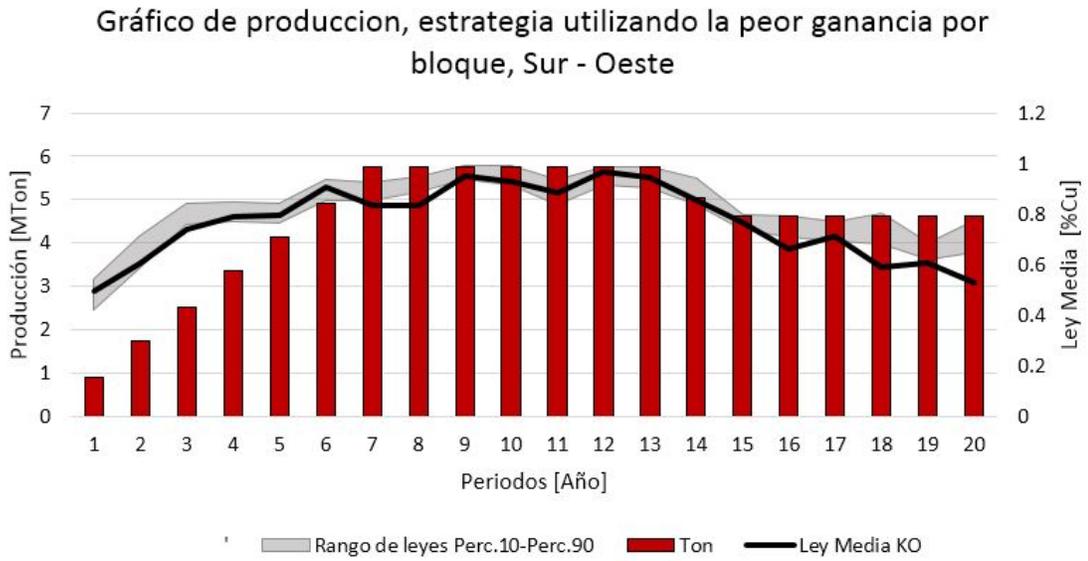


Figura 5.23: Estrategia de agendamiento a través de las peores ganancias, dirección SW

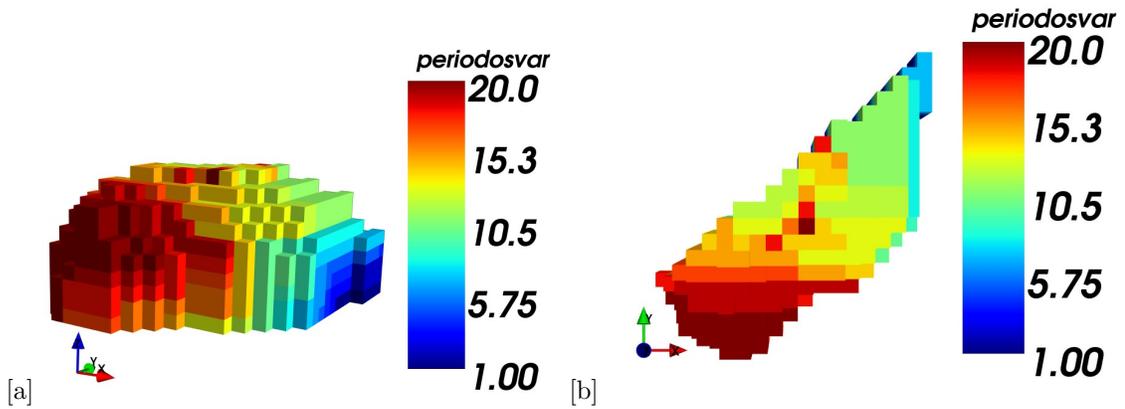


Figura 5.24: Resultado de agendamientos de bloques, a través de las peores ganancias, dirección NE. (a) Vista Vista Isométrica. (b) Vista en Planta

## Capítulo 6

# Análisis de resultados

### 6.1. Introducción

La aplicación de las distintas estrategias de agendamiento y los elementos utilizados en su optimización, corresponden a distintos enfoques para resolver la misma problemática, que es buscar el mejor método para implementar la incertidumbre geológica dentro de la ejecución de un plan minero subterráneo. Es así como en este capítulo inicialmente se analizará los principales indicadores de los planes de producción resultantes en el caso de estudio a fin de identificar las particularidades de cada una de ellas. Finalmente se compara el conjunto de las estrategias resultantes, pero con respecto a su dirección opuesta a fin de obtener el impacto que genera la toma de decisión de la dirección de minado cuando se acompaña de la información de distintas simulaciones condicionales. A continuación, se muestran los resultados del procedimiento de evaluación de la incertidumbre aplicado sobre las tres estrategias de agendamiento.

### 6.2. Tonelaje de mineral alimentando a planta

En una primera instancia se analizará el indicador de tonelaje de mineral enviado a planta, para cuantificar la variabilidad que presenta cada estrategia en el plan de producción. Para la secuencia de minado con una dirección Norte-Este de la Figura (6.1a), es posible observar que las estrategias de agendamiento por kriging y VAN-VaR, presentan desviaciones dentro de los límites propuestos en el modelo entre 5.77 Mton. y 4.56 Mton. a diferencia de la estrategia por índice de recurrencia que mantiene una tasa de extracción constante de 5.19 Mton. A la vez en la Figura (6.1b), la producción de tonelajes obtenidas por las tres estrategias es más constante, sin embargo, el patrón en el plan de producción por índice de recurrencia se repite, donde se mantiene una producción constante de 5.19 Mton. sin llegar a la máxima capacidad impuesta en el modelo de optimización. Este comportamiento es esperable, ya que el plan de producción fue optimizado con el fin de maximizar aquellos bloques que tienen una menor fluctuación en la asignación de minado por periodo, por ende, los bloques que poseen las características de alta variabilidad de asignación son postergados para los periodos venideros. Cabe destacar que las fluctuaciones presentes en los planes de producción no sobrepasan

el 6% del promedio de ingreso de tonelaje de mineral enviados a proceso durante el periodo de régimen.

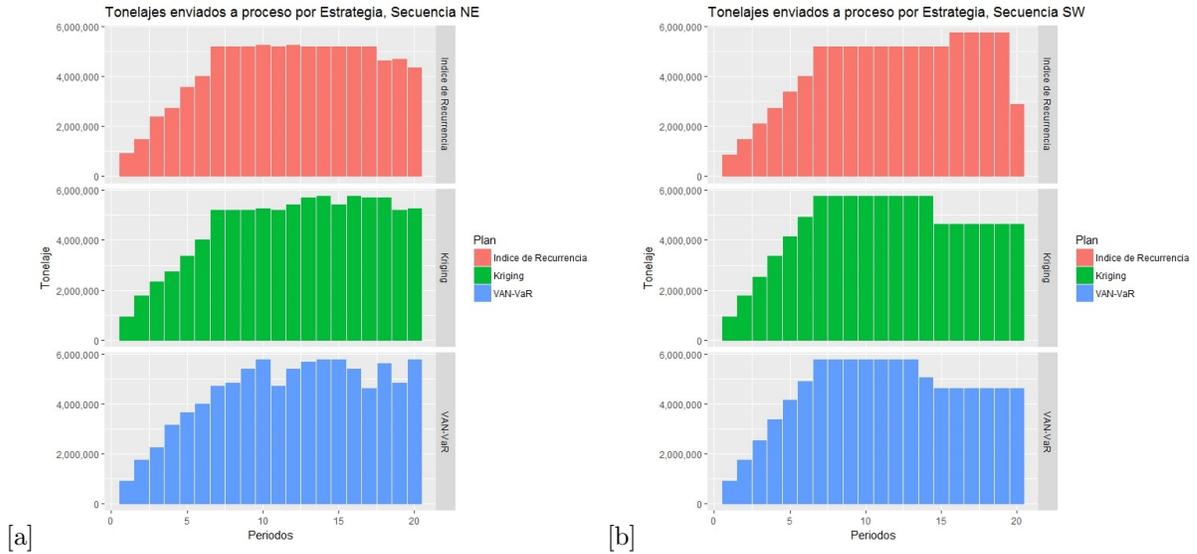


Figura 6.1: Planes de producción de acuerdo a estrategias y dirección. (a) Dirección NE. (b) Dirección SW

### 6.3. Evaluación de finos contenidos en la alimentación a planta

Para complementar la información anterior, en la Figura (6.2) se presentan las estimaciones de finos por periodo incorporando la incertidumbre entre los rangos de percentil 95% y 5% del conjunto de escenarios, bajo los tres tipos de estrategias y las dos direcciones de minado. Los comportamientos de ambas direcciones y en todas las estrategias, es esperable dada a las fluctuaciones que ocurren en la producción de material que es enviado a planta, revisado en el punto anterior. Lo destacable de estos gráficos y de las tablas que se encuentran en el **ANEXO** es que los rangos de variabilidad en la producción de fino para todas las estrategias son similares (P95 y P5), esto quiere decir, que la toma de decisión proporcionada por las distintas estrategias para generar una asignación de minado a cada bloque, no interfiere en la variabilidad de la producción del fino de cobre. La razón está, dada a la configuración del modelo de optimización creada para cada estrategia, en donde no se considera dentro de la función objetivo un costo por desviación de la producción, por lo tanto, es natural que en ninguno de los casos la variabilidad del rango de producción de finos disminuya.

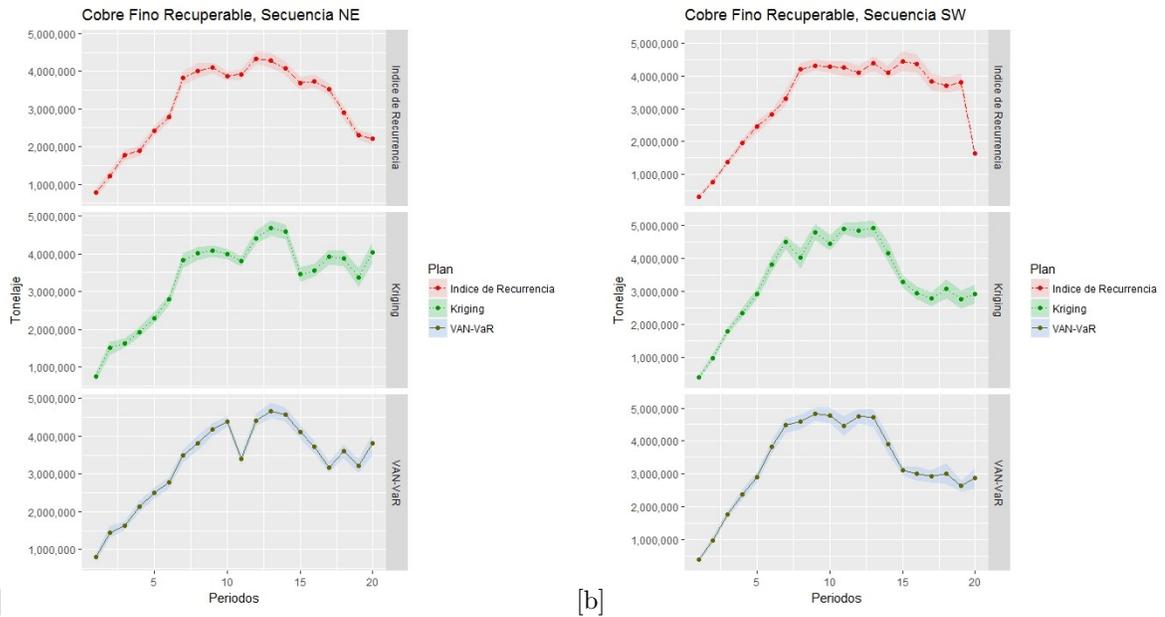


Figura 6.2: Incertidumbre de Finos contenidos de Cu por periodo y estrategia de agendamiento. (a) Dirección NE. (b) Dirección SW

## 6.4. Evaluación económica

Dentro de todos los indicadores de evaluación, esta es la más relevante en el sentido de generar una apreciación del comportamiento de la mina dada a una dirección de minado. Como ya se explicó en el capítulo de los antecedentes, actualmente existen herramientas que permiten evaluar la sensibilidad del yacimiento a distintos sentidos de hundimiento, utilizando como parámetro comparativo el beneficio asociado a esa secuencia, pero sin considerar información de incertidumbre geológica asociada a ello. Dado a esto, se evaluará el desempeño económico de las distintas estrategias para ambas direcciones, con el objetivo de estimar el mejor parámetro de evaluación para un modelo de optimización en la que incorpore incertidumbre geológica.

### 6.4.1. VAN acumulado por estrategia de agendamiento, bajo la misma dirección

En los gráficos de la Figura (6.3) y Figura (6.4), describen el VAN acumulado por periodo de las estrategias utilizadas en el caso de estudio, se destaca la poca disparidad que existen entre los rangos de valores en cada decisión de agendamiento cuando se considera el conjunto de escenarios. Analizando los resultados, el desempeño de la estrategia por índice de recurrencia en comparación a la tradicional es más bajo, presentando una diferencia del 1.83 % para la dirección Norte-Este y del 1.48 % para la dirección Sur-Oeste. Con respecto al agendamiento por VAN-VaR, este tiene un rendimiento del 0.74 % superior al agendamiento tradicional en dirección NE, y del 0.06 % superior con respecto al método tradicional en dirección SW, al final de la vida de la mina. Dada a la poca disparidad presentada en las estrategias analizadas y en ambas direcciones, se vislumbra que la relevancia de la incertidumbre geológica mientras ocurre el agendamiento en sí es mínima.

Debido a la existencia de intensas restricciones operacionales, que hacen que exista un rango de toma de decisión muy acotado para el modelo de optimización, por lo tanto, en muchos casos la elección de minado de un bloque se va a repetir en varios escenarios de leyes.

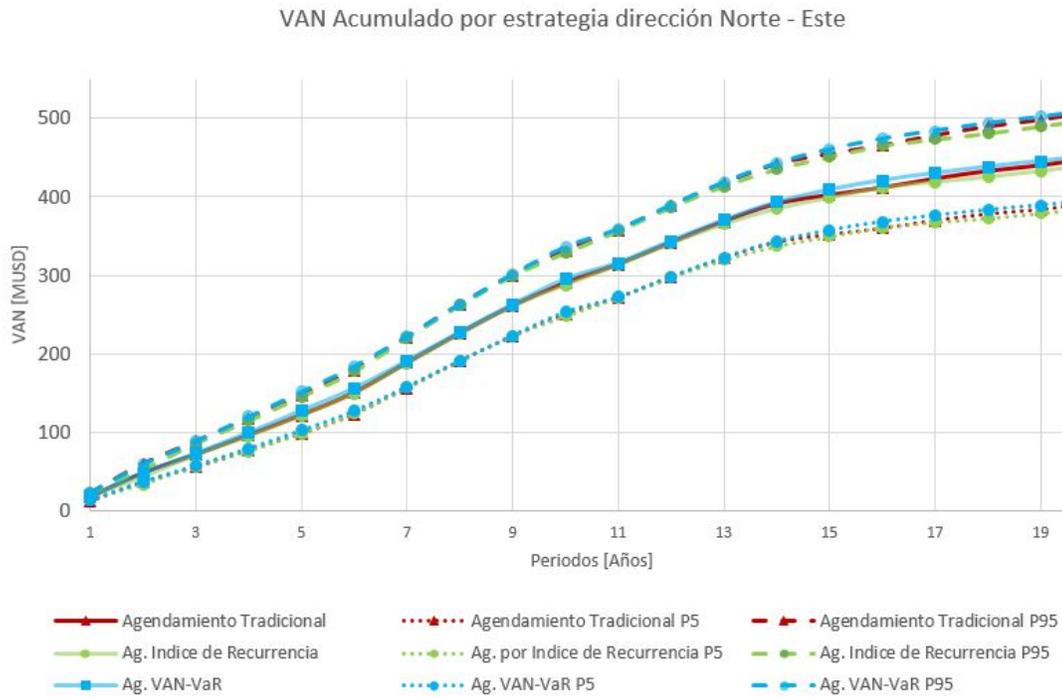


Figura 6.3: Gráfico de VAN Acumulado, por estrategia dirección NE

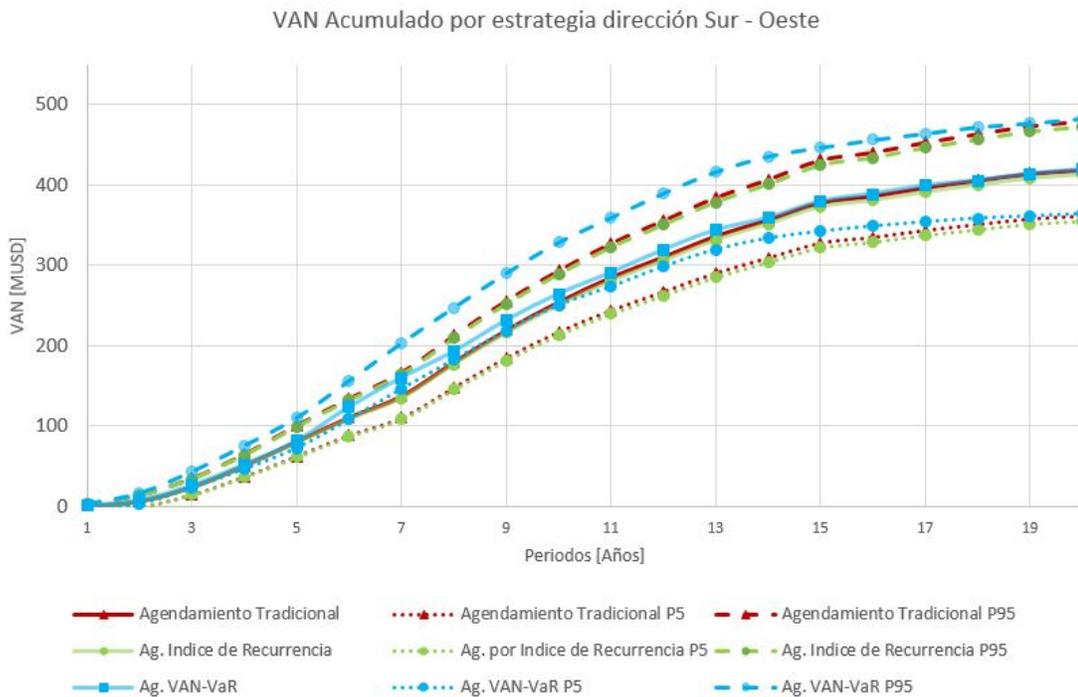


Figura 6.4: Gráfico de VAN Acumulado, por estrategia dirección SW

## 6.5. Análisis de riesgo por secuencia de hundimiento

En la Tabla (6.1) y (6.2) se presenta los resultados finales de este estudio, con el valor económico de cada plan obtenido.

Aquí se puede observar que, en términos de VAN, la variación de cada estrategia tomando como referencia el agendamiento tradicional no es muy significativa (Tabla 6.1 y 6.2), llegando incluso a tener un peor desempeño, como es en el caso de la estrategia de índice de recurrencia.

La explicación de este comportamiento es que esta estrategia no busca maximizar el VAN, sino que asegurar el minado de los bloques que tienen una mayor probabilidad de ser extraído considerando el conjunto de planes simulados, a fin de obtener un plan de producción con una mayor certeza del material que debe ser enviado a planta. A la vez se despliega la información de riesgo asociada a cada estrategia a través del VaR, la cual constituye un escenario pesimista donde se obtienen los valores de la cola inferior de la distribución de VAN dado un 5% de probabilidad.

Estrategia Norte - Este	VAN Kriging MUSD	VAN Promedio Simulaciones MUSD	VAR 5% MUSD
Agendamiento Tradicional	377.45	449.34	420.23
Agendamiento por I. R.	370.41	441.13	417.04
Agendamiento por la peor ganancia	381.21	452.67	423.11

Tabla 6.1: Resultados económicos por estrategia NE

Estrategia Sur - Oeste	VAN Kriging MUSD	VAN Promedio Simulaciones MUSD	VAR 5% MUSD
Agendamiento Tradicional	378.52	418.69	400.07
Agendamiento por I. R.	372.93	412.5	394.23
Agendamiento por la peor ganancia	386.14	418.96	400.92

Tabla 6.2: Resultados económicos por estrategia SW

Si se realiza, el ejercicio de buscar la dirección que entrega un mejor desempeño económico, considerando como fuente de información solo la valorización obtenida por la estimación por kriging, entonces se tiende a optar por la dirección Sur - Oeste, donde para todas sus estrategias de agendamiento tiene un mayor VAN que la Norte - Este.

Aunque existe un mejor desempeño económico, la variación entre ambas direcciones no llega a superar el 2% lo que se ve reflejada en la Tabla (6.3), la diferencia es entre ambas es mínima, llegando ser del orden de un 0.28[%] para el método tradicional, hasta de un 1.29 [%] en la estrategia de maximización del agendamiento por la peor ganancia.

Valorización por Kriging	
Estrategias	Var. [%] de VAN
Agendamiento Tradicional	-0.28 %
Agendamiento por I. R.	-0.68 %
Agendamiento por la peor ganancia	-1.29 %

Tabla 6.3: Diferencia porcentual dirección NE vs SW, según estimación por Kriging

Sin embargo, cuando se considera la información del conjunto de realizaciones en la toma de decisión de cada agendamiento, la diferencia entre ambas direcciones cambia a favor del minado Norte - Este incrementando la diferencia entre ambas en entorno a un 7[%]. Tabla 6.4.

Valorización según Simulaciones	
Estrategias	Var. [%] de VAN
Agendamiento Tradicional	6.82 %
Agendamiento por I. R.	6.49 %
Agendamiento por la peor ganancia	7.45 %

Tabla 6.4: Diferencia porcentual dirección NE vs SW, según simulaciones

Esta diferencia queda manifestada en la Figura (6.5), donde se presenta la distribución de la población valorizada en función del conjunto de escenarios incorporadas en el modelo de bloques.

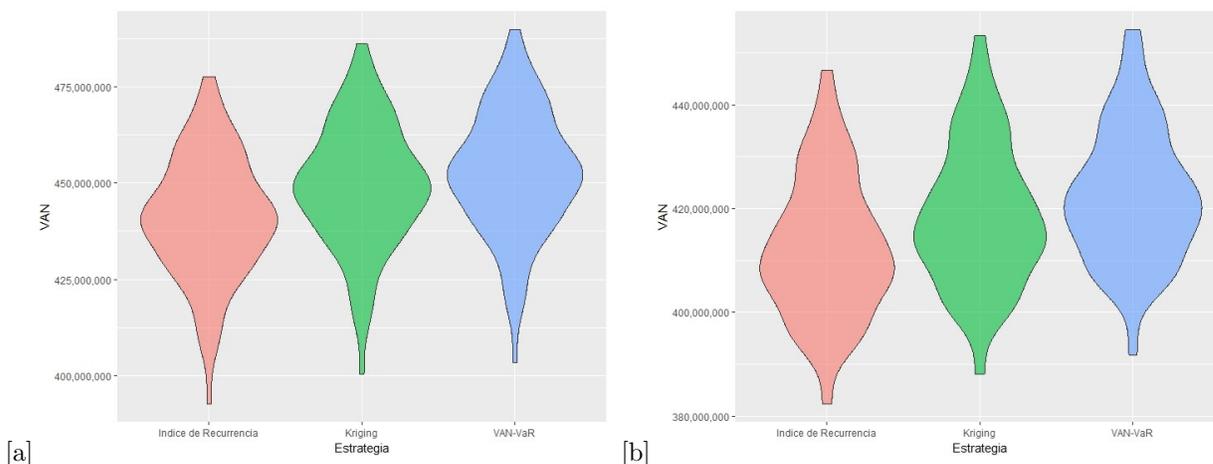


Figura 6.5: Gráfico de violín, para cada estrategia de agendamiento. (a) Dirección NE. (b) Dirección SW

Evaluando cada estrategia para ambas direcciones, la utilización del índice de recurrencia en términos económicos fue menor que al método tradicional e incluso menor que la estrategia de optimización en función de la peor ganancia, ya que el modelo de optimización no presenta en su construcción una función de maximizar el VAN, lo que realmente hace el modelo de optimización es encontrar la mejor solución pero considerando todo el rango de planes individuales que se agendaron por cada simulación condicional, es por ello, que utilizar esta estrategia no garantiza que se genere un plan de producción que presente un mejor desempeño en el valor esperado, cuando se lo compara por el plan de producción generado por el escenario promedio.

A la vez utilizar como información en la optimización, los peores valores de cada bloque a fin de maximizar el VAN-VaR, aumentó marginalmente la esperanza de VAN de los planes de producción para ambas direcciones.

Esto implica dos cosas, primero que la utilización del índice de recurrencia, es útil para cuando se desea elaborar un plan de producción que contenga una mejor certeza del material que debe ser enviado a planta, por lo cual es beneficioso cuando se busca disminuir la fluctuación en la producción y obtener un VAN más realista. Y segundo utilizar el agendamiento por la peor ganancia, mejoró el rendimiento de los casos más pesimistas pasando de 420.23 [MUSD] en el agendamiento tradicional a 423.11 [MUSD] bajo la dirección norte-este.

Sin embargo, la importancia de incorporar la fuente de incertidumbre geológica se amplifica en gran medida a la hora de tomar la decisión de escoger la dirección de minado, por ejemplo, cuando solo se considera la información de la valorización por kriging se tiende a optar por la dirección SW dado que presenta valores entre 0.28 [%] - 1.29 [%] superiores que la dirección NE para las tres estrategias de agendamientos estudiadas. Ahora, sí a ésta toma de decisión, se incorporan las distintas realizaciones de leyes que se presentan dentro del modelo de recursos, la situación cambia, esto es porque la esperanza de valores que presenta el conjunto de valorizaciones de escenario de leyes es mayor en la dirección NE que en la SW. Lo mismo sucede con el rango de valores del 5% de los casos más pesimistas, el desempeño de la secuencia de minado NE es mayor que la dirección SW, lo que se traduce en una disminución de obtener valores extremos en los casos más desfavorables.

Por ejemplo, a partir de las Tablas 6.1 y 6.2 observando la estrategia de agendamiento tradicional, el valor del agendamiento para los peores casos en la dirección SW es de 400.07 [MUSD] en comparación a los 420.23 [MUSD] de la dirección NE para los casos más pesimistas, lo que significa un monto de 20 [MUSD] de posibles pérdidas que se pueden ahorrar si se agenda por dirección Norte-Este.

Además, si solo se considera la información obtenida por kriging, se entraría por optar la dirección SW en donde se obtiene un valor de 378.52 [MUSD] versus la dirección NE que presenta un VAN de 377.45 [MUSD], pero si se considera el valor esperado del conjunto de simulaciones, la decisión es otra, donde la dirección NE presenta mayor VAN (449.34 [MUSD]) que la dirección contraria (418.49 [MUSD]).

Por lo tanto, si se toma en cuenta la información de los escenarios de leyes y el riesgo asociado, es posible desarrollar una toma de decisión más precisa que solo considerando la información obtenida por kriging. El caso de estudio integrado en este trabajo de investigación, hace vislumbrar la envergadura que tiene el incorporar la incertidumbre geológica en el plan de producción, tanto a nivel de secuenciamiento por periodo, como a la hora de tomar la decisión de dirección hundimiento, donde este último permite realmente capturar todo el potencial que tiene el utilizar la incertidumbre geológica en la estimación del valor del proyecto.

# Capítulo 7

## Conclusiones y trabajos futuros

En esta sección se presentan las principales conclusiones obtenidas en este trabajo para cada una de sus secciones, y las posibles extensiones que se pueden desarrollar a partir de los resultados aquí obtenidos.

### 7.1. Conclusiones

#### 7.1.1. Planificación minera en Panel Caving

En la búsqueda de la revisión bibliográfica, ha conducido a delimitar los conocimientos relacionados a la planificación minera en Panel Caving, donde se ha descrito que, en su gran mayoría, intentan solucionar el problema de agendamiento a través de distintas implementaciones de modelos matemáticos, a fin de replicar procesos que ocurren en este tipo de explotación. Los últimos trabajos han tratado de incorporar diversas fuentes de incertidumbres a los modelos de optimización, como interferencias operacionales y sísmicas, con el objetivo de evaluar el impacto que se obtiene en los planes de producción o de constructibilidad en una mina de Block/Panel Caving. Bajo el mismo foco de investigación distintos autores han evaluado la influencia de la incertidumbre geológica en la estimación de recursos para este tipo de minas, concluyendo que sí existe una influencia en la determinación de la envolvente económica, cuando se incorpora la información de distintos escenarios de leyes. Sin embargo, las investigaciones relacionadas al agendamiento de una mina panel caving bajo incertidumbre geológica son escasas, y no se constata el impacto que tiene utilizar esta información, en la generación de un plan de producción.

#### 7.1.2. Métodos para incorporar la información de incertidumbre en la planificación

En esta investigación se evalúa dos distintas metodologías de incorporar la información de la incertidumbre geológica ya sea a través de un índice de confiabilidad de extracción en función de un conjunto de planes de agendamiento, o como la valorización obtenida por bloque considerando el rango las peores ganancias de acuerdo al conjunto de simulaciones.

Para ambos enfoques la función es la misma que es “introducir la variabilidad” de acuerdo distintos escenarios de leyes. Sin embargo, a pesar de que ambos enfoques tienen el mismo objetivo, su función en el modelo de optimización para agendar los bloques son totalmente distintas, por ejemplo, la estrategia de índice de recurrencia, genera un plan de producción en donde selecciona aquellos bloques que tienen una mayor confiabilidad de ser extraído en un determinado periodo, de acuerdo a los planes generados de forma individual, esto bajo el punto de vista minero, significa asignar aquellos bloques en donde se tiene una mayor certeza de cumplir la capacidad tonelaje que debe ser enviado a proceso sobre todo para los primeros periodos, aquellos bloques que tienen un bajo índice de ser minados en un periodo  $t$ , son desechados para periodos futuros, por lo cual el modelo de optimización implícitamente está optimizando los 100 planes (los 100 escenarios de leyes). La estrategia por índice de recurrencia en una primera etapa, maximiza el VAN de cada uno de los planes individuales, posteriormente cuando se realiza el último plan la función objetivo del modelo de optimización cambia a minimizar el riesgo, por lo cual es una buena estrategia para cuando se desea generar un plan que requiera maximizar el VAN, pero minimizando el riesgo.

En cambio, el uso de la estrategia de agendar en función de las peores ganancias a escala de bloques, tiene como objetivo de encontrar la mejor solución de agendamiento para el peor caso posible que se le puede atribuir al yacimiento, es decir, cuando se selecciona las peores valorizaciones de acuerdo al conjunto de escenarios, se está atribuyendo implícitamente la variabilidad de los datos menos condicionantes, dado que ellos son los que presentan una mayor varianza en los resultados de la valorización de acuerdo al conjunto de escenarios. Como la función objetivo del agendamiento es maximizar el VAN, se seleccionarán aquellos bloques en la asignación de agendamiento los que presentan el mejor beneficio, lo que a su vez significa son los que presentan una menor variabilidad.

### 7.1.3. Caso de Estudio

- La asignación de bloques para las tres estrategias, mantienen un patrón en común, dado que en los primeros niveles son muy similares por la alta restricción de precedencias incorporadas en los modelos de optimización, como los son las aperturas de áreas y control del caveback, es por ello que las asignaciones a nivel de piso son similares, en donde la variabilidad de asignación va aumentando a medida que se llega a los contornos de la envolvente.
- El tonelaje obtenido por el plan de producción de las distintas estrategias de agendamiento, el que presenta la menor fluctuación para ambas direcciones, es la estrategia por índice de recurrencia, donde existe una producción continua en todo su periodo de régimen. Cabe destacar, que a todos los modelos de agendamientos se le atribuyó una holgura entre sus límites de capacidad de producción mínima y máxima de aproximadamente un 10 %, la razón es que dada a la no presencia de una variable continua, el modelo de optimización es poco flexible en encontrar una solución factible cuando se le aplica una menor holgura.
- Los modelos de optimización que son aplicados en esta investigación, no disminuyen el rango de

variabilidad de finos contenidos enviados a proceso, en ninguna de las tres estrategias. El motivo es por el no uso de un costo por desviación de producción aplicado en la función objetivo en el modelo, por lo cual no existe una prioridad en la asignación de los bloques a fin de disminuir la variabilidad de la producción de fino.

- Analizando las dos estrategias (Índice de recurrencia y por la peor ganancia) y contrarrestando con el caso base (Kriging), la diferencia obtenida en el valor esperado es marginal llegando incluso a ser negativa. Esto es por la poca libertad de elección que tienen los modelos de optimización a consecuencia de las restricciones de precedencias que presenta este tipo explotación.
- Siguiendo con el punto anterior, la estrategia por índice de recurrencia es el que tiene el peor desempeño en términos del valor esperado, para ambas direcciones en comparación con el caso base. La razón de este comportamiento es que el modelo de optimización busca encontrar la mejor solución considerando todos los escenarios (pesimistas y optimistas) que han sido incorporadas a través de la asignación de distintos planes y representadas por el índice de recurrencia por periodo, por lo tanto, el modelo de optimización genera un plan de producción que se comporta de manera eficiente para todos los escenarios de leyes. Este tipo de estrategia agendamiento, sería útil a la hora de evaluar un proyecto minero, a fin obtener un indicador económico más confiable y que personifique la incertidumbre de leyes contenida en el yacimiento.
- Otro punto relevante es el uso del parámetro VAN-VaR por bloque, donde se obtuvo un mejor desempeño comparando con el caso base para ambas direcciones. Se constató una leve mejora en el valor esperado y redujo en torno a los 3 [MUSD] el VAN del peor escenario posible, por lo cual este tipo de agendamiento disminuye el riesgo.
- El impacto de la incertidumbre de las leyes en el agendamiento en sí, no presenta grandes repercusiones en el valor esperado, ni tampoco en las asignaciones de los bloques, independiente de la estrategia de agendamiento utilizada. Sin embargo, la situación cambia radicalmente, cuando se debe evaluar la dirección de minado para este tipo de yacimientos, donde la importancia de incorporar la fuente de incertidumbre geológica en esta decisión se hace relevante.
- La poca diferencia del VAN resultante entre las distintas estrategias de agendamiento cuando se considera una misma dirección de minado, se debe principalmente al tipo de yacimiento que fue considerado en la investigación (un deposito masivo de baja ley con poca variabilidad local), sin embargo, la situación puede cambiar en el momento que se integre más restricciones en el plan, como variables geometalúrgicas para generar mezclas en el procesamiento de mineral.

## 7.2. Trabajo Futuro

A partir de este trabajo, se podrían realizar las siguientes extensiones:

### **Incorporación de dilución lateral al proyecto de evaluación:**

- Los casos de estudios y el enfoque que ha tenido este trabajo, es considerando un modelo de agendamiento estático, es decir, que no existe interacción de mezcla en la extracción de los bloques con el entorno. Durante este trabajo se verificó el impacto que tiene la incertidumbre geológica en la toma de decisión de la dirección de minado, sin embargo, otro factor que influye en esta toma de decisión es la evaluación de la incorporación de dilución lateral. Hoy en día existen modelos estocásticos que permiten definir qué sectores tienen una mayor probabilidad de generar caving que otros, dados a las características propias del macizo rocoso. Incorporar este modelo en un agendamiento de largo plazo, obtendría una mejor apreciación del comportamiento de la mina ya que define de una mejor manera aquellos sectores que pueden presentar un mayor riesgo en el proyecto al incorporar elementos diluyentes o sectores que presenten altos datos no condicionantes.

### **Incorporación de un modelo geológico-geomecánico:**

- El modelo geomecánico en la mina subterránea permitiría establecer distintas tasas de extracción, y, por lo tanto, establecer sectores que dividan la mina en diferentes áreas productivas. Así se podrían incluir problemas operacionales que puedan limitar la producción, como son las colgaduras en los puntos de extracción.

### **Extender los modelos de agendamientos:**

- Una posibilidad es entender el modelo agregando restricciones de mezclas y sectores productivos. Para ellos, se establecería para cada sector capacidades de producción distintas, con flujos de material que pueden ser castigados dependiendo de la cantidad de impurezas que tenga.

### **Incorporar flujo gravitacional al agendamiento de producción.**

- En la actualidad existen modelos de flujo gravitacionales estocásticos, que a través de distintas simulaciones se generan distintos escenarios de los posibles comportamientos que tendrá el flujo gravitacional. Esta información puede ser utilizada a beneficio de obtener un plan de producción más robusto la cual conlleve incorporar la mezcla que ocurre en el proceso en sí.

### **Analizar la influencia de distintos tamaños de bloques en el agendamiento.**

- Una de las limitaciones de este modelo es que, por la gran cantidad de variables involucradas en la optimización además de la extensión se utiliza en este caso de estudio un tamaño de 30 x 30 x 30 [m]. Para este caso un menor tamaño haría una extracción más suave y menos restrictiva, ya que daría la

posibilidad de ser más selectivo por columna mineralizada al tener una mayor cantidad de columnas, además de tener un frente de avance más regular. Esto podría causar variaciones en el periodo de régimen y por lo tanto en el VAN. Sin embargo, se debe tener en cuenta que el tamaño de los bloques no puede ser demasiado pequeño, pues no se puede ser selectivo en los puntos de extracción.

# Capítulo 8

## Bibliografía

Alarcón, M. (2014). *Valorización del aumento de confiabilidad en planes de producción de sistemas mineros subterráneos. Memoria de Título*. Santiago: Universidad de Chile.

Ayuso A. et al. (2014). *Medium range optimization of copper extraction planning under uncertainty in future copper prices*. *European Journal of Operational Research*, 233 (3), 711-726..

Brown, E. (2002). *Block Caving Geomechanics*. Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, The University of Queensland.

Chanda, E. (1990). *An application of integer programming and simulation to production planning for a stratiform ore body*. *Mining Science and Technology*, 11 (2), 165-172.

Cullenbine, C., Wood, R., y Newman, A. (2011). *A sliding time window heuristic for open pit mine block sequencing*. *Optimization Letters*, 5 (3), 365- 377.

Diering, T. (2004). *Computational considerations for production scheduling of block cave mines in Proceedings of MassMin 2004, Santiago, Chile, pp. 135- 140*.

Diering, T. (2012). *Quadratic Programming applications to block cave scheduling and cave management. in Massmin 2012. Sudbury*.

Dimitrakopoulos, R. (1998). *Conditional simulation algorithms for modelling orebody uncertainty in open pit optimisation*. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 12 (4), 173-179.

Dimitrakopoulos, R. y Ramazan, S. (2008). *Stochastic integer programming for optimising long term production schedules of open pit mines: methods, application and value of stochastic solutions*. *Mining Technology*, 117 (4), 155- 160.

Dirkx R. (2016). *The optimization of mine planning aspects under uncertainty: a study on infill drilling and*

- block cave scheduling. Thesis M.Sc. Mining and Materials Engineering. McGill University.
- Dirkx R. (2016). *The optimization of mine planning aspects under uncertainty: a study on infill drilling and block cave scheduling. Thesis M.Sc. Mining and Materials Engineering. McGill University.*
- Dowd, P. A. (1994). *Risk assessment in reserve estimation and open-pit planning. Trans. Instn. Min. Metall., 103 A148 - A154.*
- Duplancic, P y Brady, BH (1999). *Characterisation of caving mechanisms by analysis of seismicity and rock stress. in G Vouille P Berest (eds), International Congress on Rock Mechanics Proceedings.*
- Flores, G. y Manca, L. (2013) *Modern Planning Practices for Cave Mining. Mine Planning.*
- Grieco, N. y Dimitrakopoulos, R. (2007). *Managing grade risk stope design optimisation: Probabilistic mathematical programming model and application in sublevel stoping. IMM Transactions Mining Technology. pp 49-57.*
- Guest, A. R., Van Hout, G. J., y Von Johannides, A. (2000). *An Application of Linear Programming for Block Cave Draw Control. in Proceedings of MassMin, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Brisbane, Australia, pp. 461-468.*
- Hamrin, H., (1982). *Choosing an Underground Mining Method, Underground Mining Methods Handbook. ed. By W. A. Hustrulid. New York: SME- AIME, Section 1.6, pp: 88-112.*
- Jélvez, E., (2017). *Metodología Multietapa para la Planificación de la Producción de Largo-Plazo en Minas a Rajo Abierto bajo Incertidumbre Geológica. Tesis Doctoral. Santiago: Universidad de Chile.*
- Laubscher, D. A. (1994). *Cave mining - the state of the art, The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, vol 94 no 10, pp 279-293.*
- Laubscher, D. A. (2003). *Cave Mining Handbook. De Beers, Johannesburg. pp. 138.*
- Leite, A. y Dimitrakopoulos, R. (2007). *Stochastic optimization model for open-pit mine planning: application and risk analysis at a copper deposit. IMM Transactions Mining Technology. pp 109-118.*
- Lerchs, H. y Grossmann, I. (1965). "Optimum design of open-pit mines," *Trans. Canadian Institute of Mining and Metallurgy, Vol. LXVIII p. 17-24.*
- Linsmeier, T. y Pearson, N. (1996). *Risk Measurement: An Introduction to Value at Risk ). Working Paper 96-04.*
- Lobiano, C. (2016) *Inclusión de interferencias operacionales de origen geotécnico en planificación minera de panel caving. Tesis de Magister. Santiago: Universidad de Chile.*

- Malaki S, (2016). *Block Cave Extraction level and Production Scheduling optimization under grade uncertainty. Thesis Master of Science in Mining Engineering. University Alberta.*
- Montiel, L., Dimitrakopoulos, R., y Kawahata, K. (2015). *Globally optimising open-pit and underground mining operations under geological uncertainty. Mining Technology.*
- Parkinson, A. (2012). *Essays on Sequence Optimization in Block Cave Mining and Inventory Policies with Two Delivery Sizes. Thesis, The University Of British Columbia, The University Of British Columbia, pp 199.*
- Pourrahimian, Y. (2013). *Mathematical programming for sequence optimization in block cave mining. Ph.D. Thesis, University of Alberta (Canada), Ann Arbor, pp 259.*
- Rahal, D., Smith, M., Van Hout, G., y Von Johannides, A. (2003). *The use of mixed integer linear programming for long-term scheduling in block caving mines. Application of Computers and Operations Research ill the Minerals Industries, South African Institute of Mining and Metallurgy, 123-132.*
- Rahal, D., Dudley, J. y Hout, G.v. (2008). *'Developing an optimised production forecast at Northparkes E48 mine using MILP', Paper presented at 5th International Conference and Exhibition on Mass Mining, Lulea, Sweden, pp.227-236.*
- Rahal, D. (2008). *Draw Control in Block Caving Using Mixed Integer Linear Programming, PhD thesis, The University of Queensland, Australia.*
- Rodríguez, M. (2018). *Optimización del plan de producción conjunto cielo abierto subterránea. Tesis de Magíster. Santiago: Universidad de Chile.*
- Rubio, E. (2002). *Long term planning of block caving operations using mathematical programming tools. Thesis, The University of British Columbia, pp 126.*
- Rudloff, B. (2013). *Metodología de valorización con opciones reales de secuenciamiento minero bajo incertidumbre. Tesis Magíster. Santiago: Universidad de Chile.*
- Salgado, J. (2009). *Secuenciamiento genérico de obras para la planificación de preparación minera mina El Teniente. Memoria de Título. Santiago: Universidad de Santiago de Chile.*
- Smoljanovic, M., Rubio, E., y Morales, N. (2011). *Panel Caving Scheduling Under Precedence Constraints Considering Mining System. in Proceedings of 35th APCOM Symposium, Wollongong, NSW, Australia, pp. 407-417.*
- Tobie, R. L. y Julin, D. E. (1998). *Block Caving: General Description. in Techniques in Underground Mining - Selections from Underground Mining Methods Handbook, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME).*

Troncoso S. (2006). *Simulación del Impacto de Interferencias Operacionales para la Planificación de Producción*. Santiago: Universidad de Chile.

Vargas, E. (2014). *Cálculo de envolvente económica para minas de caving bajo incertidumbre geológica*. Tesis de Magíster. Santiago: Universidad de Chile, 2014.

Villa D. (2014). *Mine Sequence OPTimization for Block Caving using concept of Best and Worst Case*. White Paper. Dassault Systemes Geovia. .

# Capítulo 9

## Anexo

### 9.1. Histogramas de asignación de minado por bloques, de los 100 planes individuales.

Con el objetivo de comparar la tasa de recurrencia por periodo, se seleccionó un conjunto de bloques de distintos niveles en el modelo.

A esto se le hizo el cálculo de frecuencia de pertenecer a ese periodo, en función de los 100 planes generados, para cada uno de los escenarios de leyes.

Se seleccionaron distintos puntos fijos de evaluación, por cada nivel que pertenezca dentro de la envolvente.

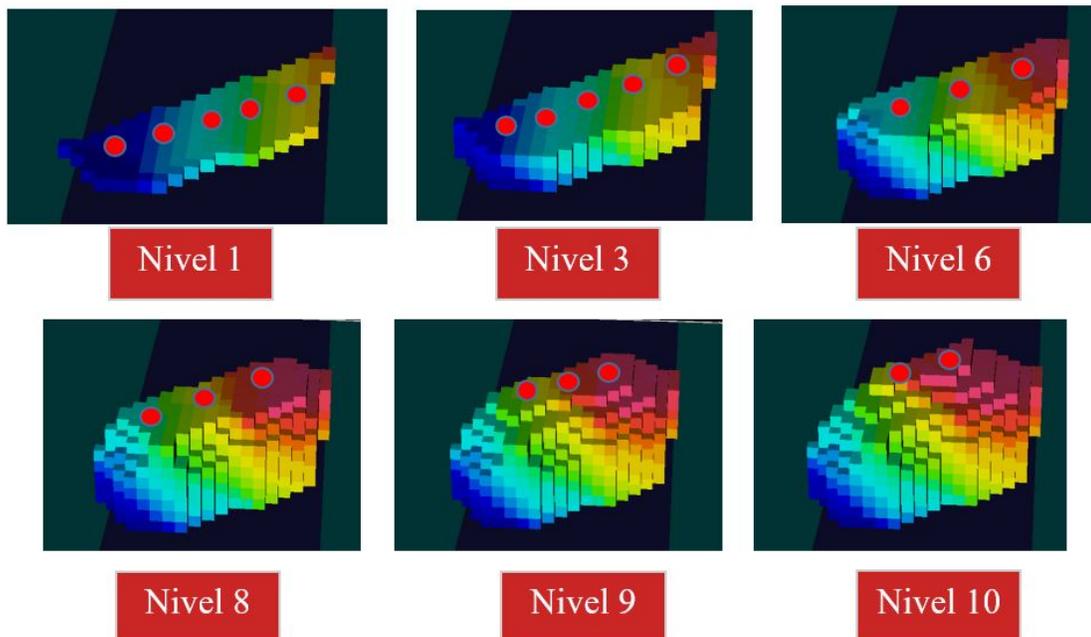


Figura 9.1: Bloques evaluados por nivel.

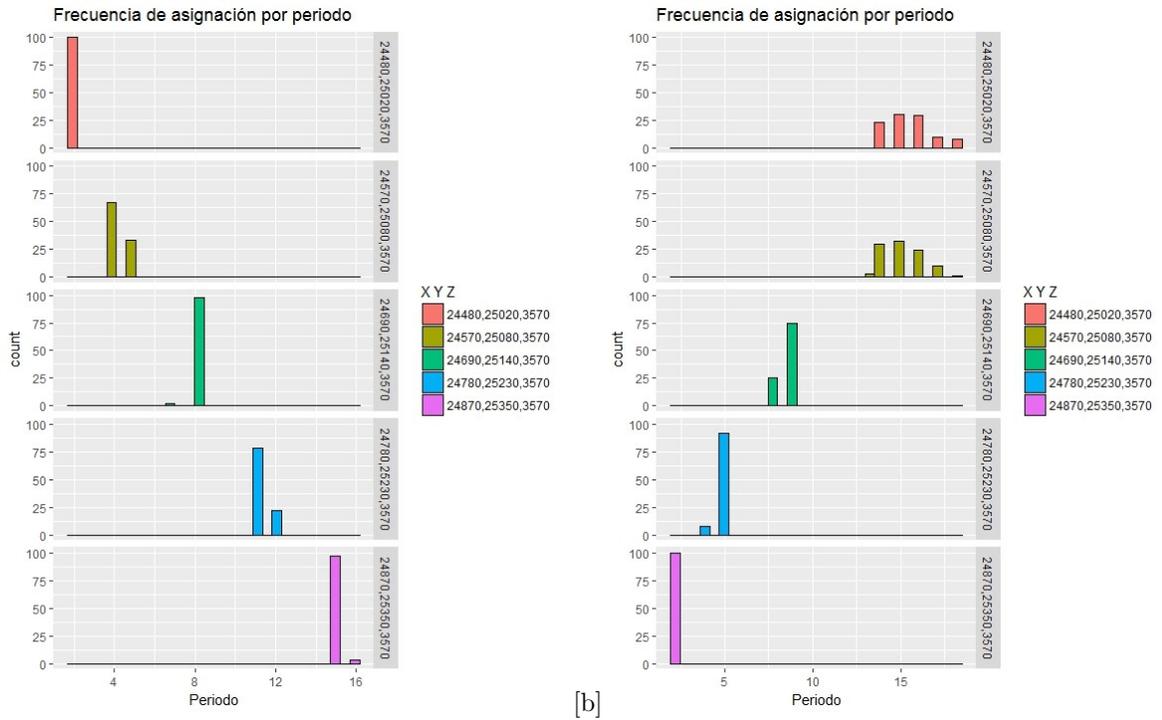


Figura 9.2: Histogramas de frecuencias de asignación, para distintos bloques, cota 3,570 [m]. (a) Dirección NE. (b) Dirección SW

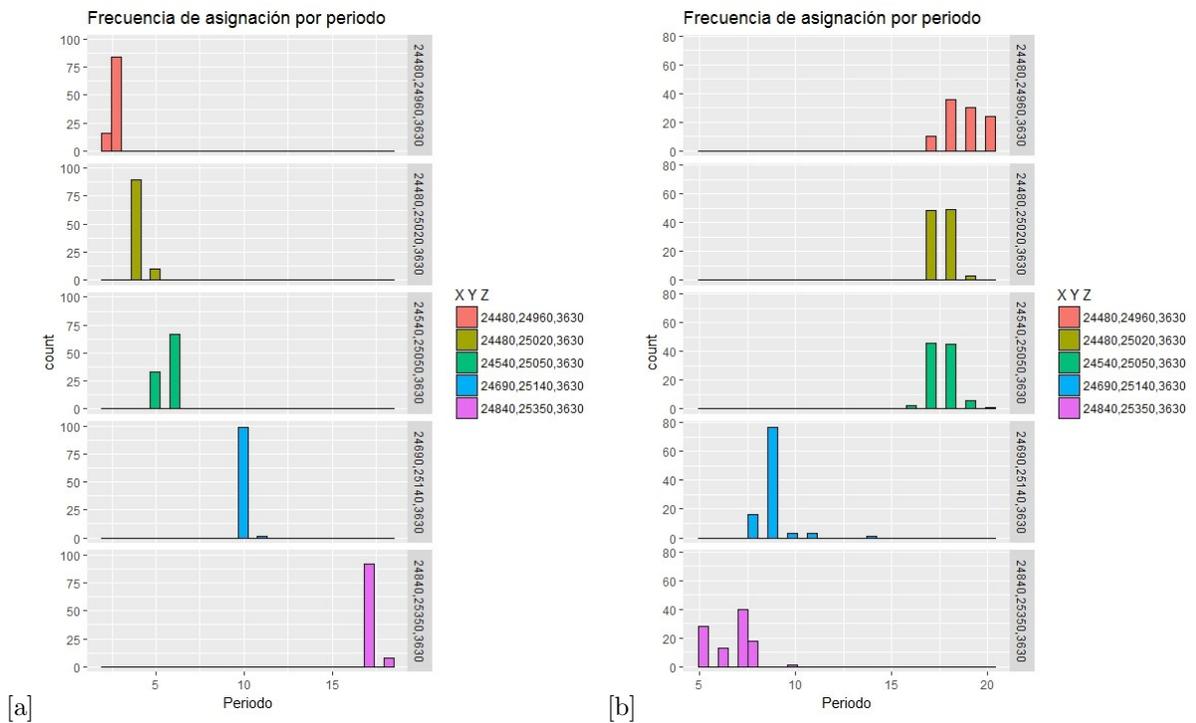


Figura 9.3: Histogramas de frecuencias de asignación, para distintos bloques, cota 3,630 [m]. (a) Dirección NE. (b) Dirección SW

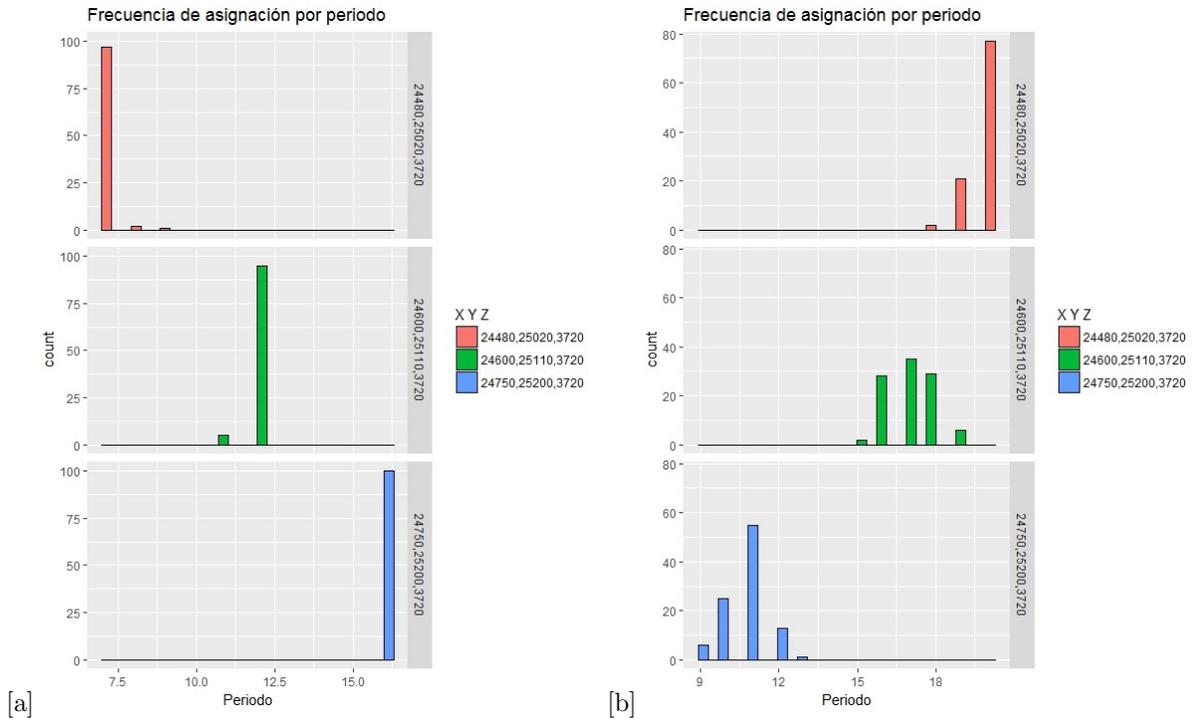


Figura 9.4: Histogramas de frecuencias de asignación, para distintos bloques, cota 3,720 [m]. (a) Dirección NE. (b) Dirección SW

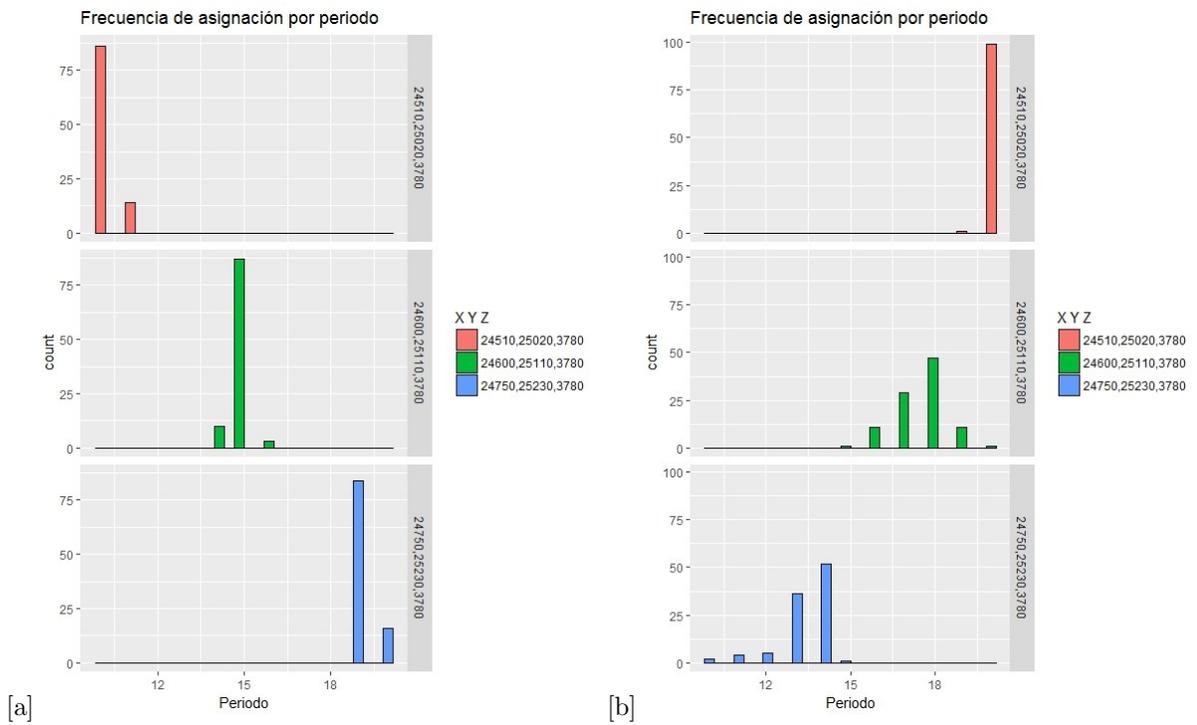


Figura 9.5: Histogramas de frecuencias de asignación, para distintos bloques, cota 3,780 [m]. (a) Dirección NE. (b) Dirección SW

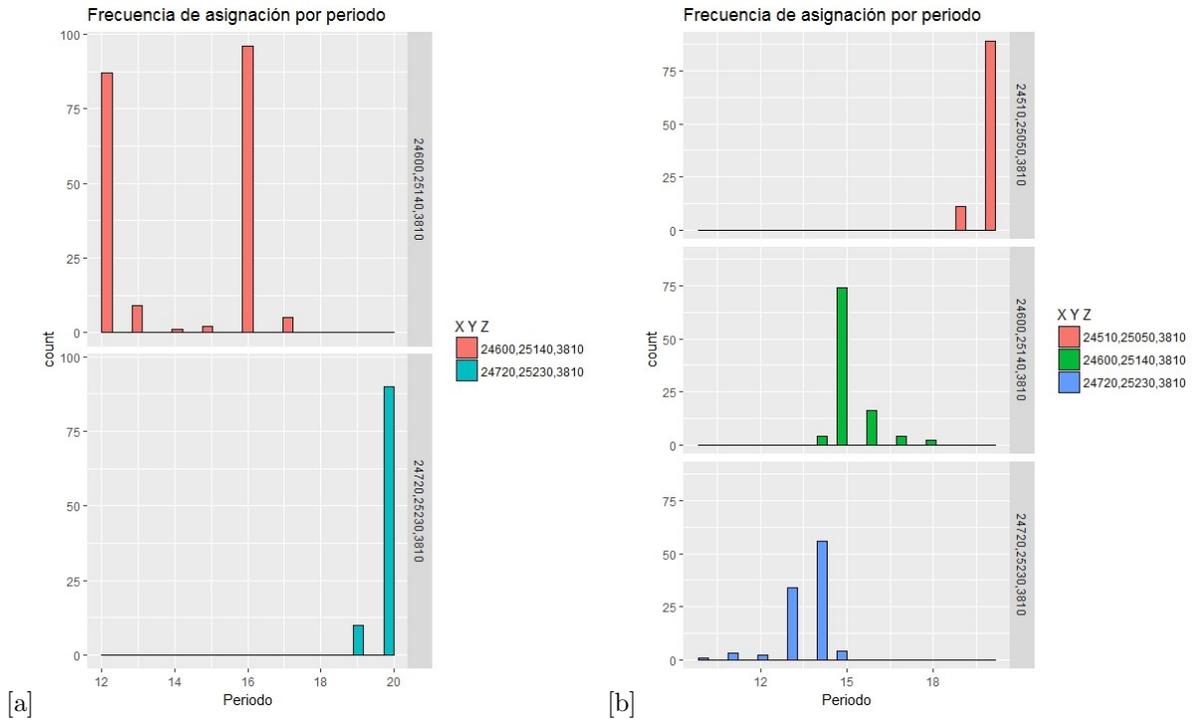


Figura 9.6: Histogramas de frecuencias de asignación, para distintos bloques, cota 3,810 [m]. (a) Dirección NE. (b) Dirección SW

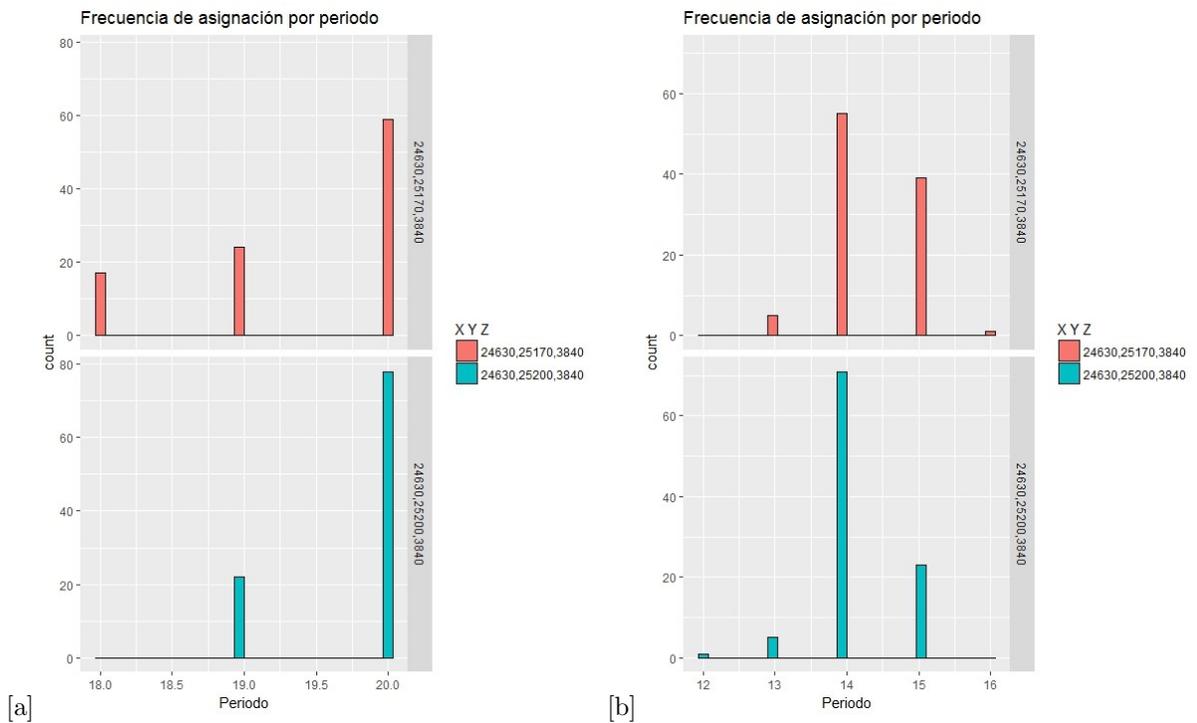


Figura 9.7: Histogramas de frecuencias de asignación, para distintos bloques, cota 3,840 [m]. (a) Dirección NE. (b) Dirección SW

## 9.2. Asignación de bloques para distintas estrategias y dirección.

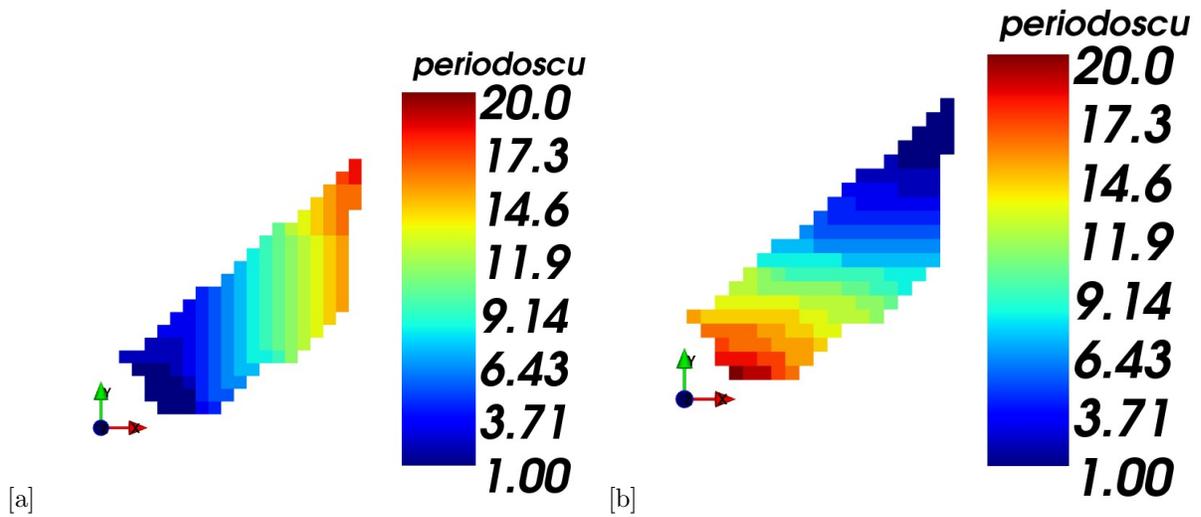


Figura 9.8: Asignación de bloques por periodos, por agendamiento tradicional, sección piso. (a) Dirección NE. (b) Dirección SW

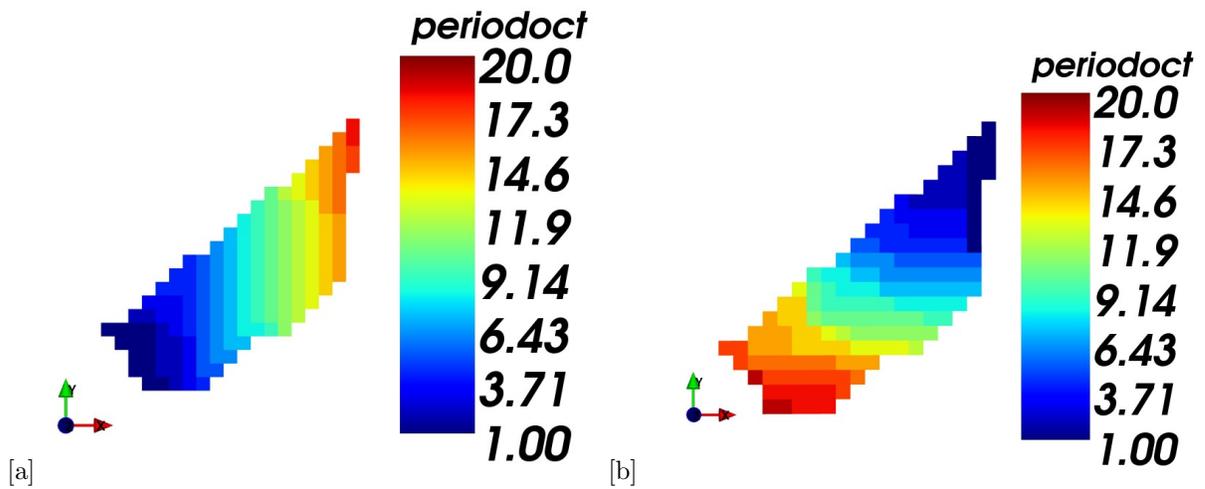


Figura 9.9: Asignación de bloques por periodos, por agendamiento por índice de recurrencia, sección piso. (a) Dirección NE. (b) Dirección SW

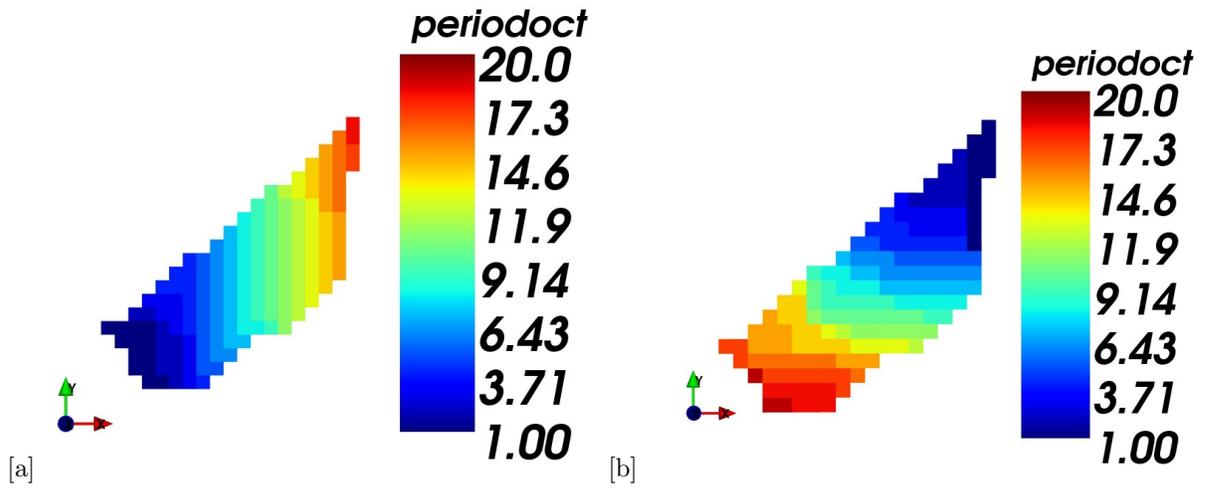


Figura 9.10: Asignación de bloques por periodos, por agendamiento por índice de recurrencia, sección piso. (a) Dirección NE. (b) Dirección SW

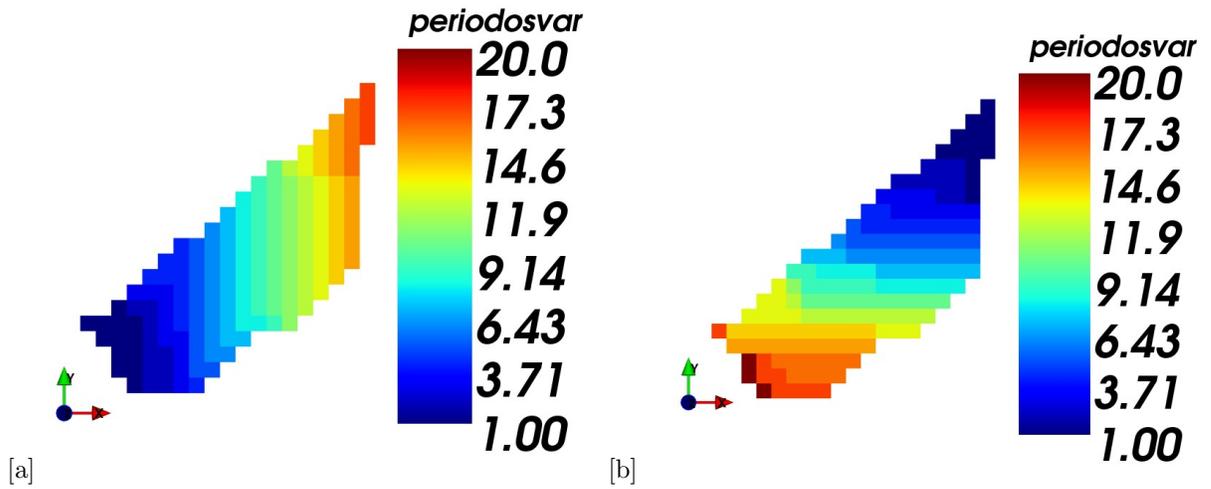


Figura 9.11: Asignación de bloques por periodos, por agendamiento por VAN-VaR, sección piso. (a) Dirección NE. (b) Dirección SW

### 9.3. Planes de producción

Periodos	Kton	Ley Kriging CuT [%]	Simulaciones				
			Ley Min. CuT [%]	Ley Máx. CuT [%]	Valor Promedio [MUSD]	Valor Min. [MUSD]	Valor Max. [MUSD]
1	912.6	0.79	0.78	1.2	11.06	10.81	25.94
2	1,755.00	0.78	0.79	1.14	18.54	19.04	40.74
3	2,316.60	0.7	0.71	0.9	16.08	16.6	30.81
4	2,737.80	0.7	0.71	0.89	16.9	17.69	31.58
5	3,369.60	0.72	0.71	0.85	20.25	19.77	31.39
6	4,001.40	0.77	0.71	0.86	25.8	20.27	34.28
7	5,194.80	0.78	0.78	0.9	30.6	30.72	43.7
8	5,194.80	0.81	0.83	0.95	30.07	32.13	43.5
9	5,194.80	0.87	0.86	0.96	32.04	31.05	39.29
10	5,265.00	0.84	0.81	0.91	27.12	25	32.38
11	5,194.80	0.84	0.79	0.89	23.55	20.53	26.66
12	5,405.40	0.92	0.89	1.02	26.67	25.16	32.9
13	5,686.20	0.92	0.88	1.01	25.45	22.72	30.31
14	5,756.40	0.87	0.86	0.97	20.36	19.6	25.58
15	5,405.40	0.7	0.68	0.79	9.47	8.62	13.41
16	5,756.40	0.69	0.66	0.77	8.6	7.59	11.95
17	5,686.20	0.78	0.73	0.87	11	9.23	14.39
18	5,686.20	0.8	0.72	0.85	10.34	7.91	11.89
19	5,194.80	0.68	0.67	0.85	5.3	5.07	9.91
20	5,265.00	0.82	0.79	0.98	8.28	7.44	12.01

Tabla 9.1: Plan de producción, agendamiento tradicional dirección NE

Periodos	Kton	Ley Kriging CuT [%]	Simulaciones				
			Ley Min. CuT [%]	Ley Máx. CuT [%]	Valor Promedio [MUSD]	Valor Min. [MUSD]	Valor Max. [MUSD]
1	912.6	0.79	0.78	1.2	-1.05	-3.68	4.25
2	1,755.00	0.78	0.79	1.14	6.49	-0.29	18.81
3	2,527.20	0.7	0.71	0.9	17.77	13.09	23.27
4	3,369.60	0.7	0.71	0.89	26.58	20.38	33.23
5	4,141.80	0.72	0.71	0.85	30.31	23.61	36.87
6	4,914.00	0.77	0.71	0.86	30.07	23.29	38
7	5,756.40	0.78	0.78	0.9	26.43	19.23	36.84
8	5,756.40	0.81	0.83	0.95	42.44	34.66	48.17
9	5,756.40	0.87	0.86	0.96	39.87	33.9	44.75
10	5,756.40	0.84	0.81	0.91	35.14	29.75	39.66
11	5,756.40	0.84	0.79	0.89	30.69	26.01	36.07
12	5,756.40	0.92	0.89	1.02	25.57	21.25	29.44
13	5,756.40	0.92	0.88	1.01	25.98	22.44	31.19
14	5,756.40	0.87	0.86	0.97	20.35	17.54	23.87
15	4,633.20	0.7	0.68	0.79	21.41	17.27	25.82
16	4,633.20	0.69	0.66	0.77	8.23	6.52	9.83
17	4,633.20	0.78	0.73	0.87	10.6	7.66	12.92
18	4,633.20	0.8	0.72	0.85	8.75	5.72	11.81
19	4,633.20	0.68	0.67	0.85	8.39	5.61	10.69
20	4,633.20	0.82	0.79	0.98	4.66	3.29	6.85

Tabla 9.2: Plan de producción, agendamiento tradicional dirección SW

Periodos	Kton	Ley Kriging	Simulaciones				
			Ley Min.	Ley Máx.	Valor Promedio	Valor Min.	Valor Max.
		CuT [%]	CuT [%]	CuT [%]	[MUSD]	[MUSD]	[MUSD]
1	912.6	0.79	0.78	1.2	18.21	12.16	29.11
2	1,474.20	0.78	0.79	1.14	24.15	15.27	33.12
3	2,386.80	0.7	0.71	0.9	28.04	19.95	36
4	2,737.80	0.7	0.71	0.89	23.89	17.87	31.39
5	3,580.20	0.72	0.71	0.85	26.62	20.01	32.59
6	4,001.40	0.77	0.71	0.86	28.5	20.71	33.73
7	5,194.80	0.78	0.78	0.9	37.87	30.46	43.71
8	5,194.80	0.81	0.83	0.95	37.79	32.38	43.46
9	5,194.80	0.87	0.86	0.96	35.13	31.05	39.29
10	5,265.00	0.84	0.81	0.91	27.39	23.66	30.13
11	5,194.80	0.84	0.79	0.89	25.29	22.08	28.44
12	5,265.00	0.92	0.89	1.02	27.77	25.14	32.79
13	5,194.80	0.92	0.88	1.01	24.48	20.89	27.93
14	5,194.80	0.87	0.86	0.97	19.8	16.98	22.86
15	5,194.80	0.7	0.68	0.79	13.95	11.88	16.57
16	5,194.80	0.69	0.66	0.77	12.95	11.34	15.57
17	5,194.80	0.78	0.73	0.87	7.25	5.67	8.81
18	4,633.20	0.8	0.72	0.85	6.39	4.84	8.04
19	3,580.20	0.68	0.67	0.85	7.58	6.12	9.94
20	3,229.20	0.82	0.79	0.98	8.09	6.19	9.45

Tabla 9.3: Plan de producción, agendamiento por índice de recurrencia, dirección NE.

Periodos	Kton	Ley Kriging	Simulaciones				
			Ley Min.	Ley Máx.	Valor Promedio	Valor Min.	Valor Max.
		CuT [%]	CuT [%]	CuT [%]	[MUSD]	[MUSD]	[MUSD]
1	842.4	0.79	0.78	1.2	-1.03	-3.63	4.19
2	1,474.20	0.78	0.79	1.14	6.4	-0.29	18.53
3	2,106.00	0.7	0.71	0.9	17.51	12.9	22.93
4	2,737.80	0.7	0.71	0.89	26.19	20.08	32.74
5	3,369.60	0.72	0.71	0.85	29.86	23.27	36.33
6	4,001.40	0.77	0.71	0.86	29.63	22.95	37.43
7	5,194.80	0.78	0.78	0.9	26.04	18.94	36.29
8	5,194.80	0.81	0.83	0.95	41.81	34.15	47.46
9	5,194.80	0.87	0.86	0.96	39.28	33.4	44.09
10	5,194.80	0.84	0.81	0.91	34.62	29.31	39.07
11	5,194.80	0.84	0.79	0.89	30.23	25.63	35.54
12	5,194.80	0.92	0.89	1.02	25.2	20.93	29.01
13	5,194.80	0.92	0.88	1.01	25.6	22.11	30.73
14	5,194.80	0.87	0.86	0.97	20.05	17.28	23.52
15	5,194.80	0.7	0.68	0.79	21.1	17.01	25.44
16	5,756.40	0.69	0.66	0.77	8.11	6.43	9.68
17	5,756.40	0.78	0.73	0.87	10.44	7.55	12.73
18	5,756.40	0.8	0.72	0.85	8.62	5.63	11.63
19	5,756.40	0.68	0.67	0.85	8.27	5.53	10.53
20	2,878.20	0.82	0.79	0.98	4.59	3.25	6.74

Tabla 9.4: Plan de producción, agendamiento por índice de recurrencia, dirección SW.

Periodos	Kton	Ley Kriging	Simulaciones				
			Ley Min.	Ley Máx.	Valor Promedio	Valor Min.	Valor Max.
		CuT [%]	CuT [%]	CuT [%]	[MUSD]	[MUSD]	[MUSD]
1	912.6	0.79	0.78	1.2	18.51	10.98	29.59
2	1,755.00	0.78	0.79	1.14	29.06	17.82	39.63
3	2,246.40	0.7	0.71	0.9	24.97	18.93	33.24
4	3,159.00	0.7	0.71	0.89	26.4	20.1	35.16
5	3,650.40	0.72	0.71	0.85	28.11	21.01	34.03
6	4,001.40	0.77	0.71	0.86	28.56	20.22	33.53
7	4,703.40	0.78	0.78	0.9	34.9	29.1	39.4
8	4,843.80	0.81	0.83	0.95	36.8	31.95	41.93
9	5,405.40	0.87	0.86	0.96	35.18	31.14	39
10	5,756.40	0.84	0.81	0.91	32.47	28.91	36.02
11	4,703.40	0.84	0.79	0.89	20.75	17.52	23.72
12	5,405.40	0.92	0.89	1.02	27.87	25.16	32.9
13	5,686.20	0.92	0.88	1.01	26.73	22.72	30.31
14	5,756.40	0.87	0.86	0.97	22.59	19.6	25.58
15	5,756.40	0.7	0.68	0.79	15.86	13.37	18.26
16	5,405.40	0.69	0.66	0.77	12.05	10.14	13.62
17	4,633.20	0.78	0.73	0.87	9.19	7.51	11.82
18	5,616.00	0.8	0.72	0.85	8.3	6.77	9.83
19	4,843.80	0.68	0.67	0.85	7.02	5.59	8.91
20	5,756.40	0.82	0.79	0.98	7.35	4.84	9.68

Tabla 9.5: Plan de producción, agendamiento por VAN-VaR, dirección NE.

Periodos	Kton	Ley Kriging	Simulaciones				
			Ley Min.	Ley Máx.	Valor Promedio	Valor Min.	Valor Max.
		CuT [%]	CuT [%]	CuT [%]	[MUSD]	[MUSD]	[MUSD]
1	1,729.38	0.79	0.78	1.2	-0.16	-2.87	4.36
2	2,490.30	0.78	0.79	1.14	8.75	4.03	18.87
3	3,320.40	0.7	0.71	0.9	22.86	17.87	30.76
4	4,081.33	0.7	0.71	0.89	27.63	22.18	37.77
5	4,842.26	0.72	0.71	0.85	29.99	24.39	35.91
6	5,672.36	0.77	0.71	0.86	40.65	33.46	48.35
7	5,672.36	0.78	0.78	0.9	42.58	35.68	50.32
8	5,672.36	0.81	0.83	0.95	40.05	33.84	46.8
9	5,672.36	0.87	0.86	0.96	39.43	35.17	45
10	5,672.36	0.84	0.81	0.91	34.4	29.76	40.99
11	5,672.36	0.84	0.79	0.89	26.53	20.47	36.63
12	5,672.36	0.92	0.89	1.02	27.22	23.77	31.9
13	4,980.61	0.92	0.88	1.01	24.1	19.88	28.06
14	4,565.56	0.87	0.86	0.97	16.62	12.98	19.82
15	4,565.56	0.7	0.68	0.79	9.6	7.76	11.15
16	4,565.56	0.69	0.66	0.77	7.97	4.59	10.54
17	4,565.56	0.78	0.73	0.87	6.49	4.65	8.34
18	4,565.56	0.8	0.72	0.85	6.25	3.76	8.38
19	4,565.56	0.68	0.67	0.85	3.65	2.23	5.13
20	4,633.20	0.82	0.79	0.98	4.36	2.06	6.37

Tabla 9.6: Plan de producción, agendamiento por VAN-VaR, dirección SW.