



**UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA DE MINAS**

**SECUENCIAMIENTO MULTICRITERIO PARA MINERÍA SUBTERRÁNEA  
SELECTIVA**

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN MINERÍA  
MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL DE MINAS**

**ALEJANDRA NICOLETTE GÓMEZ JERIA**

**PROFESOR GUÍA:  
NELSON MORALES VARELA**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
JAVIER VALLEJOS MASSA  
ERNESTO ARANCIBIA VILLEGAS  
MILKA CASANEGRA MORELLI**

**SANTIAGO DE CHILE**

**ABRIL 2015**

**RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR AL TÍTULO DE:** Ingeniera Civil de Minas y grado de Magister en Minería

**POR:** Alejandra Nicolette Gómez Jeria

**FECHA:** Abril 2015

**PROFESOR GUIA:** Nelson Morales Varela

## **SECUENCIAMIENTO MULTICRITERIO PARA MINERÍA SUBTERRÁNEA SELECTIVA**

La elaboración de planes de producción es una labor que, dada su complejidad, se ha tenido que realizar de manera desagregada, es decir, no se evalúan en conjunto la totalidad de los componentes del proceso minero para su elaboración. Esto ha traído como consecuencia que los resultados obtenidos tengan dificultades a la hora de llevarlos a la operación, ya que se asumen consideraciones que se escapan de las reales condiciones del proceso. Este problema se ve reflejado con más fuerza cuando se habla de la extracción minera mediante el método de minería selectiva, donde la alta cantidad de factores involucrados en el proceso hacen muy difícil su integración. Es así, como la elaboración de los planes de producción se ha transformado en una labor que tiene un alto costo de tiempo con resultados que no necesariamente se acercan a la solución óptima del proceso y que está fuertemente influenciada por la experiencia del usuario que lo realiza, impidiendo además la posibilidad de generar mayor análisis de los procesos involucrados. Por tanto el siguiente trabajo tiene como objetivo establecer una metodología que provea de distintas alternativas de secuenciamiento para minería subterránea selectiva, en función de multicriterios para su evaluación.

Cuando se habla de multicriterios se refiere a poder integrar diversas variables propias del proceso en una misma evaluación, permitiendo así analizar su interacción y comprender de mejor manera el comportamiento del proceso minero. Es así como se evalúa para el estudio una serie de casos que permitan observar la tendencia del plan de producción y su respectivo secuenciamiento. Para ello se realizan planes de producción limitados por el tonelaje de extracción,  $m^3$  de relleno y metros a perforar, en diferentes periodos de tiempo mensuales, buscando responder al objetivo planteado. Se considera en forma particular el criterio correspondiente a la dilución, el cual se evalúa en función del ELOS de acuerdo a la variación del tamaño de los caserones.

Los resultados demuestran que efectivamente existe una interacción entre los criterios a evaluar en un mismo plan de producción, ya que imponiéndose restricciones específicas para cada criterio de manera independiente se suele llegar a soluciones infactibles, siendo necesario ajustar los distintos factores de manera que interactúen entre si y logren cumplir con las restricciones impuestas y la secuencia de extracción establecida. Además es posible integrar la dilución como un criterio más dentro de la evaluación, pudiendo analizar su impacto en base a dimensiones del caserón, donde se llegó al resultado que la decisión de diseño (largo caserón) varía al evaluar la dilución en el plan. Finalmente, es posible establecer una metodología de elaboración de planes de producción, que integra diferentes criterios en su evaluación, entregando resultados en base a evaluaciones de modelos matemáticos y que proporcionan al planificador una herramienta de análisis, comprensión y toma de decisiones del proceso de planificación.

## ABSTRACT

The elaboration of production plans is a task which, given its complexity, has had to be carried out in a way that is disaggregated from its various components which means that not all the components of the mining process are evaluated simultaneously when they are generated. This has brought as a consequence that the obtained results are difficult to translate into the operation, since some of the considerations do not respect the real conditions of the process. This problem is further compounded when dealing with selective mining methods, where the high quantity of factors involved in the process make their integration practically impossible. Thus, the elaboration of production plans has transformed into a task with a high time cost in its development, with obtained results that do not correspond to an optimal solution to the process, and that is strongly influenced by the experience of the user that performs it, impeding the possibility of carrying out further analyses of the processes involved. Therefore, the goal of the following work is to establish a methodology that provides with different alternatives for sequencing in the context of selective underground mining, using multicriteria for their evaluation.

Multicriteria refers to being able to integrate different variables, particular to the process, into the same evaluation thus allowing for the analysis of their interactions and to achieve better understanding of the behavior of the mining process. For the purpose of this study, different cases are evaluated that allow us observe the tendency of the production plan limited by extraction tonnage, cubic meters of backfill and meters to be bored, in different periods during the month, seeking to accomplish the desired objective. Special consideration is taken for the dilution criterion, which is evaluated via the ELOS method, for various stope sizes.

The results demonstrate that an interaction between the criteria to be evaluated in the same production plan effectively exists, given that independently imposing specific restrictions for each criterion tends to lead to infeasible solutions, being necessary to adjust the different factors so that they interact with each other so as to meet the imposed restrictions and the established sequence of extraction. Furthermore, dilution can be integrated as an additional criterion in the evaluation, as its impact, based on different cases that depend on the dimensions of the stope, can be analyzed, it was concluded that the stope size currently in operation is the best solution. Ultimately, it is possible to establish a methodology for the elaboration of production plans which integrates different criterion in its evaluation, delivers results based on solving mathematical models, and provides the planner with a tool for the analysis and real comprehension of the planning process.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo no significa un simple término de una investigación, sino que marca el cierre de una etapa importante de mi vida, etapa en la cual tuve momentos muy gratos como otros muy tristes, pero por sobre todo aprendí y crecí y me convertí en la persona y profesional que soy ahora.

Cuando quiero dar gracias a todas las personas que fueron parte de mí durante este proceso no puedo no comenzar por mi familia. Mi Papi, mi Mami, la Virma y mi Hermano, sin lugar a dudas fueron y son lo más valioso en mi vida. Desde ese primer apoyo cuando me vine a Santiago, el apoyo constante en cada evaluación sufrida de la universidad y el apoyo en esta etapa final han sido fundamental para que yo pueda estar terminando con éxito este ciclo. También quisiera mencionar al resto de mi familia, los que siguen con nosotros y los que se fueron en este camino, cada uno de ellos aportó con un granito de arena en esos momentos difíciles donde estuve alejado de ellos y me dieron la fortaleza para poder cumplir todas mis metas.

En esta etapa no solo crecí profesionalmente en conocimiento, sino también como personas. La gente que conocí hizo que el paso por la universidad fuera aún más gratificante. Jamás olvidaré a mis amigos de plan de común, que desde el primer día con el mechoneo nos hicimos amigos y mantenemos esa amistad que de seguro se mantendrá por siempre. A mis amigos mineros, con los cuales compartí 5 años en actividades académicas y en más de un bautizo, fonda o cena minera. Quizás no lo saben, pero cada uno de ellos fue más que un amigo, fueron mi familia en Santiago y eso lo valoraré por siempre.

También me gustaría mencionar a todas esas personas que colaboraron en este proceso. A mí querido equipo de difusión, en donde pude llevar con orgullo el nombre de la Universidad y ayudé a más de algún estudiante dudoso que luego me lo agradeció. A la Pili y Mane, muchas gracias por todo.

Finalmente, quiero agradecer a los que colaboraron en este trabajo. Nelson Morales, mi profesor guía, quien fue siempre el que me incentivo a continuar y no perder el rumbo de este trabajo. A Diego Mancilla, el investigador del laboratorio, sin su colaboración no habría podido haber realizado nada. Y por último, a Albino Vargas y Pablo Quiero, Ingenieros Civil en Minas, que me ayudaron a recopilar datos en terreno y que siempre estuvieron ahí para colaborar.

Sin lugar a dudas cierro una de las etapas más linda de mi vida, donde cada actor que participó de ella ha sido importante y lo guardaré por siempre en mi corazón. Muchas gracias a todos.

*Jany*

## TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Introducción .....	1
1.2. Motivación.....	3
1.3. Hipótesis del trabajo.....	3
1.4. Objetivos .....	4
1.4.1. Objetivos Generales .....	4
1.4.2. Objetivos Específicos.....	4
1.5. Alcances .....	4
1.6. Metodología .....	5
1.6.1. Recopilación de antecedentes.....	6
1.6.1.1. Base de datos.....	6
1.6.1.2. Conversión base de datos a formato UDESS.....	6
1.6.2. Calibración y validación UDESS .....	9
1.6.2.1. Validación mediante uso plan de referencia .....	9
1.6.2.2. Reconstrucción plan actual.....	10
1.6.2.2.1. Parámetros considerados en la evaluación .....	10
1.6.3. Casos de estudio .....	11
1.6.4. Experimentos asociados al efecto de la dilución.....	12
1.6.4.1. Evaluación sector BON con efecto de dilución .....	12
1.7. Resumen de la estructuración de la Tesis .....	14
2. ANTECEDENTES.....	15
2.1. Planificación minera en minería subterránea .....	15
2.1.1. Planificación minera.....	15
2.1.2. Horizontes de planificación .....	17

2.1.3.	Plan de producción .....	18
2.2.	Selección método de explotación.....	18
2.3.	Minería subterránea selectiva .....	19
2.3.1.	Método cut and fill.....	19
2.3.1.1.	Criterios de selección del método.....	20
2.3.1.2.	Caserones con relleno no cementado .....	22
2.3.1.2.1.	Bench and Fill .....	22
2.4.	Parámetros geomecánicos .....	23
2.4.1.	Definición de dilución .....	23
2.4.2.	Factores condicionantes de la dilución .....	25
2.4.3.	Descripción del parámetro radio hidráulico .....	26
2.4.4.	Número de estabilidad modificado (N') .....	26
2.4.5.	<i>Equivalent Linear Overbreak/Slough</i> (ELOS) .....	27
2.4.6.	Guías de estimación de sobreexcavación (ELOS).....	29
2.4.6.1.	Metodología de Clark (1998) .....	29
2.4.6.2.	Metodología de Capes (2009) .....	31
2.5.	Herramientas computacionales para el desarrollo de planes de producción ...	32
2.5.1.	Métodos de programación matemática.....	32
2.5.1.1.	Programación del agendamiento para minería subterránea.....	34
2.5.1.1.1.	Estudios realizados.....	34
2.5.1.1.2.	Herramientas comerciales disponibles .....	35
2.5.2.	Formulación modelo planteado.....	38
2.5.3.	Gurobi.....	39
2.5.4.	Implementación del modelo matemático (UDESS) .....	41
2.5.4.1.	Archivo de entrada y salida.....	42
2.5.4.2.	Visualización.....	44
3.	DESARROLLO .....	45

3.1.	Calibración y Validación de UDESS.....	45
3.1.1.	Validación mediante plan de referencia .....	45
3.1.2.	Reconstrucción plan actual.....	48
3.2.	Implementación casos de estudio.....	51
3.2.1.	Resultados evaluación planes sector AES y BON.....	53
3.2.1.1.	Evaluación planes diferentes meses .....	53
3.2.1.2.	Sensibilización plan para Diciembre 2013 .....	60
3.2.1.3.	Comparación beneficio plan Diciembre 2013 .....	63
3.3.	Resultados efecto variación tamaño de caserón, efecto dilución.....	65
3.3.1.	Calculo dilución por ELOS .....	65
3.3.1.1.	Tamaño L.....	66
3.3.1.2.	Tamaño 2L.....	67
3.3.2.	Resultados plan de producción.....	68
3.3.3.	Validación resultados.....	71
3.3.3.1.	Cumplimiento de actividades.....	71
3.3.3.2.	Actividades en ejecución según periodo.....	71
3.3.3.3.	Comparación secuenciamiento.....	74
3.3.4.	Impacto de la dilución en la elaboración del plan.....	75
4.	ANÁLISIS.....	77
4.1.	Metodología construcción planes de producción .....	77
4.2.	Uso de modelos matemáticos para la elaboración de planes de producción...78	
5.	CONCLUSIONES Y COMENTARIOS .....	80
6.	RECOMENDACIONES.....	83
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	84
8.	ANEXOS.....	86
8.1.	Anexo A: Factores geomecánicos.....	86

8.2.	Anexo B: Formulación modelo matemático.....	88
8.2.1.	Esquema comportamiento variables.....	88
8.2.2.	Variables del modelo .....	88
8.2.3.	Restricciones modelo.....	89
8.2.4.	Función Objetivo .....	93
8.3.	Anexo C: Visualización UDESS .....	94
8.4.	Anexo D: Datos plan de referencia .....	100
8.4.1.	Caso sin dilución.....	100
8.4.2.	Caso dilución 45 % .....	100
8.4.3.	Caso dilución estimación teórica.....	101
8.5.	Anexo E: Esquema yacimiento caso de estudio .....	102
8.6.	Anexo F: Restricción reconstrucción plan actual .....	106
8.7.	Anexo G: Restricciones sensibilización plan diciembre .....	107
8.8.	Anexo H: Gráficos calculo ELOS .....	109
8.8.1.	Según metodología de Clark.....	109
8.8.1.1.	Tamaño L.....	109
8.8.1.2.	Tamaño 2L.....	111
8.8.2.	Según metodología de Capes.....	113
8.8.2.1.	Tamaño L.....	113
8.8.2.2.	Tamaño 2L.....	115
8.9.	Anexo I: Secuencia de extracción casos estudio .....	116
8.9.1.	Actividades iniciales.....	116
8.9.2.	Actividades finales .....	117



## INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Actividades del modelo y sus parámetros. ....	7
Tabla 2: Comparación entre iGantt y Tempo.....	36
Tabla 3: Parámetros valorización económica.....	45
Tabla 4: Precedencias de actividades.....	49
Tabla 5: Parámetros aplicados a modelo de reconstrucción plan actual.....	50
Tabla 6: Parámetros para evaluación Sectores.....	51
Tabla 7: Precedencias de actividades para modelo implementado.....	52
Tabla 8: Valor tasas máximas de avance actividades.....	53
Tabla 9: Resultados evaluación Noviembre 2013. ....	53
Tabla 10: Resultados evaluación Diciembre 2013. ....	54
Tabla 11: Resultados evaluación Enero 2014.....	54
Tabla 12: Sectores evaluación secuencia.....	55
Tabla 13: Secuencia AES, Noviembre Caso A.....	56
Tabla 14: Secuencia Bon, Noviembre Caso A. ....	56
Tabla 15: Secuencia AES, Noviembre Caso B.....	56
Tabla 16: Secuencia BON, Noviembre caso B.....	57
Tabla 17: Secuencia AES, Diciembre Caso A.....	57
Tabla 18: Secuencia BON, Diciembre Caso A. ....	57
Tabla 19: Secuencia AES, Diciembre Caso B.....	58
Tabla 20: Secuencia BON, Diciembre caso B.....	58
Tabla 21: Secuencia AES, Enero Caso A. ....	58
Tabla 22: Secuencia BON, Enero Caso A.....	59
Tabla 23: Secuencia AES, Enero Caso B. ....	59

Tabla 24: Secuencia BON, Enero Caso B.....	59
Tabla 25: Restricción aplicadas a modelos Diciembre 2013. ....	61
Tabla 26: Resultados Caso del 1-4. ....	61
Tabla 27: Resultados Caso del 5-8. ....	61
Tabla 28: Comparación Beneficio. ....	63
Tabla 29: Parámetros evaluación ELOS. ....	65
Tabla 30: ELOS y N' para RH=3.9 ....	66
Tabla 31: ELOS y N' para RH=2.7 ....	66
Tabla 32: Resultados dilución Tamaño L. ....	67
Tabla 33: Relación N' y ELOS. RH=5.2.....	67
Tabla 34: Relación N' y ELOS. RH=3.3.....	68
Tabla 35: Resultados dilución Tamaño 2L. ....	68
Tabla 36: Restricción modelo implementación UDESS.....	68
Tabla 37 Número de caserones por base de datos.....	69
Tabla 38: Beneficio de los modelos.....	69
Tabla 39: Actividades realizadas en torno a actividades totales ....	70
Tabla 40: Porcentaje de actividades no realizadas según caso de estudio ....	71
Tabla 41: Conteo fracción de actividades desarrolladas. ....	73
Tabla 42: Actividades repetidas en los tres casos, primero 5 días del periodo. ....	74
Tabla 43: Extracción último 10 días periodo de evaluación ....	75
Tabla 44: Leyes caserones sin dilución.....	100
Tabla 45: Beneficio caserones sin dilución. ....	100
Tabla 46: Leyes caserones dilución 45%. ....	100
Tabla 47: Beneficio caserones dilución 45%. ....	101
Tabla 48: Leyes caserones dilución teórica. ....	101

Tabla 49: Beneficio caserones dilución teórica. ....	101
Tabla 50: Restricciones impuestas a la recreación del plan actual. ....	106
Tabla 51: Restricciones análisis cantidad de actividades cumplidas.....	108
Tabla 52: Actividades realizadas los primeros cinco días de evaluación. ....	116
Tabla 53: Actividades realizadas los últimos 10 días de evaluación .....	117

## INDICE DE ILUSTACIONES

Figura 1: Estructura general Tesis. ....	5
Figura 2: Fuentes de información plan minero. ....	8
Figura 3: Esquema ejercicio referencia. ....	9
Figura 4: Proceso de Planificación Minera ....	16
Figura 5: Horizontes de planificación y agregado de valor (Rubio, 2007). ....	17
Figura 6: Ejemplo plan de producción. ....	18
Figura 7: Esquema método Bench and Fill (Darling, 2011). ....	23
Figura 8: Dilución Planificada y No Planificada (Scoble & Moss, 1994) ....	24
Figura 9: a) Explicación gráfica tridimensional ELOS (Mah, 1992). b) Sección transversar de ELOS (Capes, 2009). ....	28
Figura 10: Guía de estimación de dilución de Clark (1998). ....	30
Figura 11: Guía de estimación de dilución de Capes (2009). ....	31
Figura 12: Esquema definición precedencia. ....	38
Figura 13: Restricciones de precedencias del tipo "o" (Rocher, 2012). ....	39
Figura 14: Resolución de solver Gurobi (Rocher, 2012). ....	40
Figura 15: Formato archivo parámetros de actividades de entrada a UDESS. ....	42
Figura 16: Formato archivo precedencias. Archivo entrada a UDESS. ....	43
Figura 17: Formato archivo salida UDESS. ....	44
Figura 18: Esquema calculo valorización. ....	45
Figura 19: Sección del agendamiento entregado por la herramienta. ....	46
Figura 20: Plan de producción modelos. ....	47
Figura 21: Esquema sector AES subsector Norte. ....	50
Figura 22: Representación gráfica plan de producción. Actual-UDESS. ....	51

Figura 23: Análisis beneficio y cantidad de actividades. ....	62
Figura 24: Flujo de caja de beneficio por periodo.....	63
Figura 25: Relación N' y ELOS. RH= 3.9 .....	66
Figura 26: Relación N' y ELOS. RH=2.7 .....	66
Figura 27: Relación gráfica ELOS y N', RH=5.2.....	67
Figura 28: Relación gráfica ELOS y N, RH=3.3 .....	68
Figura 29: Plan de producción evaluación impacto dilución.....	69
Figura 30: Número de actividades en ejecución según periodo de tiempo. ....	72
Figura 31: Relación beneficio reservas y plan.....	75
Figura 32: Gráfico de estimación del factor A (Mathews, Hoek, Wyllie, & Stewart, 1980). .....	86
Figura 33: Defecto de la orientación de la roca, Factor B (Mathews, Hoek, Wyllie, & Stewart, 1980).....	86
Figura 41: Grafico para la estimación de la inclinación de la superficie del caserón, Factor C (Mathews, Hoek, Wyllie, & Stewart, 1980).....	87
Figura 42: Descripción de las variables principales del modelo (Rocher, 2012). ....	88
Figura 43: Restricciones de recursos (Rocher, 2012). ....	91
Figura 37: Interfaz gráfica UDESS (1).....	94
Figura 38: Interfaz gráfica UDESS (2).....	95
Figura 39: Interfaz gráfica UDESS (3).....	96
Figura 40: Interfaz gráfica UDESS (4).....	97
Figura 41: Interfaz gráfica UDESS (5).....	98
Figura 42: Interfaz gráfica UDESS (6).....	99
Figura 43: Esquema sector AES subsector Norte. ....	102
Figura 44: Esquema sector AES subsector Central. ....	102
Figura 45: Esquema sector AES subsector Sur. ....	103

Figura 46: Esquema sector BON subsector Norte Norte.....	103
Figura 47: Esquema sector BON subsector Norte. ....	104
Figura 48: Esquema sector BON subsector Central.....	104
Figura 49: Esquema sector BON subsector Sur.....	105
Figura 50: Estimación ELOS, RH=3.9 .....	109
Figura 51: Estimación ELOS, RH: 3.9. N'min: 2.4, N' max: 5.1. ....	110
Figura 52: Estimación ELOS, RH=5.2 .....	111
Figura 53: Estimación ELOS, RH=3,3, N'min:2.4, N'max:5.1 .....	112
Figura 54: Estimación gráfica de ELOS: RH=3.9 .....	113
Figura 55: Estimación ELOS, RH: 3.9. N'min: 2.4, N' max: 5.1. ....	114
Figura 56: Estimación ELOS método gráfico, RH=5.2 .....	115
Figura 57: Estimación ELOS método gráfico, RH=3,3, N'min:2.4, N'max:5.1 .....	115

## INDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1: Expresión Dilución-método 1 (Scoble & Moss, 1994).....	25
Ecuación 2: Expresión Dilución- método 2 (Scoble & Moss, 1994).....	25
Ecuación 3: Cálculo radio hidráulico (Potvin, 1988). ....	26
Ecuación 4: Calculo número de estabilidad modificado (Potvin, 1988).....	27
Ecuación 5: Cálculo Q de Barton modificado (Potvin, 1988).....	27
Ecuación 6: Fórmula cálculo de ELOS [m] (MarcadorDePosición1). ....	29
Ecuación 7: Dilución en base porcentual a partir de ELOS[m] (Mah, 1992).....	29
Ecuación 8: Función objetivo programación lineal. ....	32
Ecuación 9: Restricciones programación lineal. ....	33
Ecuación 10: Restricciones no negatividad programación lineal.....	33
Ecuación 11: Función objetivo MIP. ....	33
Ecuación 12: Restricciones MIP.....	34
Ecuación 13: Valorización económica base de datos. ....	52

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Introducción

Con el transcurso de los años es posible ver como los avances tecnológicos han sido incluidos en las distintas etapas del proceso minero lo que ha generado mejoras sustanciales en la elaboración, desarrollo y resultados del proceso. A su vez, las dimensiones del negocio han ido aumentando con el transcurso de los años lo que ha transformado el desarrollo de las etapas del proceso minero en un desafío mucho más complejo de resolver.

La minería se constituye de variadas etapas, por lo que referirse a ella se puede abordar desde distintos puntos de vista. Se puede hablar de ésta referente a su método de extracción de mineral, en donde se puede clasificar en dos grandes divisiones: la minería a cielo abierto y la minería subterránea. A su vez esta última la podemos clasificar de acuerdo a su método de extracción en autosoportada, soportada o “*caving*” (Newman, Rubio, Caro, Weintraub, & Eureka, 2010). Dentro de la extracción soportada es posible encontrar la minería subterránea selectiva la cual se entiende como el proceso de extracción del mineral el que tiene como motivación extraer las riquezas existentes de la manera más precisa posible, intentando seguir las vetas de mineralización e impedir el movimiento masivo de estéril. Debido a su complejidad de ejecución, a los altos costos asociados y a la alta cantidad de factores que no son considerados en otro tipo de minería (como la de cielo abierto o la subterránea masiva), es que está destinado a yacimientos con mineralización que presenta un alto precio de mercado (como por ejemplo el oro), para así poder costear el negocio.

Seleccionado el método de extracción, se define el plan de producción con el cual se proyecta extraer la mina. Es así como la planificación minera ha surgido como una disciplina que busca de manera estratégica entregar las mejores opciones de negocio para el yacimiento en evaluación, en donde hay restricciones del tipo técnico y económico. El resultado de esta etapa del proceso consiste en un plan de producción que entrega los lineamientos a seguir de manera de asegurar la mejor estrategia de extracción que cumpla con los criterios impuestos para la generación del plan, las cuales serán posteriormente exhibidas a los directorios, gerencias, jefaturas, operadores, etc., según corresponda a la etapa del proceso a planificar, ya que ésta se puede realizar a inicios de un proyecto generando planificaciones al largo plazo o a periodos operacionales, lo que se traduce en una planificación de corto plazo. Es así como la planificación corresponden a un proceso iterativo que requiere la búsqueda de muchas opciones y determinar que, a la larga, se encuentren resultados óptimos (Darling, 2011, p. 1135).

El proceso de generar el plan de producción y su respectiva calendarización, las cuales están íntimamente asociadas respecto a la ubicación de minas e instalaciones de procesamiento existentes, son por lo general tareas complejas y que consume una gran cantidad de tiempo. Su complejidad varía dependiendo del nivel de detalle al cual se



quiere llegar, esto mismo genera que en muchas de las etapas de su elaboración exista una desagregación importante de los factores involucrados, de manera de hacer la resolución del problema una tarea un poco más simple. Este desacoplamiento de la información que forma parte de la elaboración del plan de producción, genera que los planes obtenidos no correspondan a las mejores decisiones que se podrían evaluar del yacimiento, ya que al considerar interacciones por parte de los diferentes actores participantes es posible dimensionar nuevas aristas antes no visualizadas. Hoy en día es muy usual esperar que los planes no cuenten con toda la información requerida integrada en su elaboración, debido a la complejidad que esto resulta, en particular cuando el que elabora el plan corresponde a un usuario ayudado con algunas herramientas computacionales básicas en donde sus decisiones dependen de su experiencia, intuición y juicio (Barbaro & Ramani, 1986). Esta misma complejidad ha llevado al uso de algunas heurísticas para ayudar en la resolución de la labor de generar un plan. El algoritmo puede producir calendarizaciones utilizables en operación, pero no hay manera de saber que tan cerca está del óptimo deseado (Karzulovic & Alfaro, 2004, pág. 441).

Existen factores mineros importantes que su evaluación dentro del plan minero trata de ser desacoplado del problema por su alta complejidad. Un ejemplo particular de esta situación ocurre con la geomecánica. La geomecánica es una de las consideraciones más importantes en el proceso de la operación. El vulnerar la geomecánica de un yacimiento puede traer resultados catastróficos a niveles de trabajadores y propios del negocio. Un tema muy importante que nace a partir de la geomecánica corresponde a la dilución. La dilución se entiende como la contaminación del mineral por material no mineral durante el proceso minero (Wright, 1983). Este concepto se hace aún más importante cuando nos referimos a minería subterránea selectiva, donde la interferencia de material estéril extra puede afectar considerablemente las etapas y costos del proceso.

El sistema de planificación en la toma de decisiones para minería es algo esencial. El diseño óptimo del layout de una mina y su posterior calendarización de actividades mineras mientras se consideran restricciones de recursos y actores económicos dentro del proceso, son los principales lineamientos que determinan la búsqueda de modelos matemáticos realistas y con enfoques en soluciones eficientes (Bley & Terblanche, 2011). Si bien se tiene conocimiento de la necesidad de crear planes óptimos para asegurar un mejor uso de los recursos disponibles, el desarrollo hacia esta área ha sido explotado en mayor medida los últimos años y aún con soluciones que tienen que mejorar. Se ha incursionado fuertemente en técnicas de optimización matemática aplicadas al plan de producción de minas en superficie pero la aplicación de técnicas de optimización como la Programación Entera Mixta (MIP) a múltiples periodos de la planificación de minería subterránea ha sido severamente limitada debido al gran número de variables integradas y a complejos conjuntos de restricciones requeridas, que resultan en una larga solución irreal (Karzulovic & Alfaro, 2004, pág. 441).

En el siguiente trabajo se busca abordar la planificación para minería subterránea selectiva, desde una perspectiva mucho más desafiante, buscando integrar las diferentes aristas que interactúan en el proceso con la ayuda de la herramienta computacional

llamada UDESS. Se evaluará el plan de producción de una mina extraída mediante el método de bench and fill. Se analizarán diferentes casos correspondiente a un periodo de evaluación de corto plazo (el cual abarcará un mes), ya que presenta un alto dinamismo operacional (Nehring, Topal, Kizil, & Knights, 2012), por lo que se generan constante reasignaciones de los recursos y se hace de gran utilidad una herramienta que permita tomar decisión de manera rápida y certera. Se someterá la evaluación a diversas restricciones en donde se destaca el efecto que tiene la dilución dentro del plan generado. Debido a la magnitud del yacimiento se pondrá principal atención en solo dos sectores de la mina y de dejará como trabajo futuro la extensión del trabajo a la mina completa y a la evaluación de otros horizontes de tiempo.

## **1.2. Motivación**

La elaboración de planes de producción con su respectivo agendamiento se caracteriza por ser una labor compleja (dependiendo del horizonte de tiempo a evaluar) y que depende en gran parte de las habilidades del usuario que se encuentra realizando la tarea. Cuando se aborda al caso de la minería subterránea selectiva esta tarea se hace aún más difícil debido a la alta cantidad de variables que interactúan al mismo tiempo en el proceso, generando que muchas veces la elaboración sea una tarea aún más larga en términos de tiempo. Si se analiza la calidad del producto obtenido a través de éste proceso, es posible observar que los resultados no necesariamente son la mejor solución, y si bien, cumple con ciertas restricciones impuestas, la solución no representa un óptimo del problema.

Haciendo relación a que el proceso se desarrolla de manera desagregada, que a su vez resulta ser una ardua tarea su elaboración y obedeciendo a que los resultados obtenidos no representan una solución que se acerque al óptimo del problema, es que se plantea el siguiente trabajo el cual busca abordar dos grandes problemáticas: en primer lugar poder realizar planes de producción en un tiempo de elaboración menor, que no dependa exclusivamente de un usuario y que se logre identificar soluciones mediante el uso de modelamiento matemático; y en segundo lugar poder incluir en su evaluación criterios importantes que muchas veces son aislados del proceso de elaboración producto de la alta complejidad que genera incluirlos de manera más precisa, logrando así realizar análisis de sensibilidad que permitan identificar y entender el impacto de ciertas variables en el proceso.

## **1.3. Hipótesis del trabajo**

La hipótesis de este trabajo presume dos aspectos fundamentales:

- En primer lugar, que es posible desarrollar planes de producción minero y su respectivo agendamiento, para minería subterránea selectiva, considerando en su evaluación una serie de criterios;
- Y en segundo lugar, que es posible realizar análisis en la elaboración de planes y a un bajo costo en tiempo, en donde se pueda apreciar el impacto de los criterios asociados al plan.

Bajo el primer punto se busca establecer el uso de herramientas computacionales que ayuden con la resolución del problema planteado, en donde se integren los criterios que se buscan unificar en una misma evaluación. Para el segundo punto, con los resultados obtenidos a partir de la herramienta, generar análisis de las diferentes variantes que pueda adoptar el plan debido a la interacción generada por nuevos criterios considerados, permitiendo tener mayor claridad de los fenómenos generados en la operación.

A diferencia de trabajos anteriores, este trabajo busca desarrollar planes mineros que cumplan con los criterios impuestos inicialmente y que a su vez sea capaz de encontrar soluciones óptimas al problema planteado. Lo anterior se busca mediante el uso de herramientas computacionales y modelamientos matemáticas que en su conjunto son capaces de evaluar una cantidad considerable de datos y casos que permite encontrar mejores soluciones.

## **1.4. Objetivos**

En el siguiente trabajo se plantean los siguientes objetivos:

### **1.4.1. Objetivos Generales**

El estudio tiene por objetivo general establecer una metodología que provea de distintas alternativas de secuenciamiento para minería subterránea selectiva en función de multicriterios en su evaluación.

### **1.4.2. Objetivos Específicos**

Los objetivos específicos que se plantean corresponden a:

- Realizar un modelamiento del método de manera que se pueda llevar a la evaluación de los planes de producción y secuenciamiento mediante la herramienta computacional UDESS.
- Implementar y posteriormente validar la herramienta sobre un caso base.
- Definir los criterios relevantes para la evaluación del plan de acuerdo a los horizontes de tiempo que se vayan a considerar.
- Incorporar y evaluar los resultados obtenidos para los planes considerando el impacto que tiene la dilución sobre el plan.

## **1.5. Alcances**

Los alcances a los cuales estará limitado el siguiente trabajo de investigación corresponden a:

- El trabajo se enfocará únicamente a evaluación de planes de minas explotadas mediante el método correspondiente a minería subterránea selectiva, analizando

el caso particular del caso base que corresponde a una mina extraída por el método Bench and Fill. Se concentrará el análisis en dos sectores de la mina en evaluación, debido a su cercanía geográfica y su facilidad en el manejo de información.

- Referente a los criterios utilizados en las evaluaciones a realizar, estos serán aplicados de manera simple y demostrativa en base a fundamentos teóricos de los mismos, por lo no cual no habrá presencia de simulaciones o evaluaciones similares.
- Se analizarán evaluaciones correspondiente a periodos de planificación de corto plazo (meses) producto de la precisión de información disponibles.

## 1.6. Metodología

En la siguiente sección se muestra detalladamente las etapas a seguir para desarrollar el trabajo presentado. Se entrega una pequeña descripción de los trabajos a realizar en cada sección, los que en capítulos posteriores serán desarrolladas a cabalidad.

La estructura del presente trabajo se divide en dos etapas. En primer lugar se realizará la validación de la herramienta computacional propuesta (UDESS). Para esto inicialmente se evaluará un plan de referencia y se verificará las limitaciones existentes. Posteriormente se evaluará un plan real de una operación minera extraída mediante bench and fill la cual se construirá con el uso de UDESS. La segunda etapa consiste en realizar la implementación y validación de los modelos. Para esto, se realizan una serie de casos los cuales variarán de acuerdo a los multicriterios a considerar, es así como se modificarán parámetros como el tonelaje del modelo producto de la dilución dado la variación del tamaño del caserón.

El trabajo se puede describir de acuerdo al siguiente diagrama:

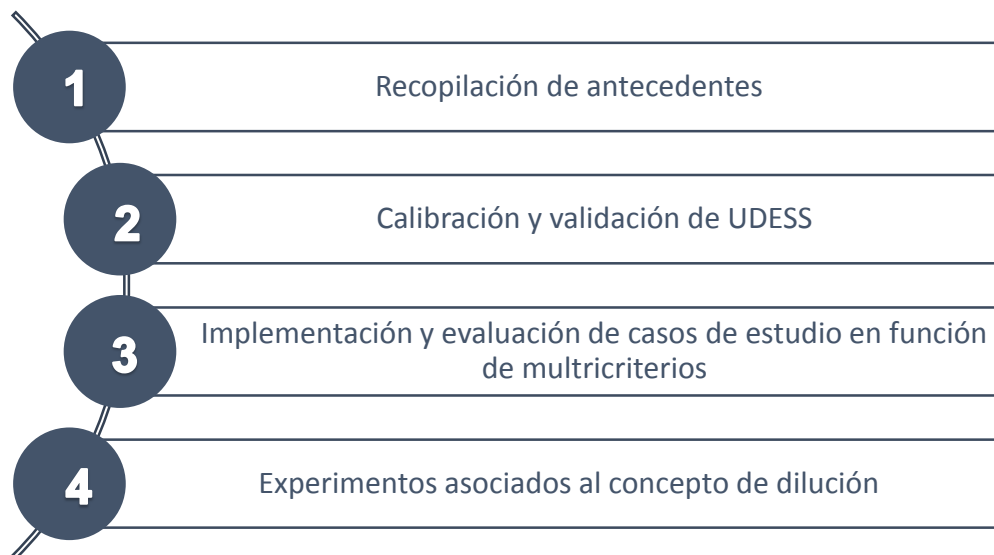


Figura 1: Estructura general Tesis.

## **1.6.1. Recopilación de antecedentes**

### **1.6.1.1. Base de datos**

El trabajo fue desarrollado en colaboración con una operación minera la cual extrae su yacimiento, principalmente de oro y plata, mediante el método bench and fill. Su procesamiento se lleva a cabo en una planta de lixiviación por cianuración la cual produce metal dore.

La mineralización del yacimiento corresponde a vetas distribuidas de manera heterogénea, por lo que la identificación de los recursos y posteriores reservas se torna una tarea compleja y poco exacta, lo que se traduce en que las fuentes de información en las cuales se fundamentan los futuros planes no sean las más precisas. Esta misma incertidumbre en el inventario de reservas genera que a medida que se acerca a la veta se modifique las fuentes de información y por tanto pueda existir una variación en los planes antes generados.

Para tratar de disminuir la incertidumbre provocada por la falta de información precisa, se intenta construir una base de datos que integre la mayor cantidad de factores. Es así como la base de información para la construcción de los planes mineros se obtiene según el esquema de la Figura 2.

Se utilizará la base información correspondiente a dos sectores de la mina AES y BON, los cuales fueron seleccionados por su cercanía geográfica y facilidad de acceso a la información,

De esta etapa se espera realizar un levantamiento de datos de acuerdo a los requerimientos necesarios. Es de especial importancia que la fuente de información proporcionada esté al alcance en calidad de información para ser utilizada en el posterior análisis. En conjunto a lo anterior, se debe tener un conocimiento pleno del método de extracción a representar debido al alto impacto que tienen los distintos agentes que intervienen en su correcta ejecución. Éste punto toma mayor importancia a la hora de tener que construir las precedencias, ya que un error puede significar que el proceso no esté recreado de la manera correcta y por ende no se tenga resultados comparables.

### **1.6.1.2. Conversión base de datos a formato UDESS**

Luego de tener la información necesaria del yacimiento, es necesaria transformar los datos a un formato que sea leído por la herramienta.

En primer lugar es necesario definir las actividades que serán consideradas en la evaluación. En la siguiente tabla se listan las actividades y los parámetros requeridos en cada una:

Parámetros											
Actividad	Tone-laje	Ley Au-Ag	Tasa máxima	M <sup>3</sup> Relleno Cement	M <sup>3</sup> Relleno Seco	M perforados	Ingreso	Costo Mina	Costo Relleno	Costo Perforación	Costo total
Drift (DR)	✓	✓	✓				✓	✓			✓
BENCH	✓	✓	✓				✓	✓			✓
Cementado (RC)			✓	✓					✓		✓
Seco (RS)			✓		✓				✓		✓
M perforados (PERFO)			✓			✓				✓	✓

Tabla 1: Actividades del modelo y sus parámetros.

Los drift corresponden a la actividad de construcción del drift, es decir el movimiento de tonelaje, que también presenta mineral, para dejar el acceso hacia el caserón. Los Bench corresponden a la actividad de extracción del caserón en producción. El relleno cementado corresponde a la primera capa de relleno la cual tiene cemento en su composición. El relleno seco es posterior al cementado y está constituido por material estéril. Finalmente, los metros perforados corresponde a los metros perforados del caserón para su posterior extracción.

Debido a que se construye un archivo único con todas las actividades antes mencionadas, los parámetros que no aplican a la actividad toman el valor cero (por ejemplo, para una actividad definida como BENCH los metros perforados es cero).

Para la evaluación se define un horizonte de un mes (31 días). Por lo tanto las tasas de avance máximo es necesario ajustarlas por un factor. Así las tasas máximas de avance queda definidas como:  $v_{maxi} * f_{ajuste}$ .

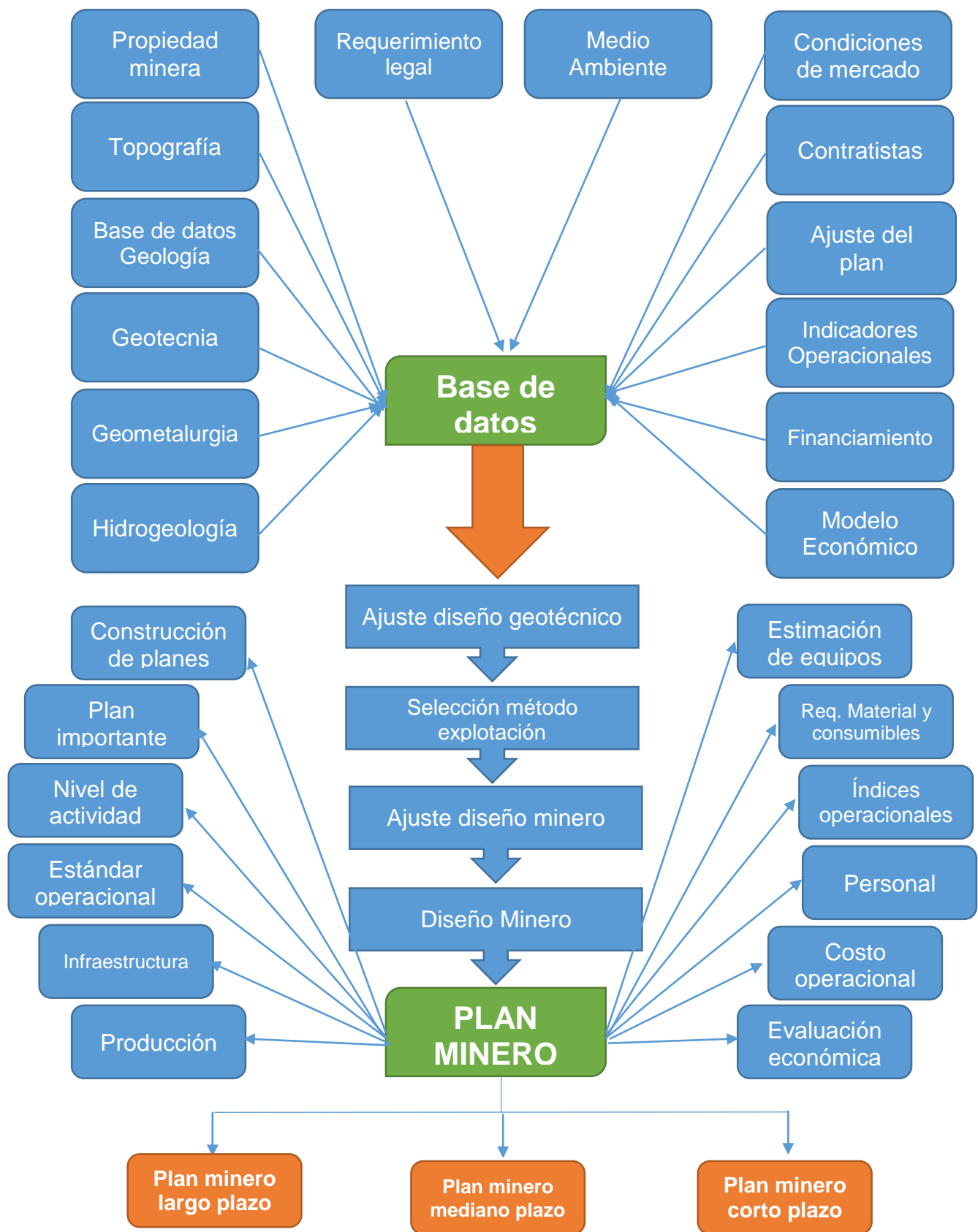


Figura 2: Fuentes de información plan minero.

## 1.6.2. Calibración y validación UDESS

### 1.6.2.1. Validación mediante uso plan de referencia

La herramienta UDESS ha sido utilizada con anterioridad en evaluación de proyectos de minería subterránea, pero de características masivas. Es por esta razón que antes de evaluar un modelo a mayor escala, es necesario aplicar el problema de la extracción por Bench and Fill a un esquema de referencia, el que permita escalar y verificar el impacto de ciertas variables en el plan y la secuencia obtenida.

Se propone evaluar el siguiente caso de referencia:

- Yacimiento con extracción mediante minería subterránea selectiva, en particular bench and fill, el cual está compuesto por 4 niveles.
- Existe un total de 6 caserones por nivel, por tanto un total de 24 caserones por sector. Cada caserón tiene un largo de 10 m.
- Su capacidad máxima de extracción es de 3,000 ton/mes.
- Para una correcta secuencia de extracción existe un desfase de uno y tres caserones entre niveles.
- La capacidad máxima de extracción/relleno por periodo es de 6 caserones.

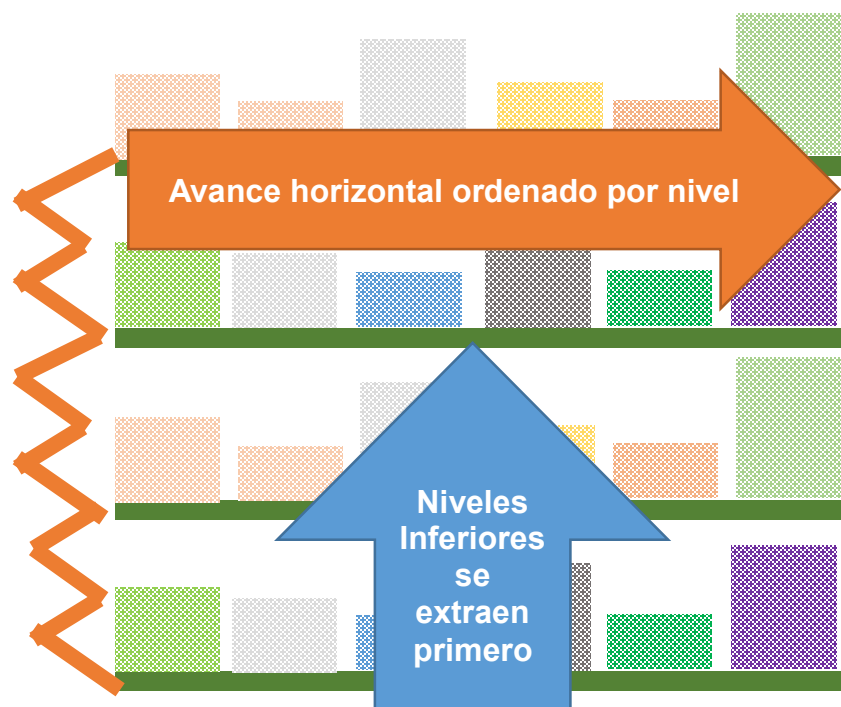


Figura 3: Esquema ejercicio referencia.

Como se observa en la descripción anterior, para este modelo se consideran características propias del método que corresponde a secuencia de extracción, el desfase que debe existir entre nivel para que no haya interferencia y el efecto de la actividad de relleno.



Para la evaluación se establecen tres casos: en primer lugar una corrida considerando un tonelaje determinado y una ley, posteriormente una evaluación considerando una dilución constante del 45% y finalmente una evaluación considerando una dilución estimada mediante criterios de dilución en función de N' y RH.

Finalmente, se realiza una comparación entre los planes de producción obtenidos y sus respectivos beneficios.

### **1.6.2.2. Reconstrucción plan actual**

Evaluable el plan de referencia, es necesario validar la herramienta con un plan actual de la mina para observar las limitaciones que se presentan. Para esta evaluación se consideró los sectores AES y BON y su plan mensual correspondiente al mes de Noviembre 2013. El objetivo de este experimento es verificar que efectivamente la herramienta es capaz de recrear un plan de producción en base a las restricciones impuestas y respetando los criterios operacionales propios del método. Si bien, no se espera recrear el secuenciamiento, si se espera lograr tener un plan de producción similar y que permita comparar las eventuales diferencias entre ambos y poder detectar las posibles ventajas y desventajas entre la utilización de ambas metodologías.

Se definen las actividades que estaban destinadas a ser realizadas durante este periodo para ser ingresadas como parámetros de entrada a la evaluación.

La secuencia de extracción que se presenta no es del todo ordenada. Los caserones definidos como actividad para ser extraídos no necesariamente son consecutivos de un mismo nivel y sector. Pueden existir, por ejemplo, tres caserones consecutivos en el nivel 1620 y por otro lado dos caserones disponibles en el nivel 1680, pudiéndose extraer en ambos niveles un caserón al mismo tiempo. De todos modos, la secuencia de extracción está representada por las precedencias propias del método.

#### **1.6.2.2.1. Parámetros considerados en la evaluación**

Debido a que la reconstrucción se centrará únicamente en dos sectores de la mina a evaluar, es importante tener claro los siguientes criterios:

- El plan mensual de la mina está diseñado para tener una producción diaria constante considerando todos los sectores de la mina. Por tanto, al extraer únicamente dos sectores es posible encontrarse con un plan irregular que no representa lo que sería un plan ideal.
- Si bien el plan es irregular, de todos modos se tiene una capacidad máxima por sector, la cual será respetada.

### 1.6.3. Casos de estudio

Una vez calibrada y validada la herramienta a utilizar, es necesario realizar los modelos y posteriores corridas que permitan identificar los efectos del uso de la herramienta de optimización en las soluciones obtenidas y el efecto de incluir múltiples criterios en su evaluación.

Para los casos a evaluar se definen las siguientes actividades: construcción de drift, perforación, extracción bench, aplicación relleno cementado y relleno seco. A su vez se definen las precedencias de acuerdo a las restricciones del método de extracción.

Es posible observar que a diferencia de la representación del plan real en este modelo existe una nueva actividad, la perforación. Esta actividad fue incluida en las evaluaciones ya que dentro del detalle del programa mensual entregado por la compañía se entrega reporte de toneladas de drift y de bench, m<sup>3</sup> de relleno y metros de perforación.

Se espera poder construir un plan de producción que esté limitado de acuerdo a diversos criterios considerados en el proceso minero y que tienen influencia en su decisión final, manteniendo al margen ciertos conceptos que también pudieron haber sido relevantes pero que no se encuentran dentro de los alcances de este estudio. Los criterios utilizados para esta evaluación corresponden a:

- Capacidad de tonelaje a extraer.
- Capacidad de relleno seco.
- Capacidad de relleno cementado.
- Capacidad de metros a perforar.

El objetivo de realizar estas evaluaciones está directamente relacionado a la idea de integrar diferentes criterios en una misma evaluación. Como se observa, se plantea la construcción de un plan de producción donde no solo se cumpla con las restricciones de tonelaje, que es lo que se suele hacer en una construcción realizada por un experto, sino que se integra en una misma evaluación el tonelaje, la perforación y el relleno. Además de integrar, es capaz de ser evaluada dentro de una herramienta computacional en base a un planteamiento matemático que permite entregar soluciones que pueden incluso no ser interpretadas tan a simple vista por un usuario.

Por otro lado, la evaluación económica también corresponde a un factor importante a la hora de tomar decisiones, por lo que también será un factor a evaluar.

Existen otra serie de factores operacionales que están involucrados en el proceso, pero que por temas de alcance de la Tesis no serán evaluados. Así se tiene, por ejemplo, la flota de equipos disponibles para realizar las diversas actividades. En particular este factor no fue considerado de manera específica ya que afecta de manera indirecta las actividades antes descritas. Su capacidad máxima de avance depende en gran medida de la capacidad operacional con las que se cuenta para poder desarrollar la actividad. Por otro lado, de acuerdo a la información recopilada, la flota de equipos es un parámetro

sobredimensionado en la mina que se evalúa, por lo que no representa una limitante su disponibilidad.

Se realizará en primer lugar una evaluación para tres meses distintos, para identificar la variación de resultados en relación a las restricciones impuestas. Posteriormente se analizará el caso particular del mes de diciembre y se hará una comparación entre los resultados obtenidos por el plan mediante UDESS y el plan realizado por la compañía.

#### **1.6.4. Experimentos asociados al efecto de la dilución**

##### **1.6.4.1. Evaluación sector BON con efecto de dilución**

Dentro de los objetivos mencionados al inicio de esta tesis se destaca la importancia de poder evaluar un factor relevante, el que corresponde a la geomecánica. En particular, se plantea discutir su impacto mediante el efecto que tiene la dilución sobre la realización del plan de producción. Para esto, se realizan evaluaciones del impacto de la dilución dependiendo del tamaño de la cavidad (caserón). Esto se lleva a cabo mediante el uso de modelo de estimación de dilución mediante el concepto de ELOS el cual se describe en 2.4.6 Guías de estimación de sobreexcavación (ELOS) de la sección Antecedentes. Para esto se plantean tres casos generales de evaluación:

- **Tamaño L/2:** Se considera el tamaño L/2 como el caso base, el cual tiene un largo de 7.5 m. El caso base hace referencia a que se realiza el supuesto que no está afectado por material estéril, debido a que la cavidad es lo suficientemente pequeña para mantener el control y extraer únicamente el mineral y el material estéril planificado según corresponda.
- **Tamaño L:** Se considera una cavidad (caserón) de tamaño L igual a 15 m, el cual está afectado por dilución. Para determinar su influencia se utilizan las guías de estimación escritas en el capítulo de Antecedentes que permitirán tener una referencia del material estéril extraído.
- **Tamaño 2L:** Se refiere a la cavidad (caserón) de tamaño 2L igual a 30 m, el cual está afectado por dilución. Al igual que el tamaño L, se utilizarán las guías de estimación de ELOS para determinar la influencia de material estéril.

Dado que los modelos utilizados se basan en análisis gráfico a través de los parámetros  $N'$  y RH, se recopila la información necesaria para su evaluación. Dependiendo del nivel en el cual se encuentre la cavidad, se evalúan para diversas dimensiones de caserón, las cuales tienen por factor común su largo.

La base de datos con información del sector BON inicialmente está constituida principalmente por caserones de tamaño L=15m que es la dimensión estándar de los caserones presentes en la mina (se dice principalmente ya que existe un par de caserones de tamaño 2L en la base de datos inicial). Producto del estudio que se propone realizar, la base de datos sufre modificaciones que tienen impacto en el tamaño del caserón (lo que se traduce en su tonelaje), en la cantidad de relleno cementado a implementar y en las nuevas precedencias generadas producto de la incorporación de

nuevas actividades. Es así, como a continuación se describe detalladamente el impacto que tiene en la base de datos las modificaciones realizadas.

- **Tamaño L/2:** Debido a que hay una reducción a la mitad del caserón inicial, se realiza el supuesto que las nuevas unidades creadas de tamaño 7.5 m de largo tienen su propia pared de relleno cementado y su posterior relleno seco. Es así como se crean nuevas actividades de relleno cementado y se redistribuye el material de material estéril destinado a relleno seco. Como se mencionó anteriormente, estos caserones no se ven influenciados por el efecto de la dilución, por lo que se redistribuye el tonelaje y sus leyes.
- **Tamaño L:** Debido a la presencia de un par de caserones de tamaño 30m, se reestructuran para dejar todos los caserones de un tamaño 15m. En esta situación nuevamente se crean una unidad independiente en cada caserón, por lo cual es necesario la integración de nuevas actividades de relleno cementado y la redistribución del material estéril para el relleno seco. Se observa la influencia de la dilución tanto en el tonelaje como en la ley.
- **Tamaño 2L:** Se crea una base de datos donde los caserones tienen una dimensión de 30 m. Debido a que cada nuevo caserón es una unidad independiente, existen actividades de relleno cementado que son suprimidas producto de la unión entre dos caserones anteriores. El material estéril para el relleno seco es redistribuido. El efecto de la dilución tiene un impacto en el tonelaje y en la ley del caserón.

Es importante mencionar que las actividades de drift no debieran ser alteradas producto que se mantendrá la información original de la base de datos en la cual ya tiene considera una dilución de acuerdo a los datos históricos analizados. No se incluye a los drift en la estimación del ELOS mediante las guías de estimación debido a que están diseñadas para cavidades de caserón, no para desarrollos de accesos.

Se espera poder identificar el impacto que tiene las dimensiones de los caserones en los resultados del plan final debido al efecto que tiene la dilución sobre ellos. A partir de las evaluaciones realizadas y de los diversos inconvenientes que se vayan presentando en la ejecución, se espera poder plantear un criterio único de integración de criterios de decisión que permitan desarrollar con éxito la elaboración de planes de producción optimizados mediante el uso de herramientas de programación matemáticas.

## 1.7. Resumen de la estructuración de la Tesis

A continuación se describe el trabajo realizado en las secciones de la tesis.

**i. INTRODUCCIÓN:** En la primera sección se entrega la información inicial del trabajo a realizar, contextualizando y dando a conocer las motivaciones existentes para el posterior trabajo. Se entrega una breve introducción, detallando las motivaciones y entregando los objetivos planteados. Se definen los alcances a los cuales se acota el trabajo. Junto a esto se describe la metodología a utilizar. Para ello se detalla la secuencia de pasos a seguir para obtener los resultados del estudio y se establecen los objetivos de cada etapa.

**ii. ANTECEDENTES:** Se desarrolla un estudio bibliográfico correspondiente a los antecedentes fundamentales que darán el respaldo del posterior estudio. Se definen conceptos, metodologías y fundamentos correspondientes a planificación minera, la minería subterránea selectiva, aspectos geomecánicos como dilución y las herramientas a utilizar para el desarrollo del trabajo.

**iii. DESARROLLO:** Muestra el desarrollo y resultados del trabajo propuesto. Se comienza por validar la herramienta computacional a utilizar con un caso de referencias. Luego se desarrollan las pruebas realizadas en la faena utilizada como caso de estudio, determinando las actividades mineras relevantes que involucran su desarrollo e identificando las limitaciones de la herramienta. Posteriormente se presenta la evaluación de diversos casos de estudio que buscan determinar el efecto de los multicriterios en las consideraciones del análisis. Se evalúa el caso particular correspondiente al efecto de la dilución provocada por la variación del tamaño de los caserones. Se analiza su impacto de acuerdo a análisis teóricos y se observa su efecto en el análisis de los planes generados.

**iv. ANÁLISIS:** Se realiza una discusión del trabajo realizado a partir de los resultados obtenidos. Se analiza la metodología utilizada para la elaboración de planes y el uso de modelos matemáticos en la resolución de este tipo de problemas. Se analiza el efecto de la dilución y su impacto en la elaboración de los planes de producción.

**v. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS:** Se entregan las conclusiones correspondientes a partir de los objetivos planteados inicialmente. Se precisan los resultados relevantes obtenidos a lo largo del trabajo.

**vi. RECOMENDACIONES:** Se entregan recomendaciones al trabajo realizado y propuestas de posibles trabajos futuros.

**vii. BIBLIOGRAFÍA:** Contiene el listado de referencias utilizadas durante el trabajo que respalda la veracidad de la información proporcionada.

**viii. ANEXOS:** Se encuentra aquella información complementaria al trabajo.

## 2. ANTECEDENTES

El siguiente capítulo reúne los fundamentos correspondientes a la información bibliográfica necesaria para el desarrollo del trabajo posteriormente desarrollado. Se presentan los siguientes conceptos:

- **Planificación minera en minería subterránea:** Se busca definir la disciplina, misión y el procedimiento necesario para su elaboración.
- **Minería subterránea selectiva:** Se presentan las características propias de la minería subterránea selectiva, con énfasis particular en el método Cut and Fill el cual presenta su variación Bench and Fill.
- **Parámetros geomecánicos:** Se entregan los conceptos teóricos correspondiente al cálculo de la dilución mediante el concepto de ELOS. Se plantean la hipótesis de dos autores y sus respectivas formulaciones.
- **Herramientas computacionales para el desarrollo planes de producción:** Se define la herramienta computacional propuesta para el trabajo, indicando su base fundamental para poder resolver los problemas además de describir la heurística utilizada para la resolución de los problemas.

### 2.1. Planificación minera en minería subterránea

#### 2.1.1. Planificación minera

La planificación minera corresponde al proceso de ingeniería que transforma el recurso mineral en el mejor negocio productivo. Para su elaboración se tenderá a maximizar la renta del negocio minero activando cada una de sus fuentes, integrando las restricciones impuestas por el recurso mineral, el mercado y el entorno (Rubio, 2007).

La información requerida parte por detalles geológicos, estructurales e información mineralógica, combinado con los datos de recursos. Esta información entrega preliminarmente el método minero a utilizar y el tamaño de la producción mina. Definido los lineamientos iniciales es posible realizar la planificación la cual se ve limitada y forzada tantos por aspectos técnicos como por aspectos económicos. Si bien al realizar estas tareas se busca garantizar la mejor operación minera, esto no siempre suele suceder, ya que para lograr es necesario que la planificación sea hecha de manera correcta y considerando todos los factores que la involucran. Es así, como de acuerdo a la literatura (A. Hustrulid & L. Bullock, 2001, pág. 15), los factores que se ven involucrados en la elaboración de la planificación minera se describen a continuación:

- a. **Información física y geotécnica:** es necesaria para la planificación minera preliminar. Para esto se recurre a información técnica correspondiente a propiedades del lugar, ubicación de la mineralización, tabulación de la geología

del lugar, clasificaciones de la calidad de la roca (RDQ: “*Rock quality designation*”), reporte de alguna característica especial del sector, entre otros. Con el mismo grado de importancia y considerado dentro de la misma categoría, se necesita la información geológica y mineralógica la cual junto con describir el tipo de roca que es posible encontrar nos entrega las dimensiones de la zona a evaluar, la orientación, la distribución de la mineralización, la cantidad de reservas y recursos. Finalmente, es necesario la información estructural referente a la orientación, a la calidad y las estructuras presentes en la roca huésped (caras posteriores, piso, pared colgante y pared yacente) y las estructuras presentes de acuerdo a la mineralización disponible. Es necesario contar con estas fuentes de información, las cuales por lo general son obtenidas en etapas tempranas del proyecto (perfil, prefactibilidad y factibilidad).

- b. **Tamaño de la producción de la mina:** Básicamente las metodologías utilizadas corresponden a la optimización del valor presente neto (VPN) u operar de tal manera que el rendimiento máximo de la tasa interna se genere a partir de los flujos de caja descontados. Existen otras formas de determinar la producción adecuada como por ejemplo mediante las fórmulas de Taylor, las cuales pretenden estimar un valor a partir de los tonelajes de reservas de mineral, sin embargo esta aproximación tienden a sobreestimar la producción para depósitos tipo veta.
- c. **Tiempo que interfieren en la producción mina:** Se debe tener en consideración los tiempos estimados para las diversas actividades del proceso para poder llevar a cabo la planificación posterior. Por ejemplo, para lograr una producción adecuada es necesario tener una cantidad de desarrollos tal que permita llevar a cabo los lineamientos iniciales. Estas consideraciones son las que se deben tener claras y ser integradas como una limitante más de la evaluación final del plan.
- d. **Consideraciones respecto a temas gubernamentales:** Dependiendo del lugar existen diversas restricciones ya sea por el método, la duración del proyecto o por factores económicos que deben ser considerados a la hora de evaluarlos en el plan a desarrollar.

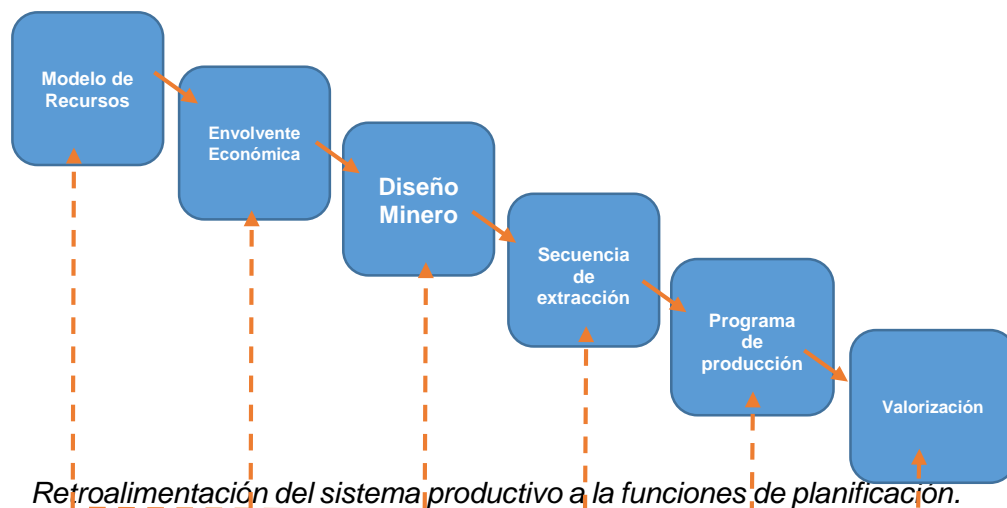


Figura 4: Proceso de Planificación Minera

## 2.1.2. Horizontes de planificación

Dentro de la planificación es posible definir diferentes horizontes de tiempo correspondientes a la evaluación a realizar, siendo por tanto una herramienta que permite tratar la incertidumbre dentro del proceso minero. Es posible definir tres clasificaciones que ayudan a resolver el problema:

- **Planificación largo plazo:** Corresponde a aquella planificación que se hace a nivel macro de la operación minera. Se dimensiona el tamaño y la posible vida de la mina. A partir de las reservas mineras se evalúa el método de explotación, ritmos de extracción y posibles secuencias a seguir. Su escala de tiempo corresponde a periodos de años.
- **Planificación mediano plazo:** Se encarga de sustentar lo planteado en el largo plazo, analizando los procesos con mayor precisión y detalle. Se elaboran planes de producción que permiten conducir las actividades de operación mineras hacia metas de producción definidas. Su escala de tiempo de evaluación suele ser de meses hasta un par de años.
- **Planificación corto plazo:** Tiene por finalidad recopilar la información operacional de manera de generar planes a partir de ésta, es así como se evalúa a partir de los recursos existentes en la mina. Intenta corregir los factores que fueron contemplados en planificaciones anteriores de manera de entregar la evaluación que se ajuste de mejor manera a la condiciones realista del proceso. Su escala de tiempo de evaluación suele ser de días a un par de meses.

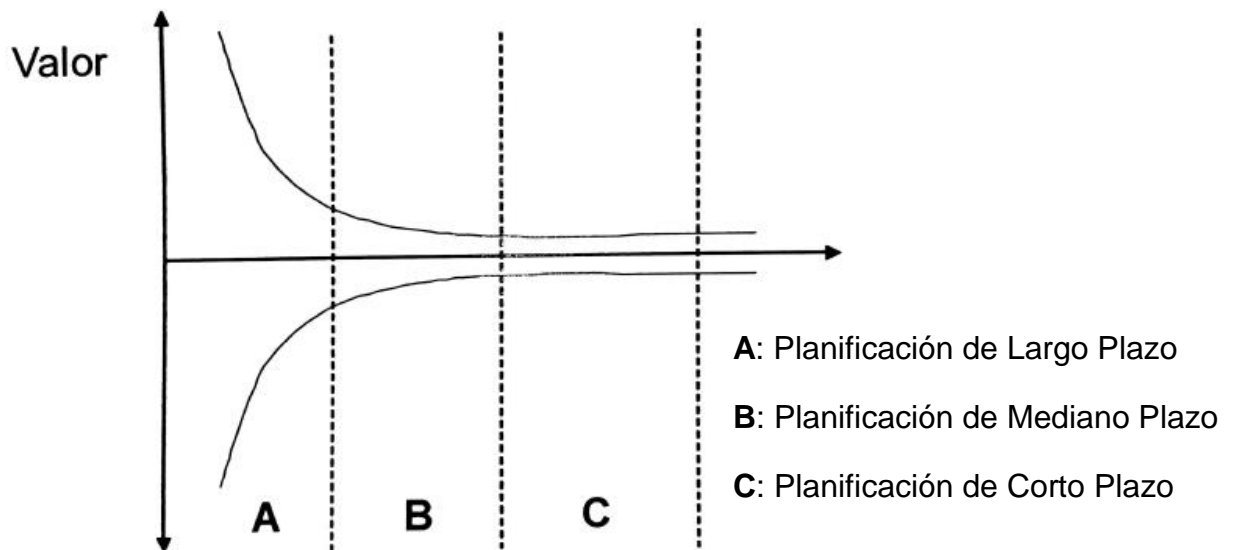


Figura 5: Horizontes de planificación y agregado de valor (Rubio, 2007).



### 2.1.3. Plan de producción

Como resultado de la planificación minera es posible obtener un agendamiento de la extracción del material en los diversos periodos del negocio minero. Elaborar el plan de producción permite cuantificar los recursos humanos y materiales necesarios para la ejecución del plan.

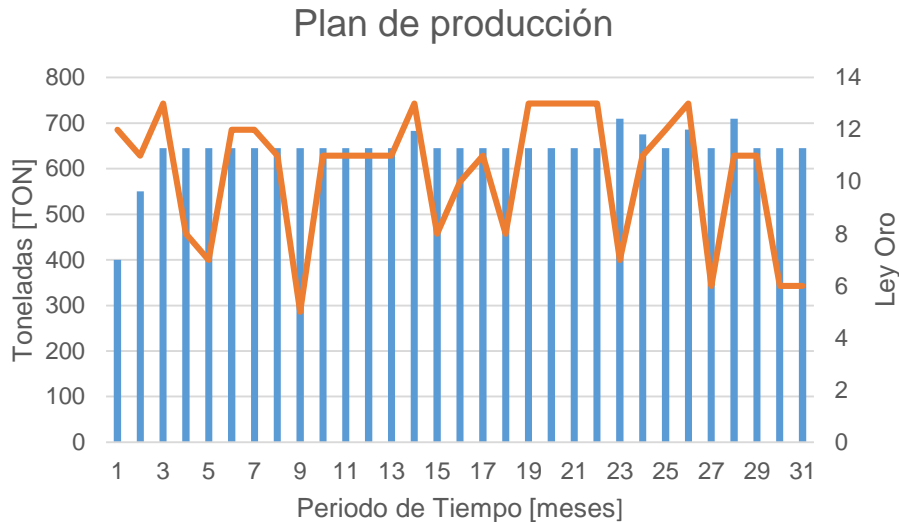


Figura 6: Ejemplo plan de producción.

Los planes de producción están principalmente relacionados a la elaboración de planes de mediano a largo plazo, donde se hace responsable de establecer los lineamientos a seguir para los periodos futuros, en los que muchas veces se tiene incertidumbre de las reservas presentes debido a la falta de datos medidos. Para el caso del corto plazo, se elaboran estructuras que definen tanto los recursos humanos y materiales consumidos día a día, siendo estas ajustadas a la información que se va obteniendo en la operación.

## 2.2. Selección método de explotación

El proceso minero tiene sus inicios en determinar y definir las reservas sobre las cuales se va a trabajar, a lo cual se suma comenzar a decidir cómo se extraerá el mineral presente en el yacimiento. Variadas son las técnicas para tomar esta decisión, como por ejemplo geotécnicas, económicas, distribución del mineral, etc., que llevan a los ingenieros a establecer los primeros lineamientos del proyecto. Es así como se evalúa si el yacimiento será extraído a cielo abierto donde el proceso minero queda expuesto a la superficie, donde se crea un pit y existe un alto movimiento de estéril. Si el almacenamiento de estéril es insuficiente, o las paredes del pit fallan, o cuando las condiciones del medio ambiente pesan más que el beneficio de extracción entonces se

opta por utilizar minería subterránea (Newman, Rubio, Caro, Weintraub, & Eureka, 2010, pág. 231).

Definir el método a utilizar es una etapa clave que abrirá las etapas aguas debajo del proceso, ya que de esta etapa es posible desprender la utilización de recursos necesarios, el potencial económico que tendrá el proyecto, el horizonte de tiempo en el cual se desarrollará, entre otros.

## **2.3. Minería subterránea selectiva**

La minería subterránea corresponde al proceso minero que es desarrollado bajo superficie y se accede a los distintos lugares mediante túneles de acceso. La minería subterránea es comúnmente clasificada en método autosoportados, métodos soportados o métodos de “*caving*”. Su selección depende del tamaño y de la orientación del cuerpo mineralizado, las características de la roca y las características del mineral (Newman, Rubio, Caro, Weintraub, & Eureka, 2010, pág. 232).

Dentro de los métodos autosoportados y soportados es posible clasificar la minería subterránea selectiva. Ésta corresponde a la minería realizada siguiendo la veta de mineralización, de manera de mover principalmente mineral y la menor cantidad de estéril.

Debido a la gran variedad de morfología de cuerpos mineralizados y la calidad de roca que cada uno presenta, existe una gran variedad de métodos con sus respectivas modificaciones. Para efectos del trabajo a realizar posteriormente se describe con mayor detalle el método “*Cut and fill*” y su variante el “*Bench and fill*”.

### **2.3.1. Método cut and fill**

En términos generales, el método cut and fill consiste en aquel que extrae el material dejando cavidades las que posteriormente son rellenadas con material estéril para continuar con la producción de mineral. Este relleno es requerido para darle soporte a las cavidades abiertas posteriormente producto del secuenciamiento o para ser una plataforma para los futuros trabajos mineros.

El método es posible aplicarlo a una gran variedad de situaciones, entre las cuales se menciona (Darling, 2011, p. 1365):

- Zonas de mineralización son irregulares en forma y orientación.
- Las leyes existentes son altas y el control de la dilución es crítico.
- La precisión entre contactos de mineral y estéril son estructuralmente críticas y no fácilmente visibles.
- La roca estéril es débil.
- Las zonas de mineral son largas, pero su calidad de roca débil.
- Es requerida la estabilidad localizada bajo superficie.

- El valor del mineral hace que la recuperación de los pilares de soporte sea económicamente viable.
- La reducción del almacenamiento del estéril en superficie es importante.

Este método es favorable cuando el valor del mineral y la tasa de recuperación es relativamente alta con una mínima dilución que debe ser satisfactoriamente realizada por la apertura de caserones.

El relleno del método es utilizado cuando la estabilidad de la zona lo requiera. Este es el caso cuando existen caserones largos vacíos que pueden afectar adversamente la estabilidad o la permanencia de accesos a la mina como drifts, shafts y piques. El estrés que se puede provocar puede afectar las nuevas producciones minas y la infraestructura en superficie.

Las limitaciones que presenta este tipo de método se puede mencionar:

- La disponibilidad de la suficiente cantidad de material para relleno.
- Producción, preparación, transporte, y el costo de aplicación del material de relleno.
- Almacenamiento e instalaciones que coincidan con el ciclo de la demanda minera.
- Congestión e interrupción de las actividades de la producción minera.

La principal desventaja del cut and fill es la adición de costo de producción, preparación, transporte y el emplazamiento del relleno. En adición al alto costo agregado por el relleno, su operativización puede resultar una congestión, mantenimiento y problemas de limpieza subterráneo.

El método impone limitaciones en la secuencia y en los tiempos de producción, que si no son controlados cuidadosamente puede considerar precedencias por sobre la maximización de la ley.

### **2.3.1.1. Criterios de selección del método**

De acuerdo a Darling (Darling, 2011, p. 1366) es posible establecer los siguientes criterios de selección:

- **Morfología del cuerpo mineralizado:** El tamaño, la forma, la orientación, y el grado de uniformidad de los límites del cuerpo mineralizado son las primeras consideraciones en la selección de un método *cut and fill*. El uso del relleno para el soporte y el evitar la necesidad de plataformas para acceder al cuerpo mineralizado le otorgan al operador que tenga una mayor flexibilidad para el ajuste de la excavación a lo largo de los límites del cuerpo mineralizado. Métodos alternativos (que no usen relleno) pueden resultar inseguros trabajando bajo estas condiciones, dilución excesiva, o recuperación insuficiente.
- **Accesos, infraestructura y costo de desarrollo:** Es muy común, que el costo total del proyecto por accesos e infraestructura de soporte para minería *cut and fill*

es menor que el costo de método de minería masiva como el *block caving*. El costo total del proyecto es mayor, sin embargo, que el costo por *room and pillar* o *open stoping*. El uso de relleno para el soporte, más que dejar pilares de mineral sin explotar, resulta en un aumento en la recuperación del mineral porque un menor número de pilares no recuperables se queda atrás tras el término de la operación minera.

- **Susceptibilidad de la mecanización:** La mecanización de la minería del *cut and fill* se puede dividir en dos etapas: por un lado la mecanización de la extracción de mineral (es decir, el corte) y por otro la mecanización del proceso de relleno. El potencial de mecanización para la extracción de mineral mediante el método *cut and fill* varía ampliamente. Las condiciones de suelo pueden dictar que con el uso de la minería del *cut and fill* puede limitar las dimensiones de drift o, alternativamente, puede requerir flexibilidad de adaptación para la variación de las condiciones de caserón. Esto reduce el tamaño de los camiones y cargadores que pueden ser usados. Es por esto mismo, que el uso de relleno raramente permite el incremento en el nivel de mecanización.
- **Dilución:** El método *cut and fill* aumenta la tasa de extracción del cuerpo mineralizado y reduce la dilución provocada por el límite de sobreexcavación. Sin embargo, el efecto de la dilución por el relleno debe ser considerado en algún análisis económico. La dilución generalmente acarrea valor no recuperable, mientras que la sobreexcavación dentro de la misma roca puede traer al menos algún valor porque esto se puede aproximar a mineral. Dilución por relleno puede venir por los soporte del caserón donde los caserones adyacentes serán próximamente rellenos. Si el caserón en producción está sobre el caserón previamente relleno, las operaciones de desescombro típicamente tienden a eliminar una capa de material de relleno del piso para limpiar y extraer tanto mineral como sea posible. Menos relleno puede estar dado si la superficie del piso existe relleno cementado. Inversamente, mineral puede ser perdido in el piso de un caserón si el mineral es usado para construir una calzada en la parte superior del relleno. El mineral fino, que por lo general contiene una porción significativa del valor, puede ser perdido dentro del relleno cuando el corte del relleno no está bien consolidado como debiera. El potencial de dilución de varios materiales de relleno puede diferir significativamente. Roca no cementada y rellena de arena típicamente diluye a una mayor tasa. Dilución es usualmente menor con roca cementada, arena, y pasta de relleno. Sin embargo, la dilución en presencia de agentes cementados puede tener un efecto adverso en la planta metalúrgica. Estas diferencias en el comportamiento debe ser incluida cuando se evalúa el costo relativo de usa el material de relleno en operaciones mineras.
- **Restricciones geotécnicas:** En el entorno geotécnico in situ- incluyendo la calidad de la roca de mineral y la roca caja, estructuras geológicas, profundidad del cuerpo mineralizado, agua, y región de estrés- determinan el tamaño y la forma que deben tener los caserones que pueden ser excavados antes de rellenar. El

soporte de la tierra requerido para proveer un trabajo seguro en el ambiente está dictado por las situaciones geotécnicas. El método *cut and fill* frecuentemente se confía iniciar el método por caserones en zonas virginales de la mineralización. Estos caserones son llamados “caserones primarios”. Ellos son consecuencia del relleno realizado como soporte para el proceso minero de caserones adyacentes, que son llamados “caserones secundarios”. El tamaño, forma, y secuencia de minado de los caserones primarios y secundarios son determinados por las condiciones geotécnicas del mineral y la roca caja y las propiedades mecánicas del material de relleno planificado. A veces esto es ventajoso colocar mayor esfuerzo, mayor costo de relleno en caserones primarios y bajar esfuerzos, menor costo de relleno en caserones secundarios. La flexibilidad del control y la diferenciación de la calidad del relleno y las propiedades acorde a la aplicación es crucial para la operación minera, la seguridad y el control de costo.

- **Disponibilidad de material de relleno:** La disponibilidad del material de relleno (roca, arena o pasta) afectan la selección del método *cut and fill*. La cantidad, propiedad ingenieriles, y el costo deben ser considerados en el plan. La combinación más segura y menos cara de material de relleno y el método *cut and fill* debe ser encontrado y revisado continuamente.

#### **2.3.1.2. Caserones con relleno no cementado**

El uso de caserones con relleno no cementado tiene ventajas de eliminar el costo por cemento. El relleno no cementado tiene limitaciones cuando se usa material de relleno primario porque carece del refuerzo que proporciona el cemento.

Usualmente, la minería de caserones con relleno no cementado tiene la ventaja de ser usada con mucha facilidad y con lo barato que resulta ser el material. Frecuentemente, la roca estéril que fue desechada puede ser usada. Esto alivia en parte el costo de transportar el material estéril a superficie. Alternativamente, la roca puede ser requerida en la superficie y liberada hacia los caserones subterráneos a través pozos o piques de traspaso.

##### **2.3.1.2.1. Bench and Fill**

Corresponde a un método muy versátil y puede ser adaptado a la forma del cuerpo mineral. Con algunas excepciones, todo el mineral es removido vía “drifting”, luego de creados los “drift” son rellenos. Como resultado, se tiene un método de alto costo comparado con los otros métodos. Por otro lado, la recuperación es alta y la dilución es generalmente baja. Este método es apropiado para la extracción de yacimientos con cuerpo mineral de alta ley (A. Hustrulid & L. Bullock, 2001, pág. 37). El método es aplicado a caserones verticales y relativamente verticales que tienen el suficiente ancho, largo y la competencia de la roca de pared que permita al sistema de la retirada del material barrenado para avanzar al relleno con estéril. Este método permite variaciones en la colocación del relleno. La cantidad de roca estéril expuesta entre la tronadura y la basura del mineral, y el avance cara al relleno de estéril, puede ser ajustada de acuerdo a las

condiciones locales. En algunos casos, el relleno estéril se avanza tal que todos los espacios abiertos son completamente eliminados. Esta falta de sectores abiertos soporta mejor para paredes colgantes y condiciones de piso, esto reduce la dilución y la pérdida de mineral. El uso de relleno cementado con respecto al uso del relleno no cementado puede aumentar la recuperación (Darling, 2011, p. 1371).

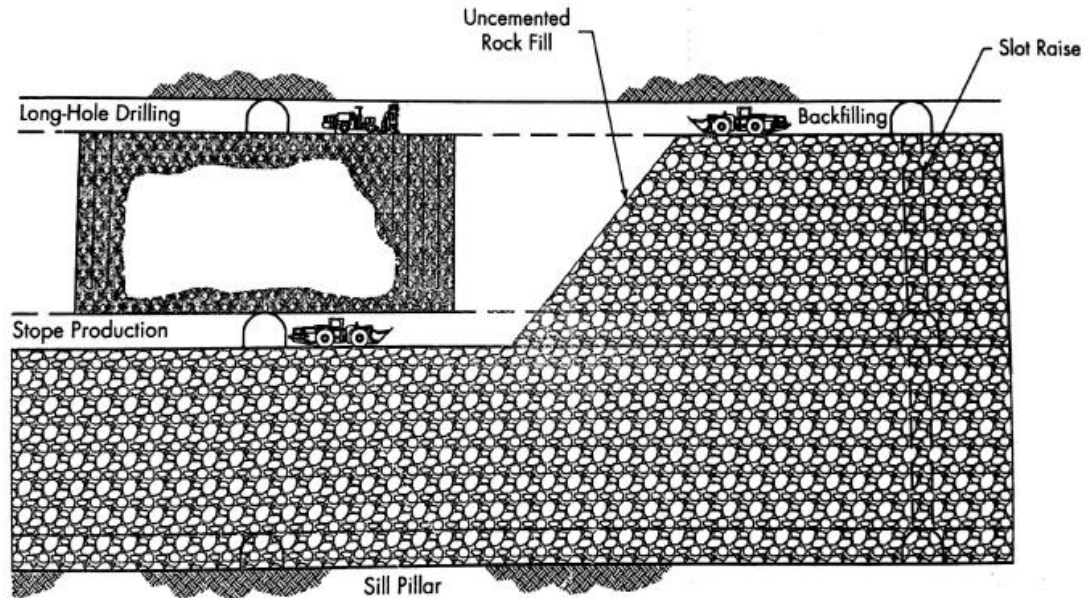


Figura 7: Esquema método Bench and Fill (Darling, 2011).

## 2.4. Parámetros geomecánicos

Como se menciona en las secciones anteriores, los parámetros geotécnicos son información de gran importancia a la hora de decidir el método a utilizar y la posterior planificación que se va a realizar. Para el caso de la minería subterránea cobra aun mayor relevancia debido a su influencia en aspectos como la fortificación y la dilución en el proceso de extracción. A continuación se entrega un detalle correspondiente a la definición de dilución y estimación a través del ELOS mediante diferentes autores.

### 2.4.1. Definición de dilución

La dilución puede ser entendida como un indicador de eficiencia minera, definida como la proporción de material estéril ingresado al proceso minero, es por esto que no puede ser una medida exagerada porque representa de alguna forma la eficiencia minera (Mah, 1992, pág. 19). En general la dilución se define como la reducción de la ley. Varios estudios tienen identificado que la dilución puede ocurrir en diferentes etapas del proceso minero (por ejemplo: exploración, minería, procesamiento).

La dilución puede ser entendida en dos partes: la dilución planificada y la no planificada (Scoble & Moss, 1994).

- **Dilución planificada:** La dilución planificada se refiere al material estéril que es inherente a la selección del método. En efecto, el grado de dilución es directamente relacionado a la selectividad del método minero. Adicionalmente, la dilución es influenciada por la complejidad del cuerpo mineralizado. Estos factores, en general, son aceptados como inmutables consecuencias de la minería. Esta dilución forma parte de la planificación minera.
- **Dilución no planificada:** En la Figura 8: Dilución Planificada y No Planificada se muestra como el material estéril extraído que no corresponde a mineral, ya sea roca o relleno, que proviene desde las afueras de los márgenes del diseño. El control de la dilución está dado por variación de parámetros de diseño, agendamiento minera y la combinación de ambos. Por ejemplo, la tronadura inducida a la sobreexcavación, las cavidades (debido a la roca caja, estrés inducido por la minería, o por el tiempo) y el relleno son ejemplo de etapas en el proceso minero que se podrían mejorar para evitar una mayor dilución.

Dado el costo que puede tener la dilución en la producción, la posibilidad de estimar la magnitud de la dilución no planificada permite diseñar caserones con un nivel de incertidumbre mayor en relación a su estabilidad, lo cual también se ve reflejado en el nivel de incertidumbre que se refleja en los planes. El tener un mayor conocimiento de la dilución presente en el proceso minero, en particular para la minería subterránea selectiva, permite definir de mejor manera los costos asociados a la tolerancia de la dilución para el sistema minero, manteniendo la sensibilidad entre la recuperación y la dilución para la valorización de las operaciones mineras.

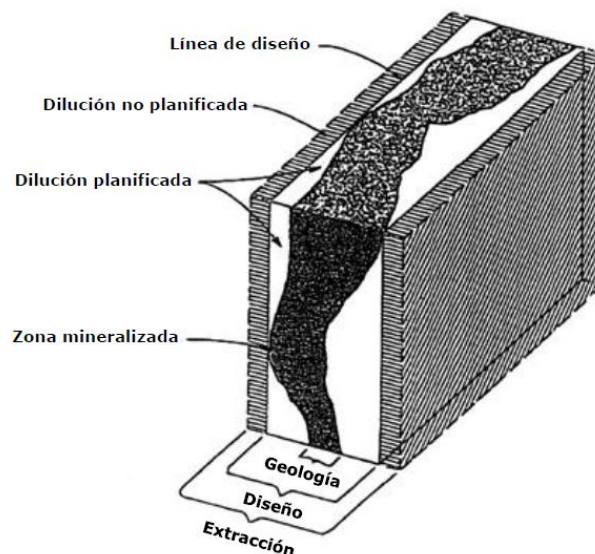


Figura 8: Dilución Planificada y No Planificada (Scoble & Moss, 1994)

Existen varios métodos para calcular la dilución existente. Es por esto que se debe ser cuidadoso a la hora de comparar diferentes operaciones. Scoble y Moss (Scoble & Moss, 1994) señalan los dos métodos más comunes basados en el tonelaje:

$$Dilución = \frac{Tonelaje\ de\ estéril}{Tonelaje\ de\ Mineral}$$

Ecuación 1: Expresión Dilución-método 1 (Scoble & Moss, 1994).

$$Dilución = \frac{Tonelaje\ de\ estéril}{Tonelaje\ de\ Mineral + Tonelaje\ de\ Estéril}$$

Ecuación 2: Expresión Dilución- método 2 (Scoble & Moss, 1994).

#### 2.4.2. Factores condicionantes de la dilución

La dilución está directamente ligada con las condiciones geomecánicas a las cuales se encuentra expuesta la excavación en estudio (por ejemplo caserón), además de otros factores que pueden influenciarlos. De acuerdo a Kazakidis (Kazakidis & Scoble, 2003) estos factores pueden ser:

- Exploración de terminación del mineral,
- Diseño general de la mina y diseño de detalle,
- Minería ,perforación, tronadura, barro y relleno,
- Cuantificación del rendimiento del caserón y las mejoras en el diseño.

A su vez otros autores a partir de estudios de casos históricos o mediante modelamiento numérico de distintos casos representativos (Mah, 1992), han concluido que la cantidad de dilución por sobreexcavación observada y medida está condicionada por cinco aspectos fundamentales:

- a. **Altura del caserón:** se asocia con la desviación excesiva de los tiros de producción conforme se aumenta la distancia de perforación como también a la estabilidad del macizo rocoso a medida que se aumenta la altura y con esto la luz máxima de exposición.
- b. **Angulo de inclinación de la pared colgante:** mientras más inclinada se encuentra la pared colgante, mayor será la dilución por sobreexcavación debido a la presencia de esfuerzos verticales actuando sobre el macizo circundante, y el aumento de la altura real de la pared.
- c. **Tensor de esfuerzos:** se genera una zona de relajación en la pared colgante, debido a una redistribución de los esfuerzos hacia los abutments. La literatura señala que la relajación puede causar condiciones de esfuerzo casi nulas lo que



reduce la capacidad de la excavación de autoportarse en un macizo fracturado aumentando la probabilidad de formación de grietas nuevas.

- d. **Forma y tipo de caserón:** este aspecto hace relación a las características del caserón. Henning (Henning & Mitri, 2007) ha concluido que caserones más altos que anchos presentan menor dilución que sus pares con forma más cúbica.
- e. **Secuencia de extracción:** asciendo relación a la secuencia de extracción ascendente con posterior relleno, en donde los caserones primarios, que se caracterizan por estar rodeados de roca competente presentan índices de dilución menores que los caserones terciarios que se rodean de pilares compuestos de relleno cementado.

### 2.4.3. Descripción del parámetro radio hidráulico

El radio hidráulico (HR) es un parámetro tomado a partir de la dinámica de fluidos donde es usado para relacionar el flujo del fluido que pasa de tuberías cuadradas a tuberías circulares. En mecánica de rocas, se refiere al factor de forma y es usado para la comparación de varias formas de excavación, ya que representa la distancia de soporte de estructuras para el centro de una cavidad (Milne, 1997).

Su cálculo se determina de acuerdo a la siguiente expresión:

$$HR = \frac{\text{Área superficie caserón [m}^2\text{]}}{\text{Perímetro superficie caserón [m]}} = \frac{(a * b)}{2 * a + 2 * b}$$

**Ecuación 3: Cálculo radio hidráulico (Potvin, 1988).**

El radio hidráulico cuenta el efecto del tamaño y la forma de la superficie de los caserones. Como el radio extendido en superficie incrementa más allá de 4:1, el radio hidráulico se mantiene relativamente constante. Éste corresponde a la forma más estable (largo y ancho) para el caserón planificado en una determinada área (Potvin, 1988).

### 2.4.4. Número de estabilidad modificado (N')

Cuando se realiza análisis de estabilidad, dos parámetros son desarrollados. El primer parámetro se define como el número de estabilidad, denominado por N. El número de estabilidad cuantifica el efecto de los factores geotécnicos que tienen mayor influencia en la estabilidad del caserón. Un alto número de estabilidad corresponde a condiciones de la tierra estables, mientras que para un bajo número de estabilidad ocurre el caso contrario. El segundo parámetro es el radio hidráulico, que fue descrito anteriormente (Potvin, 1988).

El número de estabilidad modificado (N'), que es similar al número de estabilidad (N), solo que presenta una pequeña modificación en el valor de Q, siendo ahora Q', se calcula con la siguiente fórmula:

$$N' = Q' * \text{Factor A} * \text{Factor B} * \text{Factor C}$$

**Ecuación 4: Cálculo número de estabilidad modificado (Potvin, 1988).**

Q' es una modificación de la clasificación de la calidad de roca NGI. Éste caracteriza la competencia de la roca por el uso de cinco de los seis parámetros utilizados en la clasificación NGI de Barton.

$$Q' = \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} * J_w$$

**Ecuación 5: Cálculo Q de Barton modificado (Potvin, 1988).**

La reducción del factor SRF propuesto en la clasificación NGI no está incluida porque está basado en casos históricos de túneles y no representa efectivamente el efecto del estrés en cavidades de caserones.

El factor A reemplaza al SRF en la clasificación original de la calidad de roca de NGI con mayor precisión cuantifica el efecto de la acción del estrés expuesto en la superficie de los caserones abiertos. El factor B considera la orientación de las estructuras geológicas intersectadas persistente en la superficie del caserón bajo análisis. Dependiendo de la orientación relativa de las estructuras con respecto al plano investigado, el factor B reflejará favorable o desfavorable casos. Finalmente el factor C corresponde al factor que representa la inclinación con respecto a la superficie. Este factor describe el incremento potencial de la inestabilidad cuando la superficie se vuelve más horizontal.

El valor de cada uno de ellos se determina mediante gráficos, los cuales se encuentran en Anexo A: Factores geomecánicos.

#### **2.4.5. Equivalent Linear Overbreak/Slough (ELOS)**

La información proporcionada por los instrumentos CMS (Cavity Moniyor System), los cuales son capaces de realizar una representación de la cavidad existente, entrega un perfil de malla en tres dimensiones de la extracción de material bajo la superficie. Inicialmente, el análisis puede comenzar por la comparación del perfil de la actual cavidad con las correspondientes dimensiones de diseño. El simple test entregará una indicación de las condiciones de la pared in situ. Áreas de la pared que se dejan desprender se identifican fácilmente evaluando el daño por tronadura o por la desviación de tiros. De este test es posible obtener la relación total de lo que se desprende de la pared, esto mediante la utilización de un parámetro lineal el cual es una relación entre la sobreexcavación/desprendimiento (ELOS) medido sobre el promedio de la pared del caserón (Mah, 1992).

El término ELOS fue oficialmente introducido por Clark y Pakalnis (Clark & Pakalnis, 1997) para representar a la dilución en términos de una densidad lineal de

sobreexcavación. Este término uniformiza el volumen total de sobreexcavación de una pared a lo largo de toda la extensión de su área, como se muestra en la Figura 9.

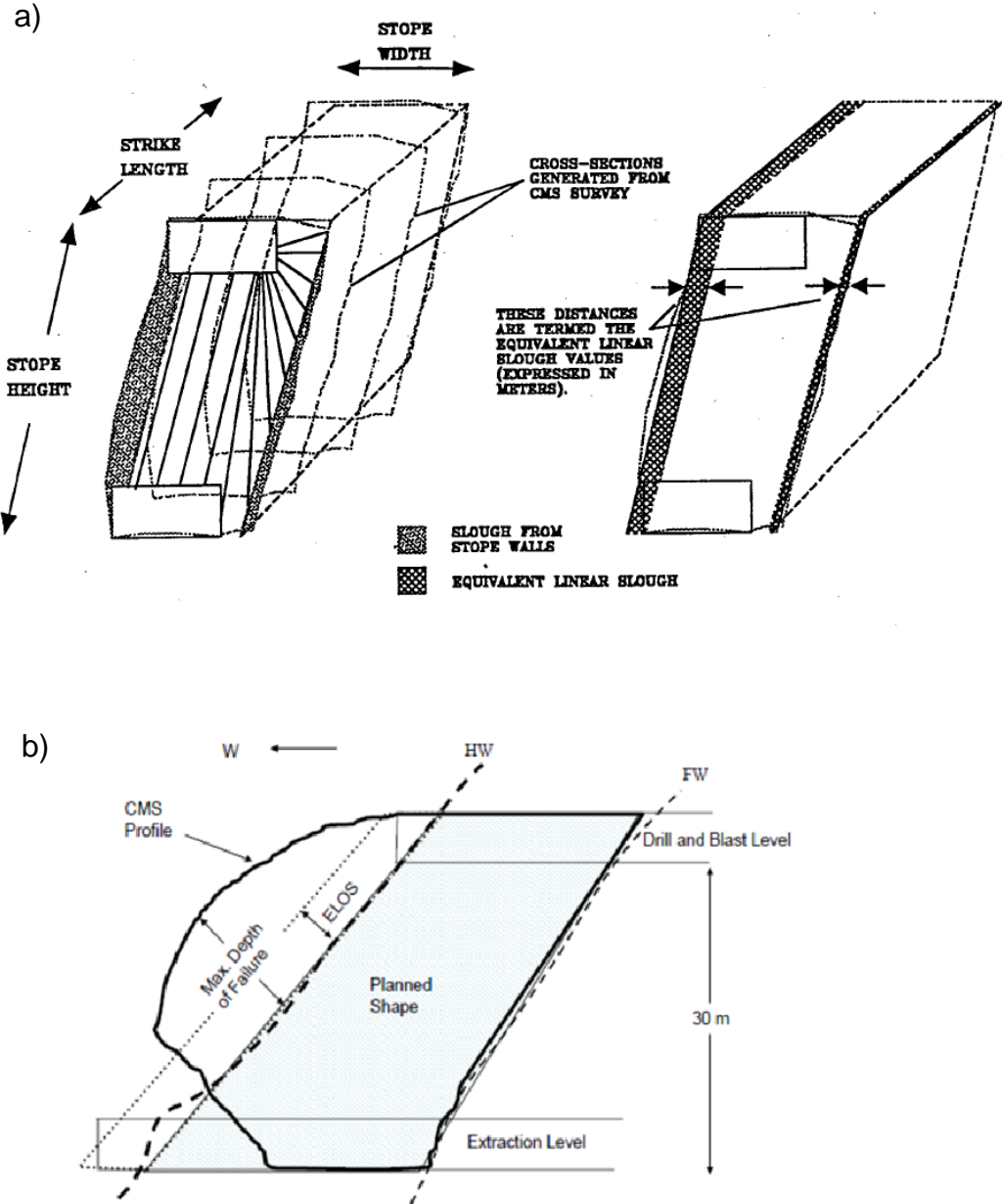


Figura 9: a) Explicación gráfica tridimensional ELOS (Mah, 1992). b) Sección transversar de ELOS (Capes, 2009).

De esta forma, es posible obtener la siguiente relación:

$$ELOS[m] = \frac{\text{Volumen de sobreexcavación de la pared [m}^3]}{\text{Área de la pared [m}^2]}$$

**Ecuación 6: Fórmula cálculo de ELOS [m] (Henning & Mitri, 2007).**

El atractivo de utilizar el concepto de ELOS es que su significado desde el punto de vista de dilución es fácilmente evidente y se puede expresar de la siguiente manera:

$$\text{Dilución [\%]} = \frac{ELOS [m]}{\text{Ancho de mineral [m]}}$$

**Ecuación 7: Dilución en base porcentual a partir de ELOS[m] (Mah, 1992).**

La definición de dilución de esta manera incorpora la variabilidad de anchuras de mineral con lo que es un método universal y aplicable a distintas operaciones mineras.

## **2.4.6. Guías de estimación de sobreexcavación (ELOS)**

En la literatura existe una variedad amplia de metodologías de estimación de dilución por sobreexcavación las cuales se basan en la estimación mediante la obtención de datos de gráficos y análisis empíricos. Estas metodologías fueron obtenidas mediante el análisis de casos de estudios y se establecieron criterios comunes que determinaron tales gráficos. La diferencia entre los gráficos y precisión de las distintas metodologías corresponde básicamente al volumen de base de datos disponibles, en donde un mayor volumen permite delimitar estadísticamente mejor las zonas de igual sobreexcavación.

Todas las metodologías basan su estimación de la ELOS como función de dos variables independientes que caracterizan la pared analizada de la excavación: el número de estabilidad (N o N') y el radio hidráulico de la pared (HR [m]).

Para el posterior estudio solo se utilizarán dos metodologías de las existentes, debido a la semejanza de resultados entregados por todas.

### **2.4.6.1. Metodología de Clark (1998)**

Clark para su metodología propuesta establece la función entre el número de estabilidad modificado de Potvin (N') y el radio hidráulico (HR [m]). La determinación de la ELOS se basa en un gráfico el cual fue confeccionado a partir de mediciones de 47 caserones de 6 minas distintas en Canadá. A partir de esta información determinó la isoprobabilidad de dilución que son usadas para estimar la sobreexcavación en caserones abiertos (Clark L. M., 1998).

Para definir las líneas que definen las zonas de división dependiendo la dilución de su grafo, Clark se basó arbitrariamente en su experiencia ingenieril y en la tendencia visual de los datos. Para respaldar de forma más precisa sus resultados realizó regresiones logísticas y redes neuronales de manera de emular de mejor forma las curvas delimitadas arbitrariamente, logrando un buen ajuste en las zonas curvas propuestas pero no se logró el mismo ajuste en toda el gráfico. A continuación en la Figura 10 es posible observar el grafico propuesto.

Dentro de las debilidades que se pueden desprender de esta metodología es posible expresar es que está construido en gran parte por el juicios del autor y no es independiente de sesgo. Junto a esto se suma que está analizado para minas de Canadá, la que no necesariamente representan las condiciones de una mina en otra región del mundo.

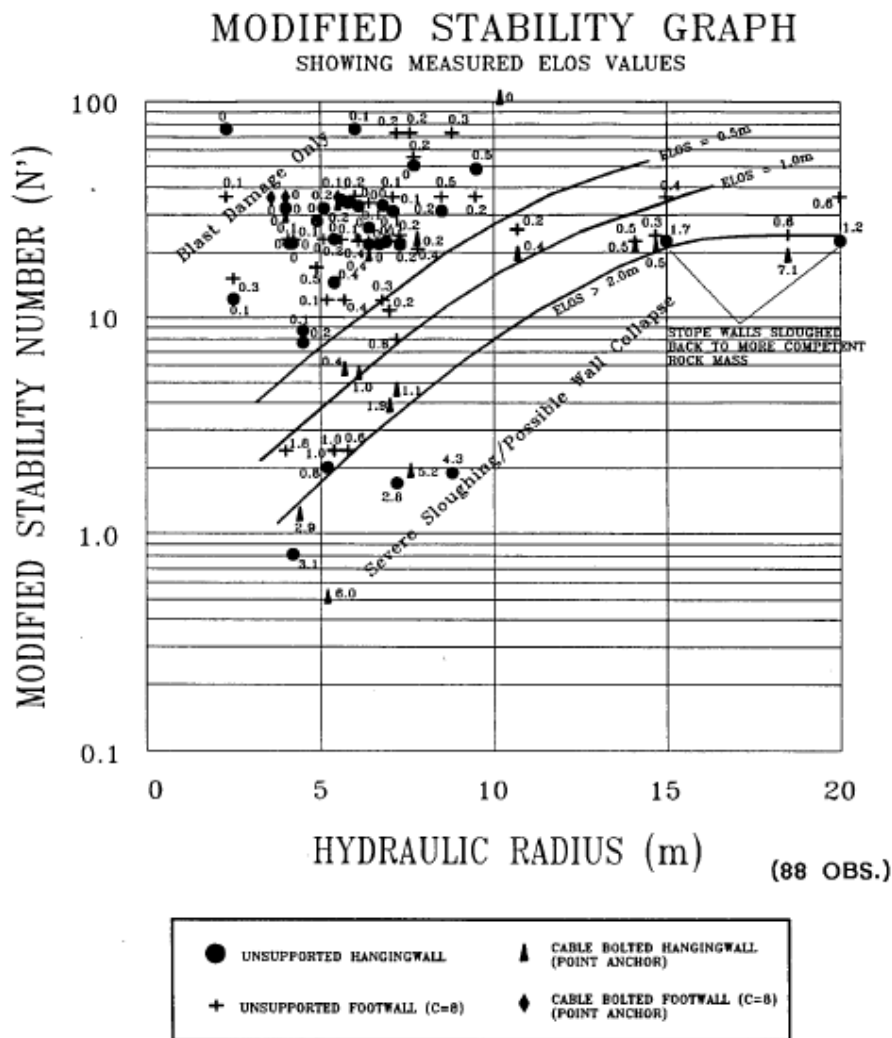


Figura 10: Guía de estimación de dilución de Clark (1998).

### 2.4.6.2. Metodología de Capes (2009)

Capes propone un gráfico de estimación de la sobreexcavación que complementa el trabajo realizado por Clark (1998). Para su elaboración nuevamente se considera el número de estabilidad de Potvin ( $N'$ ) y el radio hidráulico (HR [m]).

Las líneas obtenidas en estudios anteriores son actualizadas por Capes, incorporando en su base de datos minas de Canadá y Australia.

Para la elaboración del gráfico se utilizaron modelos de regresión logística y análisis de clasificación. De esta forma se analizó una base de datos de 225 casos de los cuales en el gráfico son representado solo el 80% dado a que presentan una mejor predicción. En la Figura 11 es posible observar el gráfico propuesto.

A diferencia de Clark, fue capaz de ingresar a su análisis minas de otros países y utilizar criterios más estadísticos para la elaboración del gráfico.

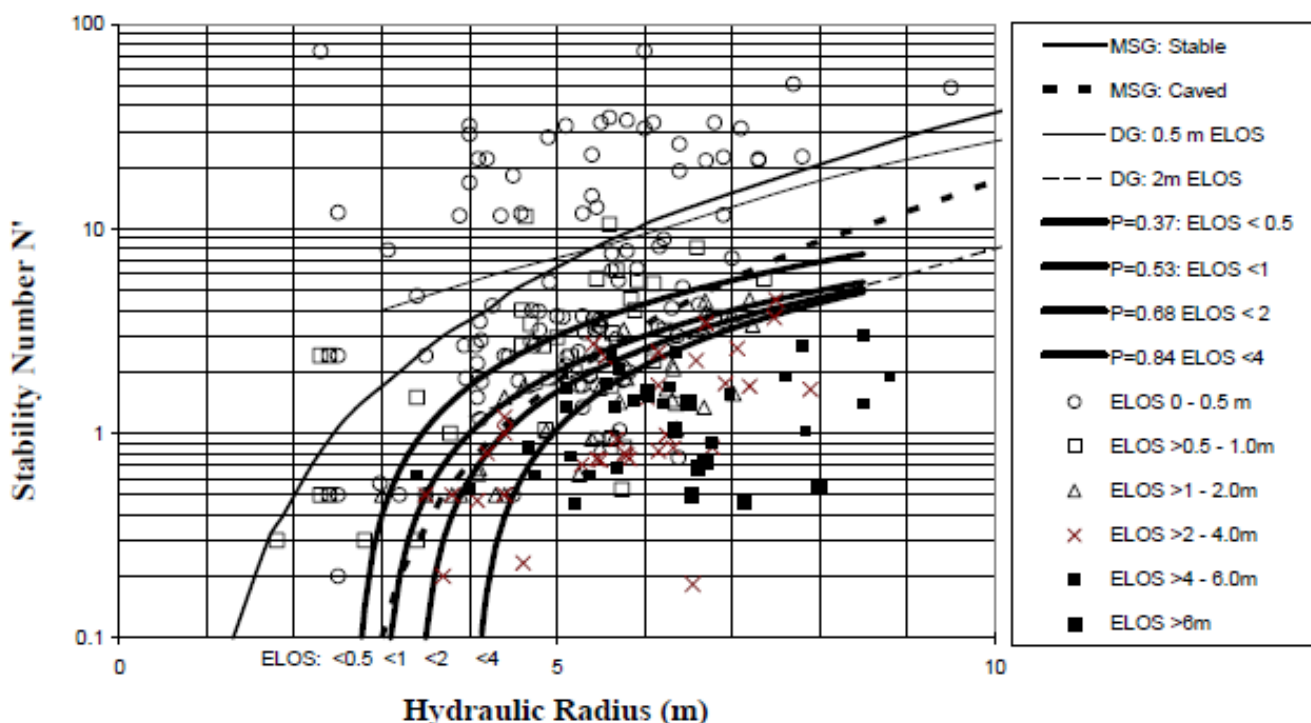


Figura 11: Guía de estimación de dilución de Capes (2009).

## 2.5. Herramientas computacionales para el desarrollo de planes de producción

### 2.5.1. Métodos de programación matemática

Llegar a un agendamiento óptimo es la meta que se tiene a la hora de realizar un plan minero, sin embargo lograrlo se vuelve bastante complejo. Los métodos de programación matemática proporcionando un medio para producir el anhelado agendamiento “óptimo”. Hoy en día se han sido utilizadas diversas técnicas de optimización para problemas de agendamiento a cielo abierto. Por ejemplo Helmut Lerchs e Ingo Grossmann en 1965 presentaron un algoritmo para encontrar el diseño óptimo para minas a cielo abierto. De acuerdo a sus palabras “el objetivo es diseñar el contorno de un pit con el fin de maximizar la diferencia entre el valor total de la mina de mineral extraído y el costo total de extracción de mineral y estéril” (Lerchs & Grossman, 1964). Ellos modelaron el problema en términos de teoría de grafos y demostraron que una solución del problema de pit final es equivalente a encontrar el cierre máximo de su modelo basado en grafos. Otro caso que vale la pena mencionar corresponde a Ramazan (Razaman, 2007) el cual propone un nuevo tipo de algoritmo llamado “Algoritmo fundamental de árbol” el cual está basado en programación lineal y agrega la producción de bloques sin violar la optimización. Su método comienza con un set de bloques combinados el cual se denomina “árbol fundamental” si estos bloques tienen las siguientes propiedades: (i) ser minado sin violar las restricciones pendiente; (ii) el valor económico total de bloques combinados en un árbol fundamental debe ser positivo; y (iii) un árbol fundamental no puede ser dividido en arboles más pequeños sin pasar a llevar (i) y (ii). Cada árbol es tratado como un bloque de mineral que tiene cierto tonelaje, contenido de metal y parámetros de calidad. Dado que las variables binarias son asignada a los arboles fundamentales en vez de los bloques, el número de variables enteras y restricciones son drásticamente menores. Sin embargo, el número de árboles de agendamiento incrementará con el tamaño del depósito.

La planificación de la producción es en general una de las más importantes áreas en que las técnicas de investigación de operaciones son aplicadas. El método de investigación de operaciones más comúnmente aplicado son los problemas de agendamiento de producción que es conocido como un problema de programación lineal (LP). Un LP consiste en un modelo de programación en una función objetivo lineal de la forma:

$$\text{Maximizar (o Minimizar) } Z = c_1x_1 + c_2x_2 + c_3x_3 + \dots + c_nx_n$$

**Ecuación 8: Función objetivo programación lineal.**

Sujeto a un set de restricciones lineales, sin pérdida de generalidad, de la siguiente forma:

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \leq b_1$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n \leq b_2$$

$$\begin{matrix} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{matrix}$$

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n \leq b_m$$

**Ecuación 9: Restricciones programación lineal.**

Y una restricción de no negatividad:

$$x_1, x_2, \dots, x_n \geq 0$$

**Ecuación 10: Restricciones no negatividad programación lineal.**

En esta formulación  $Z$  es el valor de la función objetivo (por ejemplo beneficio o costo),  $x_j$  son las variables de decisión,  $a_{ij}$  y  $c_j$  son constantes que sus valores son determinados por la naturaleza del problema y  $b_i$  es el valor constante del lado derecho de la cantidad de recursos disponibles  $i$ .

En ciertas situaciones, las variables de decisión deben ser asumidas como valor entero. Cuando se agrega esta restricción al problema, el modelo es llamado Programación Entera (IP). Cuando uno se refiere específicamente a situaciones donde es necesario el uso de variables enteras estas son utilizadas de manera de capturar si/no como decisión tales como si o no explotar el mineral de un bloque particular, dado el bloque en un determinado tiempo. En los modelos donde se permite que los valores de algunas variables sean continuo, mientras que otros se asumen valores enteros, entonces el modelo resultante corresponde a una Programación Entera Mixta (MIP). La relación entre las variables puede ser lineal o no lineal. La mejor solución al problema es obtenida al maximizar o minimizar una función de las variables. Un modelo lineal de MIP es, por tanto, una representación matemática de un modelo donde todas sus restricciones son lineales y las variables pueden ser continuas o enteras (Barbaro & Ramani, 1986). La estructura matemática general de un MIP con  $M$  restricciones y  $N$  variables puede ser expresado de la siguiente manera:

$$\text{Optimizar: } Z = \sum c_j x_j$$

**Ecuación 11: Función objetivo MIP.**



Sujeto a:

$$\sum_j a_{ij}x_j \leq b_i, \quad i = 1,2,3 \dots, M$$

$$x_j \geq 0, \quad j = 1,2,3 \dots N$$

$$x_j \geq 0 \text{ o } 1, \quad \text{para algunos } j$$

**Ecuación 12: Restricciones MIP.**

Donde  $c_j$ ,  $b_i$  y  $a_{ij}$  son coeficientes conocidos y  $x_j$  variables desconocidas.

Modelos de programación entera mixta se reconocen por tener un potencial importante para la optimización del agendamiento y producción de minas subterráneas y superficiales, sin embargo el estudio hasta ahora ha sido limitado. Los tiempos de solución de problemas solucionados mediante MIP dependen principalmente del número de variables enteras y también en el número de restricciones en el modelo. El gran número de variables enteras requiere resultados para la formulación del modelo en un tiempo que pueda ser aceptable para propósitos prácticos de planificación (Karzulovic & Alfaro, 2004, pág. 441). El tiempo de solución de MIP aumenta a menudo exponencialmente a medida que el número de variables de enteros aumenta (Topal, 2008).

### **2.5.1.1. Programación del agendamiento para minería subterránea**

#### **2.5.1.1.1. Estudios realizados**

Al pasar de los años se han hecho diversas evaluaciones para encontrar la mejor solución al problema de la optimalidad los planes de producción para minería subterránea. Diversos autores han planteado sus estudios de manera de resolver de manera más eficiente el problema. Por ejemplo, Trout (1995) (Trout, 1995) formuló e intentó resolver el problema de multi-periodos mediante modelo de programación entera mixta para operaciones de metales base mediante minería subterránea. El modelo presentado entregó mejores resultados de los que se podían obtener a esa fecha, sin embargo el tiempo de resolución superó las 200 horas y sin ninguna garantía de optimalidad.

Por otro lado Carlyle (Carlyle & Eaves, 2001) utilizó un modelo de programación entera para planificación el agendamiento de producción de una mina sublevel stoping en Stillwater (USA). El modelo proporcionó soluciones casi óptimas para un periodo de planificación de 10 trimestres, maximizando los ingresos de mineras de platino y paladio. Si bien garantizaron la entrega de soluciones óptimas los autores no se refieren a técnicas especiales para acelerar el tiempo de solución.

Mclsaac (Mclsaac, 2005) formuló la programación de un yacimiento polimetálico de forma vetada extraído mediante minería subterránea utilizando MIP. El depósito se divide en once zonas y se evaluaron periodos de tiempos trimestrales regulares. El modelo se resolvió en 30 minutos con 1200 variables (no se especifica el número de variables enteras) utilizando Microsoft Excel (usando como solucionador Xpress de Frontline<sup>1</sup>). Aunque el tamaño del modelo y la complejidad se redujeron limitando el número de variables y se evaluaron las zonas por periodos trimestrales, no hay ningún método disponible para aumentar la eficiencia de la solución del modelo MIP.

Topal (Kutcha, Newman, & Topal, 2003) genera un modelo de largo plazo mediante el método MIP para la programación de la producción de una mina sub level caving (aplicándolo con éxito a la Mina Kiruna). El modelo determina que la sección de mineral y establece por donde comenzar la extracción de manera de minimizar la desviación de los volumen de producción previstas, respetándose las restricciones de disponibilidad de equipos y geotecnia.

#### **2.5.1.1.2. Herramientas comerciales disponibles**

Junto con presentar resolución del problema a través de modelos matemáticos también se han creado herramientas computacionales más desarrolladas (software) que señalan resolver el problema en forma optimizada. Así es posible mencionar los siguientes productos:

##### ➤ **MineMax:**

MineMax (MineMax, 2006) el cual es un software que entrega soluciones a problemas de planificación minera y agendamiento generando planes prácticos y económicamente óptimos que ayuden a lograr los requisitos de producción, maximizando la utilización de recursos y optimizando el valor del negocio. Cubre diversas gamas de requisitos ya sean de planificación estratégica u operacional. Así se puede resolver de acuerdo a requerimientos de: optimización de pit, estrategia de planificación, planificación operacional y colaboración en la planificación mina y agendamiento.

- **Planificación operacional:** Se comienza por componer un agendamiento de largo plazo, el que posteriormente se programará para corto plazo. Se introducen las restricciones asociadas con el desarrollo, la minería, el manejo de materiales y la elaboración. Sin embargo, el corto plazo involucra limitaciones de capacidad asociados a equipos individuales a cargar. Se utiliza como base el calendario de largo plazo el cual fue optimizado en base a su VPN (Valor Presente Neto). Para el corto plazo se alinean ambos planes para maximizar agendamiento y minimizar el valor de la pérdida de valor estratégico. Se ofrecen dos opciones de soluciones: **iGantt** la cual es la solución original y proporciona un enfoque de visualización grafica de la carta Gantt en 3D y por otro lado **Tempo**<sup>2</sup> el cual traduce los planes de largo plazo en planes prácticos y óptimos de corto plazo, calculando

---

<sup>1</sup> Corresponde a un optimizador que se enlaza a "Solver" que ofrece Microsoft Excel.

<sup>2</sup> **Tempo**® corresponde a un optimizador de Planificación Minera con alineación espacial. (MineMax, 2006)

automáticamente el cumplimiento del plan y ayudando con el análisis entre la producción real y la producción planificada en corto plazo.

Capacidades	iGantt	Tempo®
Manual de agendamiento de corto plazo y asignación de recursos	✓	✓
Especialización auto-agendamiento de recursos subterráneos		✓
Visualización 3D y animación de resultados del agendamiento	✓	✓
Movilidad del agendamiento en 3D	✓	✓
Colaboración multiusuario con y a través de otros sitios mineros	✓	
Medición del cumplimiento del plan minero	✓	

Tabla 2: Comparación entre iGantt y Tempo.

- **Colaboración en la planificación mina y agendamiento:** en minas de mediano a gran tamaño existe una desviación significativa del plan de largo plazo en relación a lo que ocurre operacionalmente, lo que puede conducir a una reducción de la vida de la mina, incapacidad para satisfacer las demandas de producciones futuras, aumento de riesgos operativos y grandes pérdidas económicas. Con la ayuda de **Tempo®** es posible generar un entorno colaborativo en donde los planificadores, gerente, u operadores pueden interactuar fácilmente con las modificaciones del plan. Además es posible integrar otras aplicaciones que permiten tener mayor precisión de los datos que se van modificando. Por último, la herramienta es capaz de medir u optimizar el cumplimiento del plan real y la alineación con el plan creado. Va desde la medida de tonelaje-ley básica hasta el cumplimiento espacial entre planes.

Si bien la herramienta parece ser una buena solución al problema que se plantea presenta como desventaja el que no es capaz de resolver problema de gran tamaño debido a la gran cantidad de variables enteras y restricciones necesarias. Además muchas veces es necesario el bloqueo de la base de datos, lo que genera algunas fallas en algunos resultados debido a la aproximación de los datos.

➤ **Mine2-4D de CAE:**

Mine2-4D corresponde a una herramienta que proporciona un flujo de trabajo estructurado para ayudar al ingeniero a pasar el proyecto desde el diseño a un programa de actividades. La integración del entorno de diseño 3D tipo CAD, la programación de la Carta Gantt, las animaciones en 3D y 2D es automatizada, por tanto fáciles de comunicar. El uso extensivo de la automatización permite evaluar un número mayor de escenarios

para ser investigados, dando una mayor confianza en el rango probable de los resultados para su proyecto minero. Esta corresponde a una gran ventaja del software pues es el único software existente de manera comercial que incluye la infraestructura minera subterránea dentro de un programa de producción. La desventaja de la herramienta se centra en que no se trata de un optimizador, pues no es posible determinar la secuencia de producción que entregue el mayor valor posible sino que representará lo que el planificador o usuario tenga por interés, es decir, se le debe entregar gráficamente la secuencia de actividades y posteriormente el software nivelará el programa e acuerdo a los recursos o restricciones disponibles.

Esta versión ha sufrido mejores y comercialmente hoy existe CAE Studio 5D Planner<sup>3</sup>, el cual es una herramienta muy similar a Mine2-4D sin embargo tiene como mejoras que es posible generar múltiples calendarios los cuales se pueden aplicar tanto a recursos como actividades, programando el cierre o definiendo periodo no laborales. Los recursos pueden ser equipos o labores y se pueden asignar a actividades mineras. Es posible tener una nivelación de recursos lo que permite la creación de un programa basado en los recursos donde la tasa de avance y de producción son dictadas por la disponibilidad de recursos y por la prioridad de los trabajos. Además las actividades pueden ser impulsadas en cierto periodo teniendo una duración definida o ser descritas como cíclicas, donde cada una tengas sus propios recursos. Si bien CAE cuenta con herramienta como *The Minerable Shape Optimizer* (MSO) que es capaz de realizar diseños optimizados de caserones, donde se optimice el valor del mineral recuperados dentro de la geometría y restricciones de diseño y con *Mining's Mine Layout Optimizer* (MLO) que optimiza la disminución de requisitos de accesos satisfactorios en base a criterios de diseño, aún no es capaz de implementar la herramienta que permita generar el agendamiento en base una solución óptima del problema.

➤ **Deswik<sup>4</sup>:**

A partir de gráficos interactivos mediante diagramas de red, Deswik está adaptado a las necesidades de los planificadores mineros. Abarca en su resolución velocidad y duración en base a programación, manejando fácilmente un número masivo de datos estableciendo planificaciones detalladas según se requiera. Integra en su evaluación la producción y las actividades auxiliares con facilidad. Está construido en base a un motor de nivelación de recursos, estableciendo prioridades y limitaciones en base a los objetivos diseñados para reflejar las necesidades de la operación real. No presenta restricciones de horizontes de tiempo de evaluación, pudiendo interactuar entre distintos periodos. Además es posible acceder al conjunto completo de las opciones mediante informes flexibles, pudiéndose realizar análisis de rutas críticas detalladas. Posee una amplia cantidad de complementos como Deswik.CAD que ayudan a tener una visualización 3D de la operación y Deswik.UGM que proporciona a los planificadores

---

<sup>3</sup> Información disponible en: <http://www.cae.com/mining/software/underground-planning-solution/>

<sup>4</sup> Información disponible es: <https://deswik.com/product-detail/deswik-scheduler/>

hacer más eficaz y detallado el proceso e impulsando el valor de planificación realizada. En su descripción no se entregan mayores detalles de optimalidad de la solución.

## 2.5.2. Formulación modelo planteado

Para el siguiente trabajo se plantea la elaboración de planes de producción y agendamiento mediante una herramienta computacional que resuelve el problema a través de programación entera mixta. A continuación se describen los detalles de la formulación implementada en la herramienta.

En primer lugar se define en conjunto de periodos de tiempo el cual se denota por  $t = 1, 2, \dots, T$  donde  $T$  corresponde al horizonte de evaluación del proyecto. La duración de cada periodo  $t$  está medido en unidades de meses.

El modelo está implementado en base a actividades, las cuales corresponden a los acontecimientos a realizar durante el periodo de tiempo de evaluación para concretar el proyecto. Para el modelo planteado se define un set de actividades  $A$  en donde cada actividad  $i \in A$  posee los siguientes atributos:

1. **Tasa máxima de avance ( $v_{max i}$ ):** corresponde a la proporción máxima de la actividad que se puede realizar durante el mes.
2. **Tasa mínima de avance ( $v_{min i}$ ):** corresponde a la proporción mínima de la actividad que se puede realizar durante el mes.
3. **Costo o beneficio ( $v_i$ ):** dependiendo la actividad estas poseen un costo o beneficio por su realización, por tanto se reporta un valor por iniciar o terminar una actividad.
4. **Recursos consumidos ( $c_i^r$ ):** cada actividad consume una cantidad de recursos  $r$  en función del progreso de la actividad.
5. **Precedencias ( $P(i)$ ):** cada actividad está precedida por otras, las cuales son necesarias cumplir para realizar la siguiente actividad. En la Figura 12 es posible observar esquemáticamente las precedencias. La actividad “RELLENO” solo se puede desarrollar si la actividad “PERFO” y “BENCH” fueron realizadas anteriormente.

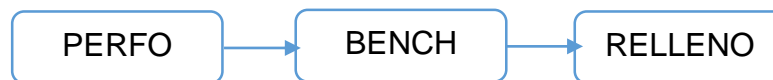


Figura 12: Esquema definición precedencia.

La finalidad de las precedencias de una actividad es darle orientación a las acciones a realizar, de acuerdo a los requerimientos propios del proceso minero. Así, se pueden dividir según dos categorías:

- a. **Precedencias físicas:** define la continuidad de los accesos y tienen relación con la accesibilidad de un lugar para poder desarrollar una actividad de extracción de caserón.
- b. **Precedencias operacionales:** definen la factibilidad de desarrollar una actividad dada las condiciones propias del sistema minero.

Existen precedencias del tipo “o” las cuales hacen relación a que basta que un solo grupo de precedencia de la actividad  $i \in A$  haya finalizado para esta pueda iniciarse la siguiente actividad. En el siguiente esquema se muestra lo señalado:

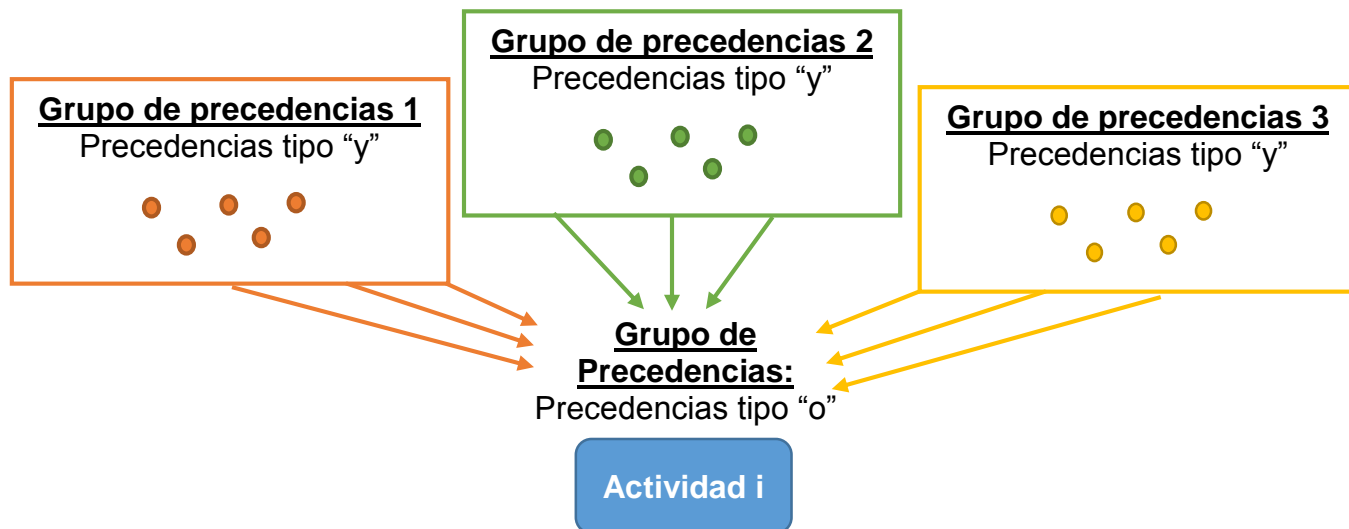


Figura 13: Restricciones de precedencias del tipo "o" (Rocher, 2012).

Dado la estructura del problema de programación lineal planteado, existen variables de decisión del tipo continuas y binarias y definen la función objetivo de acuerdo a los requerimientos solicitados. El detalle de las variables definidas, las restricciones impuestas y la función objetivo planteada se encuentra disponible en Anexo B: Formulación modelo matemático.

### 2.5.3. Gurobi

El Optimizador Gurobi es un solucionador comercial de optimización para la programación lineal (LP), programación cuadrática (QP), programación cuadrática restringida (QCP), programación lineal entera mixta (MILP), programación entera cuadrática mixta (MIQP) y programación entera cuadrática limitada (MIQCP).

Para poder realizar una evaluación en la calidad de los resultados entregados, se debe considerar el concepto de GAP de optimización en la resolución de un problema mediante Gurobi, ya que sobre éste concepto se explicará la validación de la solución. El GAP corresponde a la relación máxima entre la calidad de la solución del programa entero

y de su forma de relajación. En la Figura 14 es posible observar dos curvas que representan la variación del valor objetivo en el tiempo de resolución. Debido a que se trata de un problema de programación lineal, el modelo se describe como un set de ecuaciones lineales que a su vez se resuelven matricialmente a través de iteraciones. En tal proceso iterativo, la curva verde representa la efectiva evolución del valor objetivo, la cual parte en el origen desde cero y se comporta de manera creciente al buscar la maximización de dicho valor, siendo cada iteración una eventual mejora. Por otro lado se tiene la curva roja la cual parte desde una cota máxima de valor objetivo y decae asintóticamente acercándose a la curva de evolución del valor objetivo (curva verde) pero sin intersectarse. La curva roja corresponde a una cota máxima de resolución, la cual se va determinando al relajar el problema planteado, mediante distintas técnicas y algoritmos que poseen los solvers computacionales, para finalmente obtener un resultado aproximado rápidamente para determinar la factibilidad de la resolución. La búsqueda de factibilidad entrega un valor objetivo que decae a medida que se ejecutan las iteraciones pues se trabaja sobre un espacio de soluciones que ya ha sido reducido en una iteración anterior y por ende, ya fueron descartados algunos posibles resultados. Finalmente, el proceso determina un resultado más preciso y se detiene cuando la diferencia de valores objetivos entre dichas cotas está dentro de un cierto valor entregado como parámetro al inicio de la optimización (GAP). Por tanto, mientras menor sea el porcentaje de GAP entregado, más preciso será el resultado obtenido por el optimizador Gurobi, sin embargo el tiempo de resolución también podrá ser mayor debido a la necesidad de un mayor número de iteraciones hasta llegar al valor adecuado. Determinar un porcentaje de error admisible en optimización (GAP) es un concepto muy utilizado en el campo de resoluciones numéricas ya que de otro modo la búsqueda de un resultado exacto y preciso podría eventualmente tomar un largo de tiempo demasiado extenso siendo este no aceptable (e incluso absurdo) sin mejorar sustancialmente la solución encontrada.

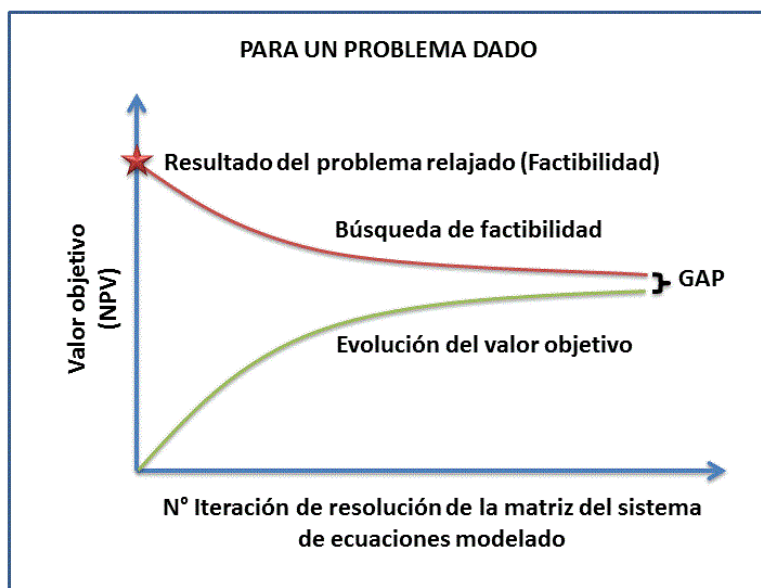


Figura 14: Resolución de solver Gurobi (Rocher, 2012).

#### 2.5.4. Implementación del modelo matemático (UDESS)

La implementación del modelo anteriormente planteado se traduce en una herramienta computacional llamada *Underground Development Sequencer and Scheduler* (UDESS) la cual fuera desarrollada plenamente en el Laboratorio de Planificación Minera, Delphos, de la Universidad de Chile, la cual fue codificada en lenguaje de programación Python v.2.6<sup>5</sup> y que utiliza Gurobi 5.6.3 como motor optimizador. La implementación ha sido codificada en PuLP, el cual corresponde a un modelador de problemas de programación lineal escrito en Python. Esta herramienta permite liberar el código de la dependencia del optimizador, pudiendo elegir entre diversas opciones presentes en el mercado tanto en solver comerciales como no comerciales (por ejemplo CPLEX, Gurobi o GLPK). En el siguiente trabajo se realizarán evaluaciones únicamente con Gurobi.

UDESS permite mediante el uso de modelamiento matemático el agendamiento y planificación de las actividades de un proceso minero a evaluar, entregando como resultado la porción de actividad realizada en cada periodo de tiempo lo que permite obtener tonelaje extraído, beneficios, leyes, u otros parámetros de interés. Lo realiza mediante la definición de actividades las que tienen establecidos atributos y están relacionadas entre sí mediante precedencias. Estas precedencias definen las opciones de secuencia a seguir en el secuenciamiento, restringidas de acuerdo a temas operacionales. Para su evaluación considera una serie de restricciones, las que están definidas de acuerdo a la evaluación que se quiera realizar por el usuario. Por lo tanto, UDESS es capaz de integrar una evaluación con un número finito de actividades, evaluadas en un periodo de tiempo definido y en base a restricciones (ya sean de capacidad u otras) que en base a una función objetivo buscan encontrar la mejor solución al problema.

Dentro de las ventajas que se puede mencionar de UDESS se encuentra su flexibilidad para abordar distintos tipos de problemas. Debido a que su planteamiento se basa en un problema de programación lineal, es posible extrapolar su formulación a distintos tipos de procesos o decisiones, en particular a distintas situaciones mineras. En el caso particular de este estudio UDESS fue aplicado para la resolución de una mina explotada mediante Bench and Fill, la cual debido a características propias del método tiene un alto número de actividades en ejecución paralelamente. Esta complejidad limita enormemente la resolución del problema y se genera la tendencia a desagregar los procesos. En el desarrollo que se verá en los siguientes capítulos, se definen cuatro actividades representativas del método que fueron evaluadas en base a distintas restricciones, buscando identificar la interacción que existe entre ellas a la hora de generar la secuencia de producción.

---

<sup>5</sup> Python es un lenguaje de programación interpretado. Es un lenguaje de programación multiparadigma ya que soporta orientación a objetos, programación imperativa y, en menor medida, programación funcional. <https://www.python.org/>



### 2.5.4.1. Archivo de entrada y salida

Para su uso UDESS requiere dos archivos de entrada, uno correspondiente al archivo de actividades donde se detallan las actividades a realizar durante el periodo a evaluar con sus respectivos parámetros y otro de precedencias que describe los predecesores de cada actividad. En la Figura 15 se observa el formato del archivo de actividades.

	ID	TON_DIL	M3_RS	M3_RC	M_PERFO	TON_SF	LEY_AU_SF
1	BON_NN1_1	0	0	0	0	327.6	14.7
2	BON_NN1_2	0	0	0	0	327.6	15.01
3	BON_NN1_3	0	0	0	0	327.6	14.05
4	BON_NN_15	0	0	0	0	327.6	13.55
5	BON_NN_15	0	0	0	0	327.6	15.19

	LEY_AG_SF	LEY_EQ_SF	TON_TOTAL	LEY_TOTAL	MAX_RATE
1	69.5	16.09	327.6	16.09	49.7802198
2	92.6	16.862	327.6	16.862	49.7802198
3	76.4	15.578	327.6	15.578	49.7802198
4	109.66	15.7432	327.6	15.7432	49.7802198
5	103.22	17.2544	327.6	17.2544	49.7802198

	GROUP	X	Y	Z	ING	MINE COST	BACKFILL COST	PERFO COST	TOTAL COST
1	-1	1	20	50	2E+05	50607.648	0	0	50607.648
2	-1	2	21	51	2E+05	50607.648	0	0	50607.648
3	-1	3	22	52	2E+05	50607.648	0	0	50607.648
4	-1	4	23	53	2E+05	50607.648	0	0	50607.648
5	-1	5	24	54	2E+05	50607.648	0	0	50607.648

Figura 15: Formato archivo parámetros de actividades de entrada a UDESS.

El archivo se distribuye de la siguiente manera. La primera fila corresponde a la identificación de las columnas presentes en el archivo, las fila que lo siguen corresponden a las actividades descritas para el periodo a evaluar. Las columnas se inician con "ID" el cual corresponde a un identificador de la actividad. El resto de las columnas describen los parámetros propios de las actividades, donde para el caso de estudio a realizar se tienen:

- **TON\_DIL:** corresponde al tonelaje de dilución ingresado al caserón.
- **M3\_RS:** corresponde a los metros cúbicos de relleno seco<sup>6</sup>.
- **M3\_RC:** corresponde a los metros cúbicos de relleno cementado<sup>7</sup>.
- **M\_PERFO:** corresponde a los metros perforados en el caserón.

<sup>6</sup> **Relleno seco:** entiéndase por aquel relleno correspondiente al material estéril removido durante el proceso de extracción.

<sup>7</sup> **Relleno cementado:** entiéndase por la capa de relleno que presenta cemento en su elaboración.

- **TON\_SF:** corresponde al tonelaje de la actividad (ya sea caserón o drift) que ha sido alterado por dilución.
- **LEY\_AU\_SF:** corresponde a la ley de oro de la actividad (ya sea caserón o drift) que no ha sido alterada por la dilución.
- **LEY\_AG\_SF:** corresponde a la ley de plata de la actividad (ya sea caserón o drift) que no ha sido alterada por la dilución.
- **LEY\_EQ\_SF:** corresponde a la ley equivalente entre el oro y la plata para cada actividad (ya sea caserón o drift) que no ha sido alterada por la dilución.
- **TON\_TOTAL:** corresponde al tonelaje total de la actividad (ya sea caserón o drift) incluido el tonelaje de dilución.
- **LEY\_TOTAL:** corresponde a la ley equivalente entre el oro y la plata para cada actividad (ya sea caserón o drift) que fue alterada por la dilución.
- **MAX\_RATE:** corresponde a la capacidad máxima de la actividad por el periodo de tiempo evaluado.
- **GROUP:** corresponde al parámetro que define los grupos de precedencias.
- **X, Y, Z:** corresponden a la ubicación espacial de las actividades.
- **ING:** corresponde al valor de ingreso de la actividad.
- **MINE COST:** corresponde al costo minero de la actividad.
- **BACKFILLCOST:** corresponde al costo de relleno (seco o cementado) de la actividad.
- **PERFO COSTO:** corresponde al costo por concepto de perforación.
- **TOTAL COSTO:** corresponde al costo que integra MINE COST, BACKFILLCOSTO y PERFO COST.

Por otro lado se encuentra el archivo de precedencias, el cual describe las precedencias de las actividades. En la Figura 16 se observa el formato del archivo:

predecessor	successor	group
BON_NN1_1560_YQ_DR	BON_NN1_1560_YP_DR	-1
BON_NN1_1560_YP_DR	BON_NN1_1560_YO_DR	-1
BON_NN_1520_E_DR	BON_NN_1520_F_DR	-1
BON_NN_1520_F_DR	BON_NN_1520_G_DR	-1
BON_NN_1500_ZR_DR	BON_NN_1500_ZP_DR	-1

Figura 16: Formato archivo precedencias. Archivo entrada a UDESS.

Como se observa se tiene dos columnas donde se define un “predecessor” y un “successor”. Es así como se va construyendo las precedencias de todas las actividades. Si una actividad tiene más de un predecesor se agrega una nueva fila con el

“predecessor” nuevo y se mantiene el “successor”. La tercera columna nos permite crear grupo de precedencias, el cual no será utilizado en este estudio, por eso se definen todos por -1.

Los archivos de salida generados corresponden al agendamiento definido por la optimización. El formato se muestra en la siguiente figura:

	BON_S_1631	BON_S_1631	BON_C_1651	BON_C_1651	BON_S_1631
1	0	0	0	0	0.5017
2	1	1	1	1	0.4983

**Figura 17: Formato archivo salida UDESS.**

Como se observa en Figura 17 en la primera fila se tiene el “ID” de las actividades definidas en el archivo de entrada. La primera columna corresponde a los periodos de tiempo. El resto de las casillas que integran la matriz corresponden a la proporción de la actividad  $i$  realizada en el tiempo  $t$  ( $p_{it}$ ).

#### **2.5.4.2. Visualización**

Los investigadores del Laboratorio Delphos encargados de la herramienta desarrollaron una interfaz gráfica que permite hacer uso de UDESS de una manera mucho más amigable. Esta interfaz proporciona las opciones básicas para poder hacer uso del modelo anteriormente descrito, teniendo como parámetros de entrada las actividades, precedencias, periodo de tiempo a evaluar y restricciones a imponer. El detalle de su uso y su visualización se encuentra disponible en Anexo C: Visualización UDESS.

### 3. DESARROLLO

A partir de lo descrito en los objetivos y la metodología planteada para esta tesis, a continuación se muestran los resultados para cada una de las evaluaciones realizadas.

#### 3.1. Calibración y Validación de UDESS

##### 3.1.1. Validación mediante plan de referencia

Como se mencionó en la metodología, se plantea un esquema de un yacimiento minero compuesto por 24 caserones (el detalle de toneladas y leyes de cada uno se encuentra disponible en Anexo D: Datos plan de referencia). Para su valorización, se utilizaron los siguientes parámetros:

Parámetro	Valor	Unidad
Precio	1,100	US\$/oz
Recuperación	90	%
Costo Venta	10	US\$/ton
Costo Mina	75	US\$/ton
Costo Planta	30	US\$/ton
Costo Relleno	5.97	US\$/ton
Costo Acceso	6.16	US\$/ton
Tasa de descuento anual	10	%

Tabla 3: Parámetros valorización económica

La valorización de cada caserón está definida según los siguientes cálculos:

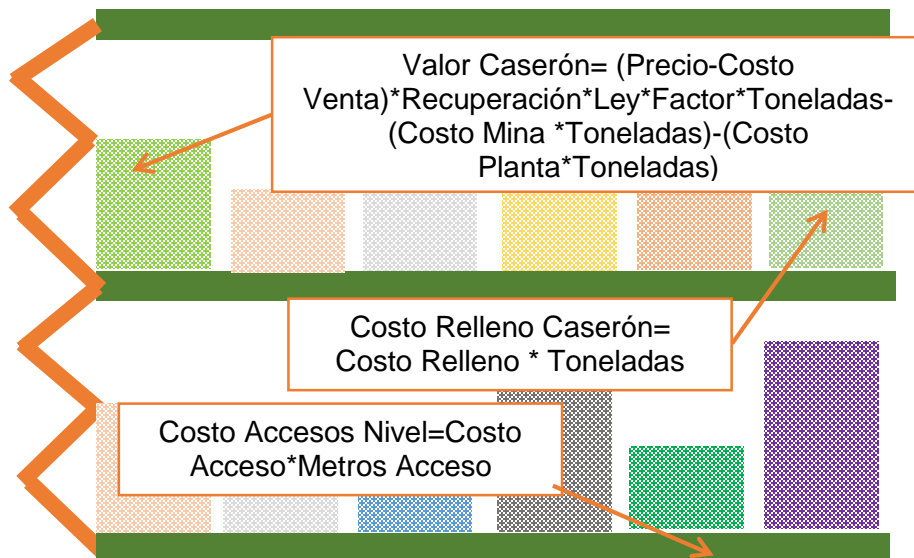


Figura 18: Esquema calculo valorización.

Una vez definida la base de datos y las precedencias existentes entre las actividades que se crearon, se establecen tres casos de estudio que se describen en los siguientes puntos:

1. Caso 1, sin dilución: esquema generado a partir de una base de datos en donde no ha sido alterado el material por material estéril.
2. Caso 2, dilución constante (45%): se considera una dilución de 45% para lo cual agregó una cantidad de material estéril a la cubicación de cada caserón, de manera que al relación minera-estéril diera lo buscado. Se ve alterada la ley del caserón producto de la intervención del material estéril.
3. Caso 3, dilución en función de parámetro geomecánicos: se consideraron ciertas condiciones de roca las que de acuerdo a las dimensiones del caserón alteran la cubicación de tonelaje del caserón y al igual que el caso 2, se añade material estéril a la unidad de caserón, afectado la ley.

Definidos la base de información y los casos a evaluar, es posible realizar las pruebas que permiten obtener la secuencia de extracción. Es necesario tener presente que el método consiste en la extracción de un caserón con su posterior actividad de relleno. Los resultados obtenidos se muestran en el siguiente esquema:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
acceso 0	0.38	0.38	0.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0
acceso 1	0.38	0.38	0.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0
caseron-01-01	0	0	0.5	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0
relleno-01-01	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
caseron-01-02	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
relleno-01-02	0	0	0	0	0.5	0.5	0	0	0	0	0	0
caseron-01-03	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
relleno-01-03	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
caseron-01-04	0	0	0	0	0	0	0.5	0.5	0	0	0	0
relleno-01-04	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
caseron-01-05	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
relleno-01-05	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5	0.5	0	0
acceso 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0.38	0.38	0.25	0
caseron-01-06	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
relleno-01-06	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
caseron-02-01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5	0.5
relleno-02-01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Se cumple la restricción de solo un caserón a la vez.

Construcción de desarrollos para mantener la continuidad de la operación.

Figura 19: Sección del agendamiento entregado por la herramienta.

Como se observa en la Figura 19 es posible ver en la primera columna el ID de cada actividad ejecutada y en las posteriores columnas la porción de la actividad realizada en el periodo de tiempo indicado en la primera fila. Se aprecia que efectivamente se cumple con las actividades iniciales de crear accesos hacia los caserones. Una vez construidos se comienza por la extracción del primer caserón del primer nivel, el que posteriormente será relleno. Una vez relleno, se continúa con el

segundo caserón y así sucesivamente. Antes de comenzar la extracción del sexto caserón del primer nivel, se comienza la construcción del segundo acceso, de manera que se pueda tener continuidad de extracción con los niveles superiores una vez terminado el primer nivel.

Evaluando el modelo en la herramienta propuesta es posible obtener el siguiente plan de producción:

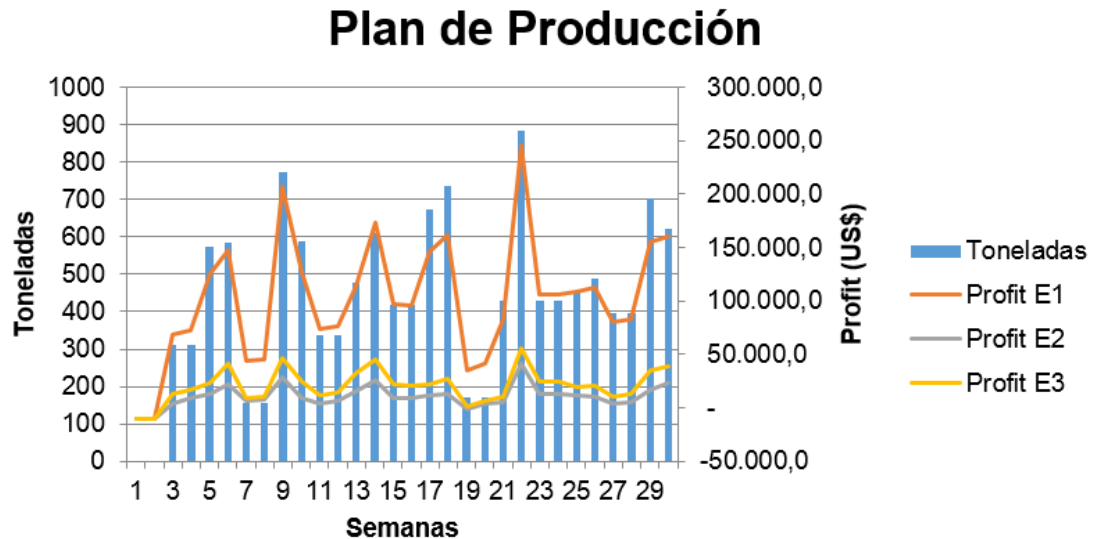


Figura 20: Plan de producción modelos.

En este plan de producción se observa que las toneladas no presentan la secuencia constante que uno quisiera esperar, lo cual se debe básicamente a la baja flexibilidad que tiene el modelo. Debido a lo acotado del ejemplo no es posible tener una gran gama de decisiones donde pudiera resolver en problema de mantener un tonelaje constante. Por otro lado, el efecto de la dilución se aprecia que es considerable referente al beneficio que se genera entre los planes.

El tiempo de resolución del problema no superó los 20 segundos, considerando que se trata de 52 actividades las cuales tiene un poder de decisión bastante acotado debido a lo rígido de la secuencia de extracción propuesta.

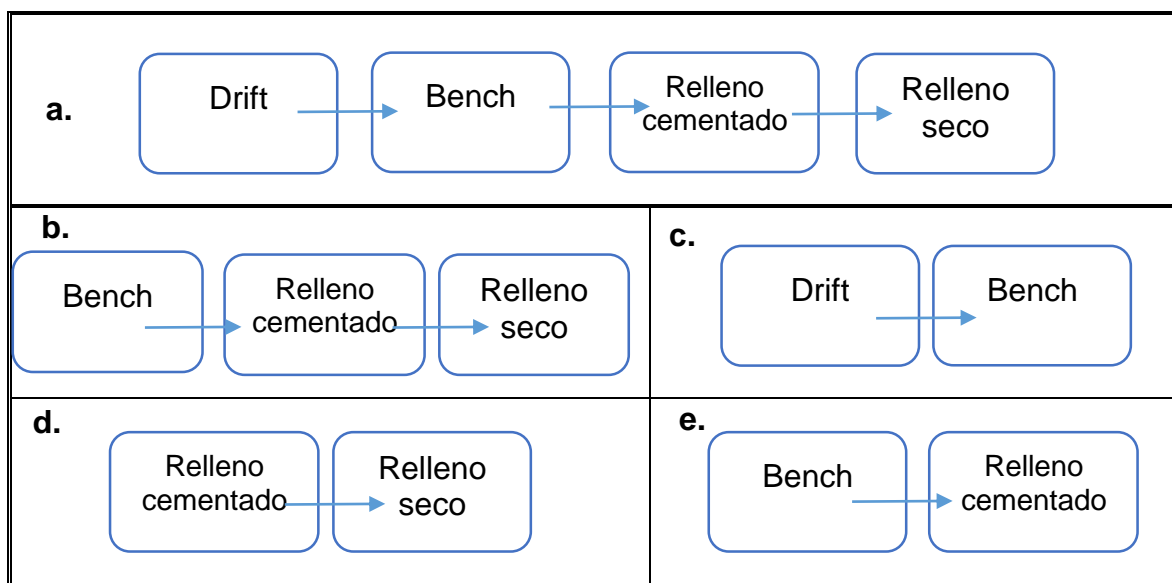
### 3.1.2. Reconstrucción plan actual

Las unidades básicas de explotación corresponden a caserones los cuales son cámaras en forma de paralelepípedo distribuidas a lo largo del yacimiento. Para acceder a ellos se construyen drift los cuales están diseñados de tal manera de extraer selectivamente la veta mineralizada.

La base de datos disponible como fuente de información corresponde a las reservas generales del yacimiento, el cual está constituido por alrededor de diez sectores. Para el trabajo a realizar se considerará únicamente dos sectores: "AES" y "BON". La elección de ambos sectores se debe básicamente a su cercanía geográfica y la facilidad para acceder a sus datos. Los datos proporcionados corresponden a la información utilizada para la generación de los planes de corto plazo, los cuales corresponden a evaluación de un mes. La información se proporciona mediante una planilla Excel la cual se divide en dos grande temas:

- **Datos Drift:** Los drift corresponden a los túneles de accesos construidos para acceder hacia el sector de producción, los caserones o bench. La base de datos proporcionada contiene la información del sector en cual se encuentra, el nivel en el que está ubicado, la veta a cual pertenece, el ID del caserón al cual se accede mediante el drift, el destino, el tonelaje y la ley de oro y plata. Este tonelaje y leyes se presentan en su estado sin factor que corresponde al valor puro medido del terreno y con factor que corresponde reajuste realizado mediante el efecto de la dilución estimada en el sector (el valor de la dilución está impuesta como un valor constante para cada sector y fue estimado a partir de los datos históricos recopilados).
- **Datos Bench:** los bench corresponde a los caserones a extraer, siendo por tanto la unidad de producción. La base de datos proporcionada, al igual que los drift, contiene la información del sector en cual se encuentra, el nivel en el que está ubicado, la veta a la cual pertenece, el ID del caserón, el tonelaje y la ley de oro y plata. Este tonelaje y leyes se presentan en su estado sin factor que corresponde al valor puro medido del terreno y con factor que corresponde reajuste realizado mediante el efecto de la dilución estimada en el sector (el valor de la dilución está impuesta como un valor constante para cada sector y fue estimado a partir de los datos históricos recopilados).

Las precedencias impuestas están determinadas por la estructura que sigue el método de extracción. A continuación se presentan las distintas series de precedencias que se puede dar, dado las actividades consideradas para la evaluación.



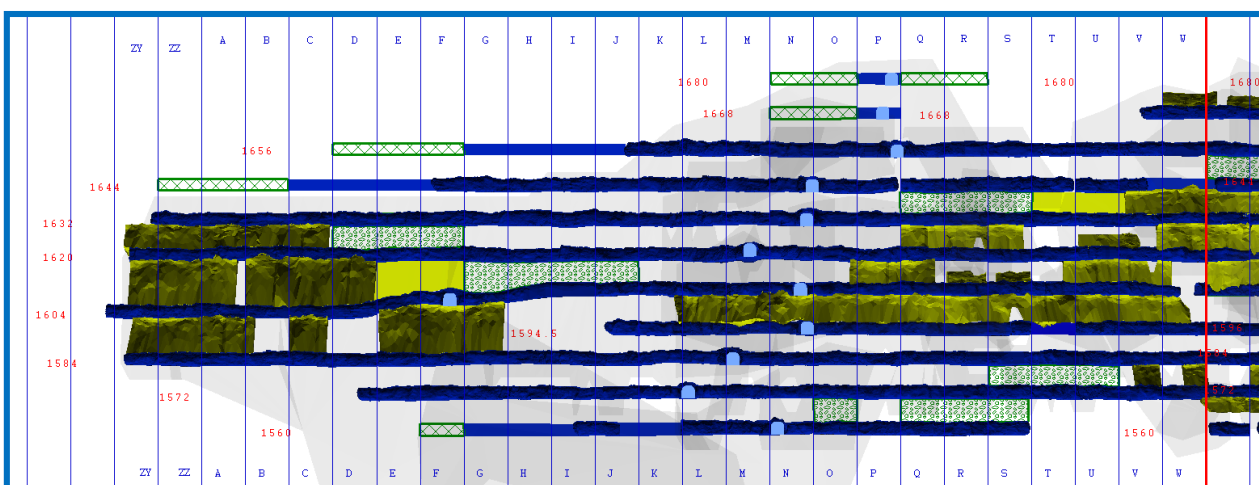
**Tabla 4: Precedencias de actividades.**

En la Tabla 4 se observa las precedencias presentes en el modelo planteado. La secuencia a) corresponde a la secuencia completa. Existen actividades que están contempladas realizarse desde la construcción del drift hasta el relleno seco de la cavidad del caserón. Sin embargo, existen actividades que fueron comenzadas en periodos anteriores o que serán destinadas para un periodo de evaluación posterior y por tanto no están consideradas realizarse ahora. Se tiene así los casos b), c), d) y e) donde por ejemplo para el caso e) ya se tiene el acceso hasta el caserón, por tanto falta extraer el caserón, su relleno será considerado para un periodo de evaluación posterior.

Es importante notar que la secuencia de precedencias completa, el caso a), tiene actividades que generan valor como es el drift y el bench y actividades que generan costos. Existe otro tipo de secuencia que debido a las actividades consideradas únicamente presentan costos, por tanto la realización de tal secuencia presenta cifras negativas (como ocurre con el caso d)). Es muy relevante tener esto en consideración para los resultados que se explicarán posteriormente.

En la Figura 21 es posible observar un esquema en dos dimensiones de la distribución del yacimiento. El esquema corresponde al sector AES subsector Norte, en donde es posible apreciar en color azul los drift ya construidos y en color verde los caserones ya extraídos. Se observa una grilla que divide el esquema en columnas, la cual tiene asignada una letra, estas corresponden al ID asignado a cada caserón. A su vez, las "filas" corresponden a los niveles del yacimiento, los cuales están rotulados con letras rojas en cada nivel. El esquema completo para el sector AES y BON está disponible en Anexo E: Esquema yacimiento caso de estudio.





**Figura 21: Esquema sector AES subsector Norte.**

El plan a recrear corresponde al plan diseñado para noviembre del 2013. Para su realización fue necesario imponer restricciones en varios intervalos de tiempo de manera de poder lograr la mejor representación del plan. Para ellos fue necesario hacer una serie de corridas, ajustando cada vez las restricciones de capacidad, hasta que la solución entregada fuera factible. En Anexo F: Restricción reconstrucción plan actuales es posible encontrar la tabla correspondiente a las restricciones impuestas por periodo.

Los parámetros impuestos en este análisis serán los siguientes:

Parámetro	Valor	Unidad
Precio	1,200	US\$/oz
Costo Mina	154.48	US\$/ton
Costo relleno	14.3	US\$/ m3
Tasa de descuento anual	10	%
Restricción Tonelaje	1,359	ton/día
Restricción relleno seco	800	m3/día
Restricción relleno cementado	230	m3/día

**Tabla 5: Parámetros aplicados a modelo de reconstrucción plan actual.**

Los resultados se pueden observar en la Figura 22. En este grafo se aprecia que es posible lograr un resultado muy similar al que se cumple actualmente en la mina, por lo que la herramienta efectivamente es flexible a realizar las tareas que se le imponen. Además el tiempo de evaluación no superó los 20 minutos, lo cual es bastante acotado. Este tiempo se vio incrementado debido al exceso de limitaciones impuestas para lograr la reconstrucción semejante a la real. Sin embargo, si bien existe un plan de producción muy similar, el agendamiento de las actividades es bastante diferente. Para el mismo periodo de tiempo la mina en evaluación tenía destinada cierta cantidad de actividades a realizas, las que incluía el relleno de los caserones. Al realizar este ejercicio y no imponer

restricciones respecto a ese criterio, sino que únicamente incluirlo en las precedencias de las actividades, la herramienta tendió a dejar muchas actividades de relleno sin hacer. Esta decisión se debe básicamente a que aquellas actividades generan un costo al proceso y como la herramienta realiza su evaluación optimizando sus beneficios, las deja fuera del conjunto de actividades realizadas.



**Figura 22: Representación gráfica plan de producción. Actual-UDESS.**

### 3.2. Implementación casos de estudio

Los casos de estudio a evaluar están fundamentados en los sectores AES y BON, entre los meses noviembre 2013 y enero 2014.

Las actividades definidas para estas evaluaciones corresponden a: drift, perforación, extracción del caserón, relleno cementado y luego relleno seco. Cada actividad posee su valorización de acuerdo a la tabla descrita en la metodología. Los parámetros utilizados para la valorización son los siguientes:

Parámetro	Valor	Unidad
Precio Au	1,200	US\$/oz
Costo Mina	154.48	US\$/ton
Costo relleno cementado	20	US\$/ m3
Costo relleno seco	15	US\$/ m3
Costo perforación	10	US\$/m

**Tabla 6: Parámetros para evaluación Sectores.**

La valorización para la base de datos de las actividades que componen los casos de estudio se realiza según las siguientes expresiones:

$$\text{Ingreso [US\$]} = \frac{\text{Ton} * \text{Ley}_{eq}}{31.1034} * \text{Precio}_{Au}$$

$$\text{Costo Mina [US\$]} = \text{Ton} * \text{Costo}_{mina}$$

$$\text{Costo Relleno Cementado [US\$]} = m^3_{\text{cementado}} * \text{Costo}_{\text{cementado}}$$

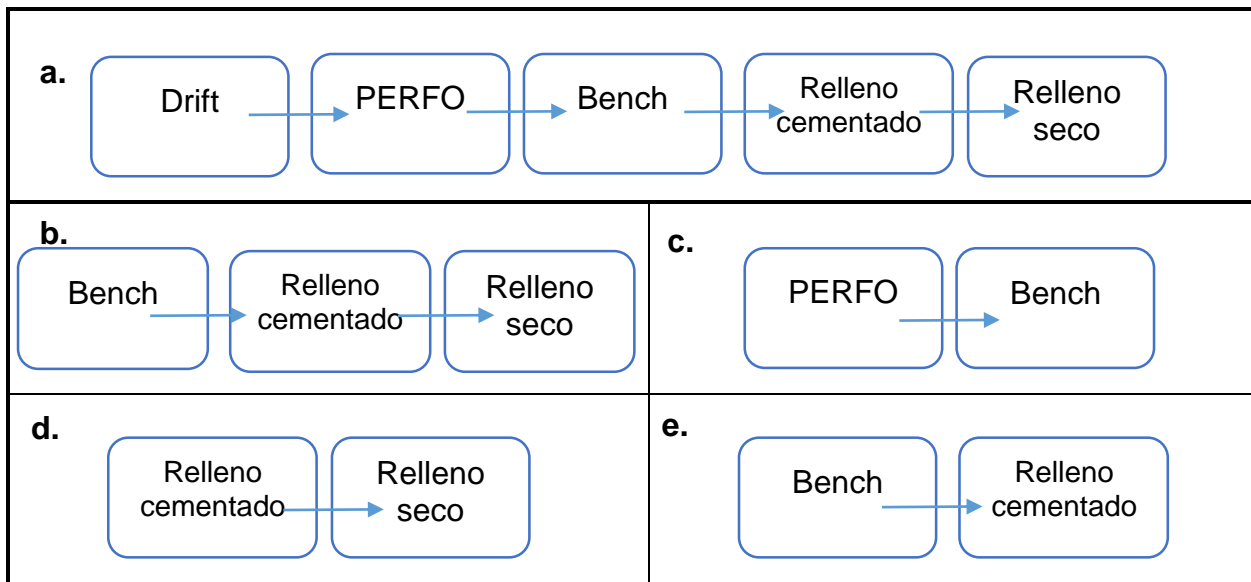
$$\text{Costo Relleno Seco [US\$]} = m^3_{\text{seco}} * \text{Costo}_{\text{cementado}}$$

$$\text{Costo Perforación [US\$]} = m_{\text{perforación}} * \text{Costo}_{\text{perforación}}$$

$$\text{Costo total [US\$]} = \text{Costo}_{\text{mina}} + \text{Costo}_{R.\text{cementado}} + \text{Costo}_{R.\text{seco}} + \text{Costo}_{\text{perforación}}$$

**Ecuación 13: Valorización económica base de datos.**

Las precedencias asociadas a las actividades están descritas según la siguiente tabla:



**Tabla 7: Precedencias de actividades para modelo implementado.**

La secuencia a) corresponde a la secuencia completa. Existen actividades que están contempladas realizarse desde la construcción del drift hasta el relleno seco de la cavidad del caserón. Sin embargo, existen actividades que fueron comenzadas en periodos anteriores o que serán destinadas para un periodo de evaluación posterior y por tanto no están consideradas realizarse ahora. Se tiene así los casos b), c), d) y e) donde por ejemplo para el caso c) ya se tiene el acceso hasta el caserón, por tanto falta perforar y posteriormente extraer el caserón, su relleno será considerado para un periodo de evaluación posterior.

Cada una de las actividades además de estar limitada por un modelo general posee una capacidad de avance máximo que se puede realizar durante el periodo de evaluación. El valor de las tasas de las actividades está dado por:

$v_{max i}$	Valor	Unidad
Bench	1,032	Ton/mes
Drift	980	Ton/mes
Relleno Cementado	64.51	m3/mes
Relleno Seco	709.45	m3/mes
Perforación	621.93	m/mes

Tabla 8: Valor tasas máximas de avance actividades.

Se observa que si bien los bench y drift están limitados por un mismo parámetro de tonelaje, las capacidades de los drift son menores a las proporcionadas por los bench.

### 3.2.1. Resultados evaluación planes sector AES y BON

#### 3.2.1.1. Evaluación planes diferentes meses

En la Tabla 9, Tabla 10 y Tabla 11 es posible observar dos casos de estudio para cada mes. Cada caso se diferencia entre ellos de las restricciones impuestas a la cada una de las actividades, en particular al tonelaje extraído. La decisión de poner ambos casos por mes de evaluación nace luego de una serie de corridas que determinaron que entregan una solución dentro de los parámetros esperados. En el lado derecho de cada tabla, es posible encontrar los resultados correspondientes a cada una de las evaluaciones.

EVALUACIÓN NOVIEMBRE 2013								
CASO		t	(-)	(+)	ACTIV. REALIZADAS	Beneficio(US\$)	GAP (%)	TIEMPO EVAL (s)
CASO A	TON_CF [ton/mes]	1-30	20,000	35,000	74	9,631,146.25	3.16	67.1
	M3_RS [m3/mes]	1-30	-	18,878				
	M3_RC [m3/mes]	1-30	-	4,810				
	PERFO [m/mes]	1-30	-	11,820				
CASO B	TON_CF [ton/mes]	1-30	25,000	30,000	81	14,016,888.80	4.37	28.9
	M3_RS [m3/mes]	1-30	-	18,878				
	M3_RC [m3/mes]	1-30	-	4,810				
	PERFO [m/mes]	1-30	-	11,820				

Tabla 9: Resultados evaluación Noviembre 2013.

EVALUACIÓN DICIEMBRE 2013								
CASO	t	(-)	(+)	ACTIV. REALIZADAS	Beneficio(US\$)	GAP (%)	TIEMPO EVAL (s)	
CASO A	TON_CF [ton/mes]	1-31	20,000	40,000	186	21,374,418.73	1.81	283.24
	M3_RS [m3/mes]	1-31	-	21,993				
	M3_RC [m3/mes]	1-31	-	2,000				
	PERFO [m/mes]	1-31	-	19,280				
CASO B	TON_CF [ton/mes]	1-31	20,000	32,000	149	19,692,921.65	1.3	597.88
	M3_RS [m3/mes]	1-31	-	21,993				
	M3_RC [m3/mes]	1-31	-	2,000				
	PERFO [m/mes]	1-31	-	19,280				

Tabla 10: Resultados evaluación Diciembre 2013.

EVALUACIÓN ENERO 2014								
CASO	t	(-)	(+)	ACTIV. REALIZADAS	Beneficio(US\$)	GAP (%)	TIEMPO EVAL (s)	
CASO A	TON_CF [ton/mes]	1-31	18,000	30,000	120	12,445,997.68	2.99	171.69
	M3_RS [m3/mes]	1-31	-	18,830				
	M3_RC [m3/mes]	1-31	-	2,500				
	PERFO [m/mes]	1-31	-	11,300				
CASO B	TON_CF [ton/mes]	1-31	20,000	28,000	111	12,299,503.10	0.48	167.8
	M3_RS [m3/mes]	1-31	-	18,830				
	M3_RC [m3/mes]	1-31	-	2,500				
	PERFO [m/mes]	1-31	-	11,300				

Tabla 11: Resultados evaluación Enero 2014.

Para el caso de la Tabla 9 correspondiente al mes de noviembre se tiene un total de 174 actividades de las cuales fueron desarrolladas las que se señalan en la tabla. La diferencia entre ambos casos de evaluación es de 7 actividades, lo que se traduce en una variación leve del beneficio. Por otro lado los tiempos de evaluación superan levemente el minuto.

Caso similar ocurre para los resultados de la Tabla 10 correspondiente al mes de Diciembre donde se tiene un total de 253 actividades por realizar. Se observa al igual que el caso anterior, una diferencia de 37 actividades por realizar entre ambos casos que se ve reflejado en el valor del beneficio obtenido. El tiempo de evaluación fue mayor al obtenido en Noviembre, debido al aumento de actividades y precedencias. De todos modos, este no supera los 10 minutos.

Finalmente los resultados de la Tabla 11 correspondientes al mes de enero tienen un total de 184 actividades definidas, de las cuales cerca de 120 fueron destinadas a realizarse. En este caso ocurre nuevamente lo mismo que se venía reflejando, que al haber una diferencia entre cantidad de actividades realizadas entre ambos casos existe un impacto en el beneficio. El tiempo de evaluación no superó los 3 minutos y se observa una diferencia en el valor del GAP.

Realizado el análisis de los resultados económicos y evaluaciones de tiempo es necesario analizar la secuencia de extracción generada. En primer lugar es necesario

dejar en claro que la herramienta no agendó el total de las actividades impuestas en cada evaluación. Para el mes de Noviembre solo agendó un total de 46.5% de las actividades, para Diciembre un 73.5% y para Enero un 65.2%.

Se seleccionó un nivel del sector AES y BON para cada uno de los casos, con el fin de determinar si efectivamente se cumple las restricciones de precedencia impuesta y luego utilizar el resultado para un posterior análisis. Los niveles seleccionados se describen en la siguiente tabla:

<b>MES</b>	<b>SECTOR</b>	<b>NIVEL</b>
Noviembre	AES	Central, 1572
	BON	Central, 1651
Diciembre	AES	Central, 1536
	BON	Norte Norte, 1660
Enero	AES	Norte, 1620
	BON	Sur, 1631

**Tabla 12: Sectores evaluación secuencia.**

A continuación se tiene la secuencia de extracción para el mes correspondiente de los niveles señalados. Es posible observar que efectivamente se cumple las precedencias descritas. Sin embargo, existen casos donde hay una extracción de Bench y posteriormente es seguida por una nueva extracción de Bench, y no continúa con el relleno como lo describe la secuencia. Esto se debe a que de acuerdo a la base de datos proporcionada, no existen actividades de relleno asociadas a este caserón, por tanto se producción excepciones a la secuencia de extracción del método.

➤ **Noviembre**

- Caso A: AES (AES\_C\_1572)

	VALOR ACT	1	2	3	...	6	...	9	...	13	14	...	27	...
AES_C_1572_AJ_BENCH	395	1	0	0	...	0	...	0	...	0	0	...	0	...
AES_C_1572_AF/2_RS	300	0	1	0	...	0	...	0	...	0	0	...	0	...
AES_C_1572_AI2/2_BENCH	461	0	0	0.9364	...	0.0636	...	0	...	0	0	...	0	...
AES_C_1572_AI1/2_BENCH	461	0	0	0	...	1	...	0	...	0	0	...	0	...
AES_C_1572_AH_BENCH	776	0	0	0	...	0.1233	...	0.3538	...	0.2736	0.2493	...	0	...
AES_C_1572_AH_RS	540	0	0	0	...	0	...	0	...	0	0	...	1	...

**Tabla 13: Secuencia AES, Noviembre Caso A.**

- Caso A: BON (BON\_C\_1651)

	VALOR ACT	1	2	3	...	5	...	8	...	24	25	...
BON_C_1651_AR_PERFO	120.0	0.3283	0.015	0.3283	...	0.3283	...	0	...	0	0	...
BON_C_1651_AR_BENCH	438.4	0	0	0	...	0	...	1	...	0	0	...
BON_C_1651_AQ_BENCH	483.6	0	0	0	...	0	...	0	...	1	0	...
BON_C_1651_AQ_RC	240	0	0	0	...	0	...	0	...	1	0	...
BON_C_1651_AP_BENCH	687.9	0	0	0	...	0	...	0	...	0	1	...

**Tabla 14: Secuencia Bon, Noviembre Caso A.**

- Caso B: AES (AES\_C\_1572)

	VALOR ACT	1	2	3	4	5	...	21	...
AES_C_1572_AF/2_RS	300.00	1	0	0	0	0	...	0	...
AES_C_1572_AJ_BENCH	395.44	0	0	1	0	0	...	0	...
AES_C_1572_AI2/2_BENCH	461.01	0	0	0	0	1	...	0	...
AES_C_1572_AI1/2_BENCH	461.01	0	0	0	0	0	...	1	...

**Tabla 15: Secuencia AES, Noviembre Caso B.**

- Caso B: BON (BON\_C\_1651)

	VALOR ACT	1	2	3	4	5	6	...	12	...	15	...	28	29	30
BON_C_1651_AR_PERFO	120.0	1	0	0	0	0	0	...	0	...	0	...	0	0	0
BON_C_1651_AR_BENCH	438.4	0	1	0	0	0	0	...	0	...	0	...	0	0	0
BON_C_1651_AQ_BENCH	483.6	0	0	1	0	0	0	...	0	...	0	...	0	0	0
BON_C_1651_AQ_RC	240.0	0	0	0	0.6679	0.3321	0	...	0	...	0	...	0	0	0
BON_C_1651_AO_PERFO	200.0	0	0	0	0	0	1	...	0	...	0	...	0	0	0
BON_C_1651_AP_BENCH	687.9	0	0	0	0	0	0	...	0.2269	...	0.7731	...	0	0	0
BON_C_1651_AO_BENCH	808.0	0	0	0	0	0	0	...	0	...	0	...	0.487	0.1501	0.3629

Tabla 16: Secuencia BON, Noviembre caso B.

➤ Diciembre

- Caso A: AES (AES\_C\_1536)

	VALOR ACT	1	2	3	4	5	...	17	18	19	...	22	23	24	...
AES_C_1536_AI_PERFO	220	0.3724	0.327	0.3006	0	0	...	0	0	0	...	0	0	0	...
AES_C_1536_AI_BENCH	153	0	0	0	0	1	...	0	0	0	...	0	0	0	...
AES_C_1536_AH_PERFO	220	0	0	0	0	0	...	0.3849	0.6151	...	0	0	0	0	...
AES_C_1536_AJ_PERFO	220	0	0	0	0	0	...	0.1471	0	0.8529	...	0	0	0	...
AES_C_1536_AH_BENCH	48	0	0	0	0	0	...	0	0	0	...	1	0	0	...
AES_C_1536_AJ_BENCH	439	0	0	0	0	0	...	0	0	0	...	0.1085	0	0.8915	...

Tabla 17: Secuencia AES, Diciembre Caso A.

- Caso A: BON (BON\_NN\_1660)

	VALOR ACT	1	2	3	...	6	7	8	...	15	...	19	...	26	...
BON_NN_1660_B_PERFO	170.0	0	1	0	...	0	0	0	...	0	...	0	...	0	...
BON_NN_1660_C_PERFO	170.0	0	0	1	...	0	0	0	...	0	...	0	...	0	...
BON_NN_1660_D_PERFO	187.0	0	0	0	...	1	0	0	...	0	...	0	...	0	...
BON_NN_1660_E_PERFO	187.0	0	0	0	...	0	1	0	...	0	...	0	...	0	...
BON_NN_1660_F_BENCHUC	340.7	0	0	0	...	0	0	1	...	0	...	0	...	0	...
BON_NN_1660_F_PERFO	187.0	0	0	0	...	0	0	1	...	0	...	0	...	0	...
BON_NN_1660_E2/2_BENCHUC	165.4	0	0	0	...	0	0	0	...	1	...	0	...	0	...
BON_NN_1660_E1/2_BENCHUC	165.4	0	0	0	...	0	0	0	...	0	...	1	...	0	...
BON_NN_1660_D_BENCHUC	295.8	0	0	0	...	0	0	0	...	0	...	0	...	1	...

Tabla 18: Secuencia BON, Diciembre Caso A.



- Caso B: AES (AES\_C\_1536)

	VALOR ACT	1	...	6	...	10	11	...	17	18	19	...	30	31
AES_C_1536_AH_PERFO	220	0	...	0.5822	...	0.4178	0	...	0	0	0	...	0	0
AES_C_1536_AI_PERFO	220	0	...	0	...	0	1	...	0	0	0	...	0	0
AES_C_1536_AH_BENCH	48	0	...	0	...	0	0	...	1	0	0	...	0	0
AES_C_1536_AJ_PERFO	220	0	...	0	...	0	0	...	0.5598	0	0.4402	...	0	0
AES_C_1536_AJ_BENCH	439	0	...	0	...	0	0	...	0	0	0	...	0.2258	0.7742

Tabla 19: Secuencia AES, Diciembre Caso B.

- Caso B: BON (BON\_NN\_1660)

	VALOR ACT	1	2	3	4	...	8	9	10	11	12	...	25	...	31
BON_NN_1660_B_PERFO	170	0	1	0	0	...	0	0	0	0	0	...	0	...	0
BON_NN_1660_C_PERFO	170	0	0	0	1	...	0	0	0	0	0	...	0	...	0
BON_NN_1660_D_PERFO	187	0	0	0	0	...	1	0	0	0	0	...	0	...	0
BON_NN_1660_E_PERFO	187	0	0	0	0	...	0	0	1	0	0	...	0	...	0
BON_NN_1660_F_PERFO	187	0	0	0	0	...	0	0	0	1	0	...	0	...	0
BON_NN_1660_F_BENCHUC	340.7	0	0	0	0	...	0	0	0	0	1	...	0	...	0
BON_NN_1660_E2/2_BENCHUC	165.4	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0	...	1	...	0
BON_NN_1660_E1/2_BENCHUC	165.4	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0	...	0	...	1

Tabla 20: Secuencia BON, Diciembre caso B.

➤ Enero

- Caso A: AES (AES\_N\_1620)

	VALOR ACT	1	...	6	7	8	9	10	...	20	...	25	26	27	28	29	30	31
AES_N_1620_M_PERFO	240.00	1	...	0	0	0	0	0	...	0	...	0	0	0	0	0	0	0
AES_N_1620_L_PERFO	240.00	0	...	1	0	0	0	0	...	0	...	0	0	0	0	0	0	0
AES_N_1620_K_PERFO	240.00	0	...	0	0	1	0	0	...	0	...	0	0	0	0	0	0	0
AES_N_1620_J_PERFO	220.00	0	...	0	0	0	0	1	...	0	...	0	0	0	0	0	0	0
AES_N_1620_J_BENCH	609.99	0	...	0	0	0	0	0	...	0.1449	...	0.8551	0	0	0	0	0	0
AES_N_1620_K_BENCH	623.62	0	...	0	0	0	0	0	...	0	...	0	0	1	0	0	0	0
AES_N_1620_L_BENCH	667.44	0	...	0	0	0	0	0	...	0	...	0	0	0	1	0	0	0
AES_N_1620_M_BENCH	924.67	0	...	0	0	0	0	0	...	0	...	0	0	0	0	0.1619	0.8381	0

Tabla 21: Secuencia AES, Enero Caso A.

- Caso A: BON (BON\_S\_1631)

	VALOR ACT	1	2	3	4	...	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	...	24	...	
BON_S_1631_BB/2_PERFO	220.0	0	1	0	0	...	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...
BON_S_1631_BA_PERFO	220.0	0	0	0.7956	0.2644	...	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...
BON_S_1631_AZ_PERFO	230.0	0	0	0	1	...	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...
BON_S_1631_AY_PERFO	440.0	0	0	0	0	...	0.1705	0.8295	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...
BON_S_1631_AX/2_PERFO	110.0	0	0	0	0	...	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...
BON_S_1631_AX/2_BENCH	429.6	0	0	0	0	...	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...
BON_S_1631_AY_BENCH	1094.6	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0.1183	0	0.4911	0.2069	0.0213	0.1623	0	0	0	0	0	0	0	...
BON_S_1631_AZ_BENCH	807.9	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2159	0.5839	0.2002	0	0	0	0	...
BON_S_1631_BA_BENCH	559.6	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	...	0
BON_S_1631_BB/2_BENCH	269.1	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	...

Tabla 22: Secuencia BON, Enero Caso A.

- Caso B: AES (AES\_N\_1620)

	VALOR ACT	1	2	...	5	6	7	8	9	...	14	...	19	...	22	23	...	27	28	29	...		
AES_N_1620_M_PERFO	240	1	0	...	0	0	0	0	0	...	0	...	0	...	0	0	...	0	0	0	0	...	
AES_N_1620_L_PERFO	240	0	1	...	0	0	0	0	0	...	0	...	0	...	0	0	...	0	0	0	0	...	
AES_N_1620_K_PERFO	240	0	0	...	1	0	0	0	0	...	0	...	0	...	0	0	...	0	0	0	0	...	
AES_N_1620_J_PERFO	220	0	0	...	0	0	1	0	0	...	0	...	0	...	0	0	...	0	0	0	0	...	
AES_N_1620_J_BENCH	609.99	0	0	...	0	0	0	1	0	...	0	...	0	...	0	0	...	0	0	0	0	...	
AES_N_1620_K_BENCH	623.62	0	0	...	0	0	0	0	0.7789	...	0.2211	...	0	...	0	0	...	0	0	0	0	...	
AES_N_1620_L_BENCH	667.44	0	0	...	0	0	0	0	0	...	0	...	0.453	...	0.3622	0.1848	...	0	0	0	0	...	
AES_N_1620_M_BENCH	924.67	0	0	...	0	0	0	0	0	...	0	...	0	...	0	0	...	0.4559	0	0.5441	...	0	...

Tabla 23: Secuencia AES, Enero Caso B.

- Caso B: BON (BON\_S\_1631)

	VALOR ACT	1	...	3	4	5	...	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	...	26	...
BON_S_1631_BB/2_PERFO	220	0	...	1	0	0	...	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...	0	...
BON_S_1631_BA_PERFO	220	0	...	0	0	1	...	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...	0	...
BON_S_1631_AZ_PERFO	230	0	...	0	0	0	...	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...	0	...
BON_S_1631_AY_PERFO	440	0	...	0	0	0	...	0	0.1705	0.8295	0	0	0	0	0	0	0	...	0	...
BON_S_1631_AX/2_BENCH	429.6	0	...	0	0	0	...	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	...	0	...
BON_S_1631_AX/2_PERFO	110	0	...	0	0	0	...	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	...	0	...
BON_S_1631_AY_BENCH	1094.6	0	...	0	0	0	...	0	0	0.1022	0	0.4025	0.4752	0.0202	0	0	0	...	0	...
BON_S_1631_AZ_BENCH	807.9	0	...	0	0	0	...	0	0	0	0	0	0	0	0.484	0.516	0	...	0	...
BON_S_1631_BA_BENCH	559.6	0	...	0	0	0	...	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...	1	...
BON_S_1631_BB/2_BENCH	269.1	0	...	0	0	0	...	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...	0	...

Tabla 24: Secuencia BON, Enero Caso B.

De las tablas anteriores es posible observar la secuencia de extracción según sector para cada uno de los casos evaluados. Respecto a los resultados se puede mencionar:

- Las evaluaciones correspondiente al mes de noviembre es posible apreciar que la diferencia entre el caso A y B para el sector AES es que las actividades realizadas inicialmente son las mismas, pero están programadas en periodo de inicio distinto. Para el caso correspondiente al sector de BON el caso A comenzó con una actividad de perforación, la cual fue distribuida en cuatro periodos de tiempo, posteriormente lo siguen las otras actividades. Para el caso B ocurre que la actividad de perforación iniciada en el caso A se ejecutó en tan solo un periodo.
- Para el mes de diciembre se observa que para el sector AES ambos casos estudiados presentan actividades distintas de inicio, además el periodo de inicio de las actividades es distinto para ambos casos. En el sector BON se observa que existe la misma secuencia de realización de actividades en ambos, pero fueron diferenciados en el periodo de inicio de cada actividad.
- Finalmente para las evaluaciones correspondiente a enero en los sectores AES y BON se observa la misma secuencia de actividades pero distribuidas en periodos de tiempos distintos.

Por tanto, las modificaciones de las restricciones de tonelaje inmediatamente generan una variación en la secuencia obtenida, dejando en muchos casos incluso actividades sin realizar.

Es importante tener en consideración que si bien los resultados fueron mostrados por separado, las evaluaciones fueron realizadas considerando ambos sectores en el mismo caso.

### **3.2.1.2. Sensibilización plan para Diciembre 2013**

Luego de realizar evaluaciones de posibles planes de producción y determinar cuál es el rendimiento en relación al total de actividades declaradas como datos de entrada, se realiza una sensibilización de restricciones para el plan de diciembre 2013 debido a que es el periodo con mayor número de actividades.

Es así como se evalúan 8 casos, dentro de los cuales hay restricciones de tonelaje, de relleno cementado y seco, de perforación y de conteo de actividades. Esta última restricción fue un nuevo parámetro que fue ingresado en esta evaluación para poder imponer a la herramienta tratar de cumplir el máximo de las actividades ingresadas en el periodo de tiempo evaluado.

Los rangos de restricción utilizados en el análisis de sensibilidad para el mes de diciembre impuestos sobre las actividades se detallan en la siguiente tabla:

<b>Evaluación Diciembre 2013</b>			
<b>Actividad</b>	<b>t</b>	<b>(-)</b>	<b>(+)</b>
TON_CF [ton/mes]	1-31	20,000	32,000-40,000
M3_RS [m3/mes]	1-31	0	22,000
M3_RC [m3/mes]	1-31	0	2,000
PERFO [m/mes]	1-31	0	19,300

Tabla 25: Restricción aplicadas a modelos Diciembre 2013.

La actividad "TON\_CF" hace referencia al tonelaje extraído mediante drift y bench. El resto de las descripciones corresponden a cada una de las actividades descritas. El detalle de los casos y sus restricciones se encuentra en Anexo G: Restricciones sensibilización plan diciembre. En el detalle de las restricciones de observa una casilla en donde se señala "forzar término de la actividad" el cual corresponde a una opción que presenta la herramienta UDESS la cual permite imponer tal restricción de manera que toda actividad iniciada en el periodo de evaluación deba ser terminada.

A partir de esos datos, es posible obtener los siguientes resultados:

	<b>Benef. [US\$]</b>	<b>GAP [%]</b>	<b>% ACT REALIZADAS</b>	<b>TIEMPO (S)</b>
<b>CASO 1</b>	21,600,456.98	0.17	62.06	55.18
<b>CASO 2</b>	21,145,616.93	2.54	77.47	61.31
<b>CASO 3</b>	20,872,299.57	3.24	77.87	63.77
<b>CASO 4</b>	21,370,015.17	2.24	78.66	42.00

Tabla 26: Resultados Caso del 1-4.

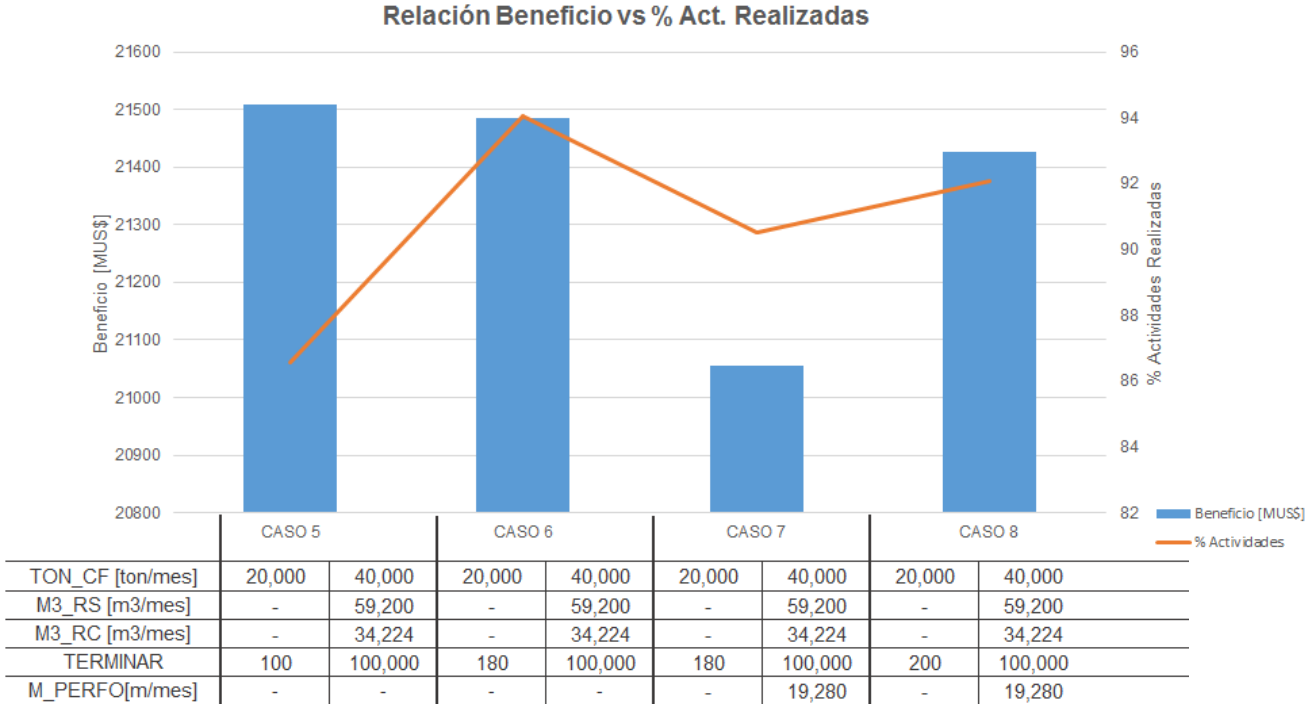
	<b>Benef. [US\$]</b>	<b>GAP [%]</b>	<b>% ACT REALIZADAS</b>	<b>TIEMPO (S)</b>
<b>CASO 5</b>	21,508,329.29	1.89	86.56	58.95
<b>CASO 6</b>	21,484,715.75	1.91	94.07	188.81
<b>CASO 7</b>	21,056,207.11	3.51	90.51	831.90
<b>CASO 8</b>	21,426,629.96	18.56	92.09	432.37

Tabla 27: Resultados Caso del 5-8.

Se consideran los primeros 4 casos, en donde se evaluó el tiempo que demora en desarrollar la resolución del problema y los resultados económicos que entrega. Posteriormente, en base a esos resultados, se realiza un ajuste las restricciones y se agrega una nueva restricción la cual se denomina "termino de actividad" la cual tiene por finalidad forzar el cumplimiento de más actividades. Como se observa en los resultados, efectivamente el porcentaje de actividades realizadas aumento por sobre el 85% para los casos 5 al 8, sin embargo sus variaciones de beneficio no fueron tan significativas. Esto se debe principalmente a que las nuevas actividades forzadas a realizar corresponden a

actividades tanto de costo como de beneficio, por tanto el beneficio total correspondiente a la evaluación no se ve mayormente afectado.

Aludiendo al punto anterior, es posible observar que un mayor beneficio no está asociado a un mayor número de actividades realizadas. Entre los casos 5 al 8 el mayor beneficio está dado por el caso 5 el cual tiene el menor número de actividades desarrolladas. Por lo tanto, el mejor resultado en términos económicos no está ligado a desarrollar la totalidad de las actividades declaradas para el periodo de evaluación.



**Figura 23: Análisis beneficio y cantidad de actividades.**

### 3.2.1.3. Comparación beneficio plan Diciembre 2013

Luego de realizar los estudios de las variaciones en las restricciones de los planes y variabilidad de resultados que pueden entregar estos, se verifica la mejora entregada por UDESS.

Para esto se analiza el plan de diciembre 2013 donde se estandarizan las consideraciones del plan real al plan realizado por UDESS para tener una misma base de comparación. Con esto se hace referencia a que se considera para la evaluación ingreso de las toneladas de mineral de acuerdo a la ley equivalente y los costos asociados a costo mina, costo relleno cementado, costo relleno seco y costo perforación.

Los valores resultantes del beneficio son los siguientes:

Beneficio	Valor [US\$]
Beneficio plan real	17,457,896.50
Beneficio UDESS	21,859,170.20

Tabla 28: Comparación Beneficio.

Es posible observar que el beneficio evaluado es menor comparado a los que se muestran en la sección anterior para el mismo mes. Teniendo esto en consideración y evaluando una de las peores opciones que se puede tener con UDESS para el plan en análisis, aun así su valor es mayor que el proporcionado por el plan propuesto por la mina.

En el siguiente gráfico se observan los flujos de caja definidos para ambos planes:

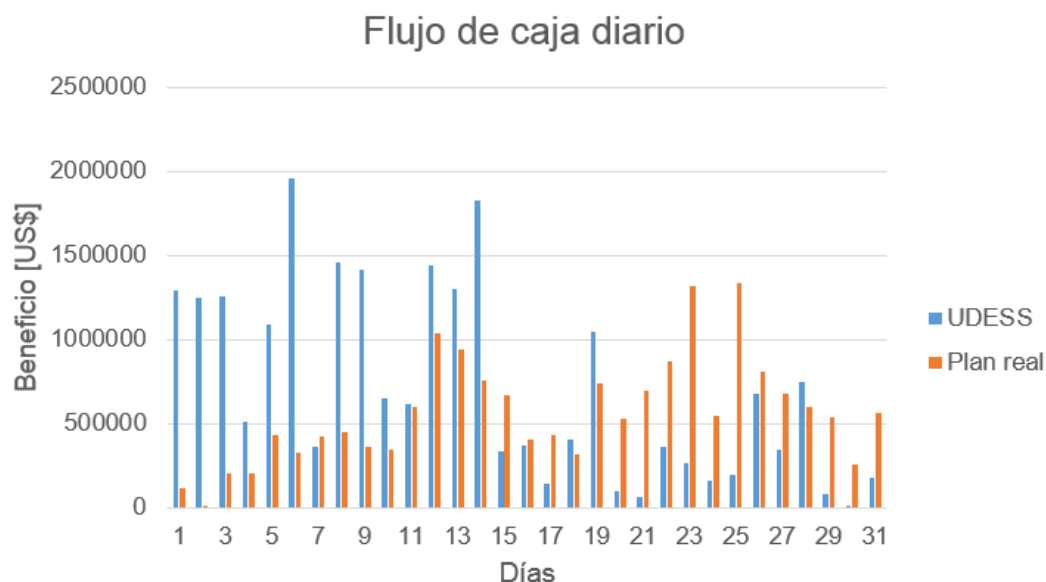


Figura 24: Flujo de caja de beneficio por periodo.

Se observa que para el caso del plan real hay un inicio del mes con un flujo de caja menor a los US\$ 120,000, el cual se varía considerablemente durante el día 23 subiendo a U\$S 1,300,00. Para el plan creado por UDESS, se decide extraer las mejores reservas al comienzo de la evaluación y posteriormente se extrae lo que queda disponible de acuerdo a las actividades planteadas. La razón de esta decisión se debe a que el plan es evaluado de manera aislada en UDESS, por tanto la herramienta decide extraer el mayor beneficio al comienzo, dado su estrategia de optimización, y posteriormente extraer el resto de las reservas. A diferente del plan real, el cual su estrategia de extracción se debe exclusivamente a restricciones operacionales y por ende no tiene una estrategia de extraer los mejores beneficios más rápidamente y considerando a que tiene otros sectores asociados en su evaluación.

A partir de este ejercicio, es posible observar que la herramienta utilizada para la asignación de actividades si entrega una mejor solución en comparación a la asignación manual realizada actualmente.

### 3.3. Resultados efecto variación tamaño de caserón, efecto dilución

#### 3.3.1. Calculo dilución por ELOS

Luego de realizar las validaciones correspondiente se realiza la evaluación del efecto de la dilución en la elaboración del plan de producción.

Tal como se mencionó en los capítulos anteriores se utilizaron técnicas de estimación mediante el ELOS para así tener una referencia de la cantidad de material estéril que ingresa al caserón. De acuerdo a las técnicas de estimación en “Anexo H: Gráficos calculo ELOS” es posible encontrar los gráficos para determinar el ELOS de acuerdo a los parámetros de entrada RH y N’.

Los datos con los cuales se cuenta según el tamaño de caserón por nivel son los siguientes:

Tamaño	Nivel	Ancho, wo [m]	Alto, h [m]	Largo, l [m]	RH (HW/FW)	N' min	N' max
L	1560	2.5	16.2	15.2	3.9	3.3	7.0
	1540	2.5	16.2	15.2	3.9	3.3	4.8
	1571	2.5	16.2	15.2	3.9	2.4	5.1
	1571	1	8.6	14.8	2.7	2.4	5.1
	1528	1	8.6	14.8	2.7	2.4	5.1
2L	1560	3.6	16	30	5.2	3.3	7.0
	1560	2.8	16	30	5.2	3.3	7.0
	1560	1.2	16.0	30.0	5.2	3.3	7.0
	1540	3.6	16	30	5.2	3.3	4.8
	1540	2.8	16	30	5.2	3.3	4.8
	1540	1.2	16.0	30.0	5.2	3.3	4.8
	1571	3.6	16	30	5.2	2.4	5.1
	1571	2.8	16	30	5.2	2.4	5.1
	1571	1.2	16.0	30.0	5.2	2.4	5.1
	1571	1	8.6	30	3.3	2.4	5.1
	1528	1	8.6	30	3.3	2.4	5.1

Tabla 29: Parámetros evaluación ELOS.

Como se observa en la Tabla 29, para el tamaño L se tienen cinco casos los cuales representan a cuatro niveles. El nivel repetido, que corresponde al 1571, variando el alto del caserón. Para el caso tamaño 2L se tienen once casos los cuales representan a 4 niveles. Para los niveles 1560, 1540 y 1571 existen tres diferentes anchos de veta, los



cuales quedan registrados en la tabla. Sin embargo, debido a que solo se evalúan las paredes del HW y FW tales dimensiones no altera en el cálculo de RH. Los valores de N' están dado como fuente de información proporcionada por la operación, los cuales están determinados a partir de la calidad y condiciones de la roca a distintos niveles.

Debido a que la base de datos cuenta con un número N' por cámara según nivel para el sector BON, se realizó un análisis de todos los N' disponibles para así determinar el que se ajustaba mejor a la base de datos proporcionada.

### 3.3.1.1. Tamaño L

Para el tamaño L se cuenta con dos RH: 3.9 y 2.7, así se tiene lo siguientes resultados:

RH = 3.9	
N'	ELOS
2.4	1
3.3	0.7
4.8	0.5
5.1	0.4
7	0.3
PROM	<b>0.58</b>

Tabla 30: ELOS y N' para RH=3.9

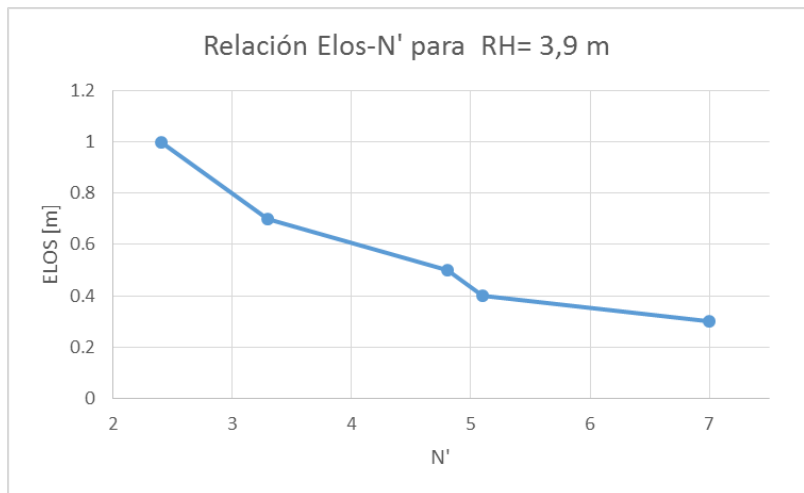


Figura 25: Relación N' y ELOS. RH= 3.9

RH = 2.7	
N'	ELOS
2.4	0.7
5.1	0.4
PROM	<b>0.55</b>

Tabla 31: ELOS y N' para RH=2.7

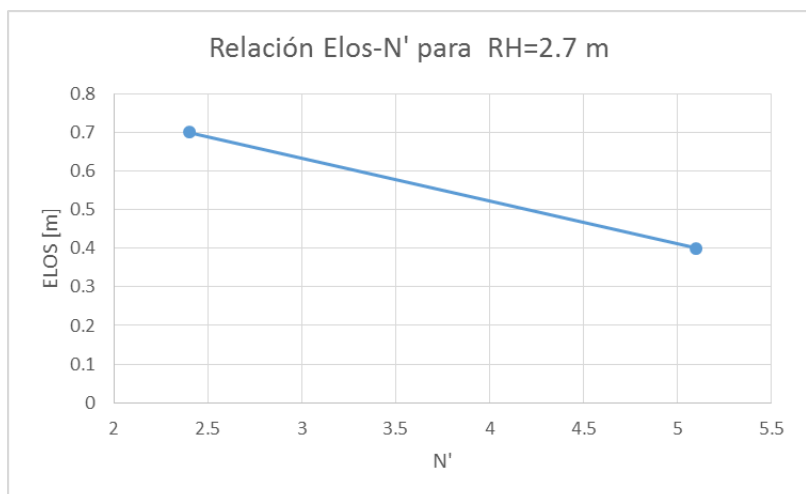


Figura 26: Relación N' y ELOS. RH=2.7

A partir de la estimación gráfica de ELOS se tiene:

	Nivel	RH (HW/FW)	ELOS	Vol. Observa	DIP	Area. Project	ELOS FINAL	TON	TON TOTAL
<b>Caseron 1</b>	1560	3.89	0.45	109.35	65	268.1208	0.41	257.6724	515.3447
	1560	3.89	0.45	109.35	65	268.1208	0.41	257.6724	
<b>Caseron 2</b>	1571	2.72	0.4	50.912	65	140.4379	0.36	119.969	239.9381
	1571	2.72	0.4	50.912	65	140.4379	0.36	119.969	
<b>Caseron 3</b>	1528	2.72	0.4	50.912	65	140.4379	0.36	119.969	239.9381
	1528	2.72	0.4	50.912	65	140.4379	0.36	119.969	

Tabla 32: Resultados dilución Tamaño L.

Como se observa en Tabla 32 existen tres tipos de caserones considerados, con su respectivo RH. La columna ELOS representa el valor obtenido de manera gráfica, como se muestra en “Anexo H: Gráficos calculo ELOS”. Luego se estima un volumen observado correspondiente al área de la pared y el ELOS estimado. Posteriormente se considera una DIP de 65, para lo cual se calcula un área proyecta. Si divide el volumen proyectado por el área proyecta y se obtiene un ELOS Final que corresponde al ELOS “proyectado”. Por último con el ELOS final se determina el tonelaje incluido al caserón por cada pared y finalmente el TON TOTAL corresponde al tonelaje total incluido en el caserón.

### 3.3.1.2. Tamaño 2L

Al igual que el tamaño L se tiene el mismo procedimiento. Para el tamaño 2L se consideran dos RH: 5.2 y 3.3.

<b>RH = 5.2</b>	
<b>N'</b>	<b>ELOS</b>
2.4	1.5
3.3	1
4.8	0.6
5.1	0.6
7	0.5
<b>PROM</b>	<b>0.84</b>

Tabla 33: Relación N' y ELOS. RH=5.2

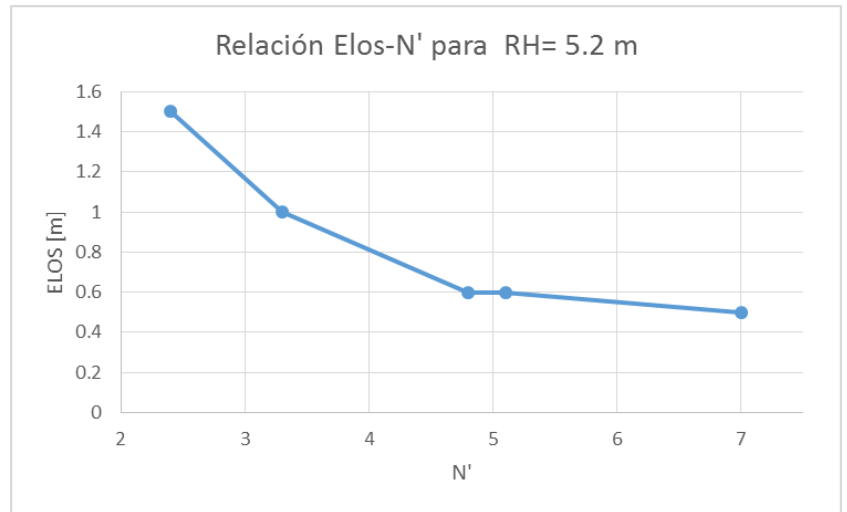


Figura 27: Relación gráfica ELOS y N', RH=5.2

RH = 3.3	
N'	ELOS
2.4	0.5
5.1	1
PROM	<b>0.75</b>

Tabla 34: Relación N' y ELOS. RH=3.3

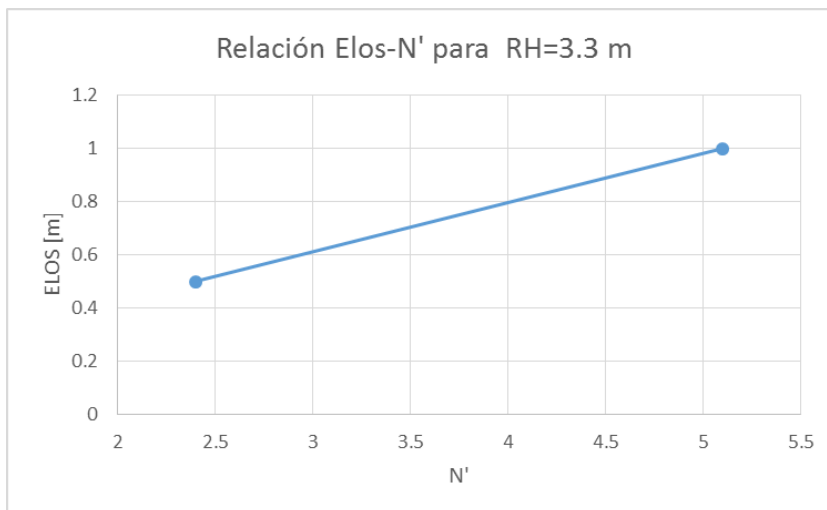


Figura 28: Relación gráfica ELOS y N, RH=3.3

A partir de la estimación gráfica de ELOS se tienen los siguientes resultados:

	Nivel	RH (HW/FW)	ELOS	Vol. Observa	DIP	Area. Project	ELOS FINAL	TON	TON TOTAL
Caseron 1	1560	5.22	0.7	336	65	529.6214	0.63	791.7505	1583.500966
	1560	5.22	0.7	336	65	529.6214	0.63	791.7505	
Caseron 2	1571	3.34	0.5	129	65	284.6715	0.45	303.9756	607.9512635
	1571	3.34	0.5	129	65	284.6715	0.45	303.9756	
Caseron 3	1528	3.34	0.5	129	65	284.6715	0.45	303.9756	607.9512635
	1528	3.34	0.5	129	65	284.6715	0.45	303.9756	

Tabla 35: Resultados dilución Tamaño 2L.

El procedimiento es exactamente el mismo descrito anteriormente para el caso tamaño L.

### 3.3.2. Resultados plan de producción

Construida la nueva base de dato se ingresa a la herramienta UDESS para determinar el plan de producción óptimo. Se trabaja con un proyecto correspondiente al sector BON para el mes de diciembre 2013 al cual se le imponen los siguientes resultados al modelo:

Caso	L/2		L		2L	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
<b>Tonelaje [ton/mes]</b>	10,000	18,000	10,000	18,000	18,000	30,000
<b>Relleno seco [m3/mes]</b>	0	8,000	5,500	7,700	1,000	8,000
<b>Relleno cementado [m3/mes]</b>	0	2,000	500	1,000	500	2,000
<b>Metros perforación[m/mes]</b>	1,500	7,000	3,000	5,000	500	5,000

Tabla 36: Restricción modelo implementación UDESS.

La base de datos de cada uno de los casos está constituido por el siguiente número de caserones:

Caso de Estudio		Número
L/2	Cantidad Caserones	33
L	Cantidad Caserones	19
2L	Cantidad Caserones	10

Tabla 37 Número de caserones por base de datos.

Es importante destacar que para cada caserón existen posteriormente las actividades de relleno cementado y seco, según lo señalado en la base de datos de entrada.

En base a estas restricciones es posible desarrollar las evaluaciones al modelo de optimización para el cual se obtienen los siguientes resultados:

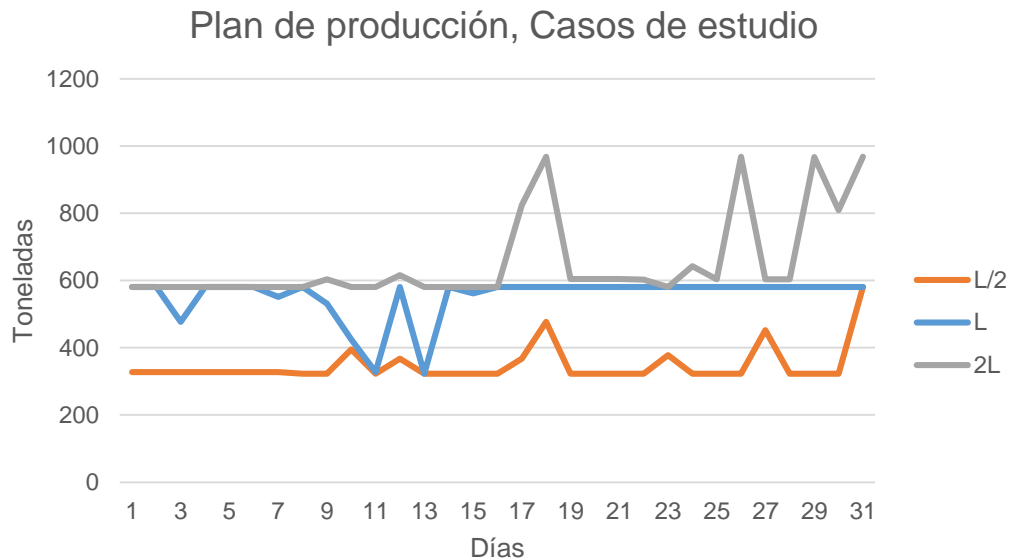


Figura 29: Plan de producción evaluación impacto dilución.

En donde el beneficio para cada una de las evaluaciones está dado por:

Caso de estudio	Beneficio [US\$]	Gap [%]	Tiempo [S]
L/2	4,176,268.01	0.936	283.48
L	7,647,675.41	1.44	79.8
2L	7,327,210.32	2.536	422.98

Tabla 38: Beneficio de los modelos.

El número de actividades ejecutadas en el periodo de evaluación se detallan en la siguiente tabla:

<b>Casos de Estudio</b>		<b>Número</b>	<b>Cumplimiento [%]</b>
<b>L/2</b>	Actividades totales	142	59.1
	Actividades realizadas	84	
<b>L</b>	Actividades totales	79	88.6
	Actividades realizadas	70	
<b>2L</b>	Actividades totales	68	82.3
	Actividades realizadas	60	

**Tabla 39: Actividades realizadas en torno a actividades totales**

De los resultados se puede desprender que para el caso L/2 el periodo de evaluación se hace acotado para cumplir con las actividades de extracción y relleno, por tanto la herramienta deja de realizar actividades. Lo que ocurre para el caso 2L se puede interpretar a que las actividades tienen disponibilidad de tiempo para poder realizarse en este periodo de evaluación, por lo que se decide realizar prácticamente todas las actividades. Es este mismo efecto el que genera un salto producción en el ritmo de tonelaje extraído en el plan de producción, ya que si bien se encuentra dentro de los rangos establecidos como restricción puede tener la libertad de tener estas sinuosidades debido a que las reservas disponibles en relación a su capacidad productiva permiten ejecutar el plan en un menor periodo de tiempo. Finalmente se tiene el caso correspondiente al tamaño L el cual si bien no ejecuta la totalidad de sus actividades, si permite realizar una secuencia de extracción con el mejor beneficio de los tres casos. En la siguiente sección se realiza un análisis detallado de la secuencia de extracción para cada uno de los casos evaluados.

### 3.3.3. Validación resultados

A partir de los resultados obtenidos se puede realizar los siguientes comentarios a partir de la secuencia obtenida.

#### 3.3.3.1. Cumplimiento de actividades

Considerando el número total de actividades según la clasificación dada por las cinco clases de actividades presentes en el modelo propuesto, se tienen los siguientes porcentajes de actividades no realizadas para cada uno de los casos propuestos:

ACTIVIDAD	% Actividades no realizadas		
	L/2	L	2L
DRIFT	0.0	0.0	0.0
BENCH	48.5	21.1	18.2
RS	60.5	12.5	30.8
RC	55.6	37.5	22.2
PERFO	0.0	0.0	0.0

Tabla 40: Porcentaje de actividades no realizadas según caso de estudio

De la Tabla 40 se observa que el mayor porcentaje de no realización se centra para el caso de estudio correspondiente al tamaño L/2. Estos valores tienen sentido con el beneficio obtenido para el plan generado para este caso, el cual es considerablemente menor a los otros dos.

Para el caso de los drift y la perforación es posible ver que se realiza la totalidad de sus actividades en los tres casos de evaluación. Caso opuesto ocurre con las actividades de “bench”, “relleno RS” y “relleno RC” las cuales para el caso del menor tamaño de caserón en estudio presenta el mayor número de actividades no realizadas. Esto se debe principalmente al aumento de actividades de relleno las cuales pasan de 74 actividades de relleno para el caso L/2 a 24 para el tamaño L y 22 para el tamaño 2L. Éste considerable aumento en el número de actividades para el caso L/2 genera un retraso en el agendamiento de las actividades de extracción, y del posterior relleno, y es la razón por la cual no se cumple la totalidad de las actividades.

#### 3.3.3.2. Actividades en ejecución según periodo

El aumento de las actividades de relleno para el caso L/2 junto con generar que el beneficio sea menor producto que retrasa la extracción de los caserones, genera que la secuencia de extracción sea diferente.

En los siguientes gráficos es posible observar el número de actividades en ejecución para 4 periodos distintos:  $t=1$ ,  $t=10$ ,  $t=20$  y  $t=31$ . Es necesario aclarar que para  $t=10$  se tienen las actividades en ejecución desde el día 2 al día 10 y similar con los otros casos, además de que el número de actividades corresponde a aquellas actividades contabilizadas que se encuentran en ejecución y no representan la fracción que se está llevando a cabo.

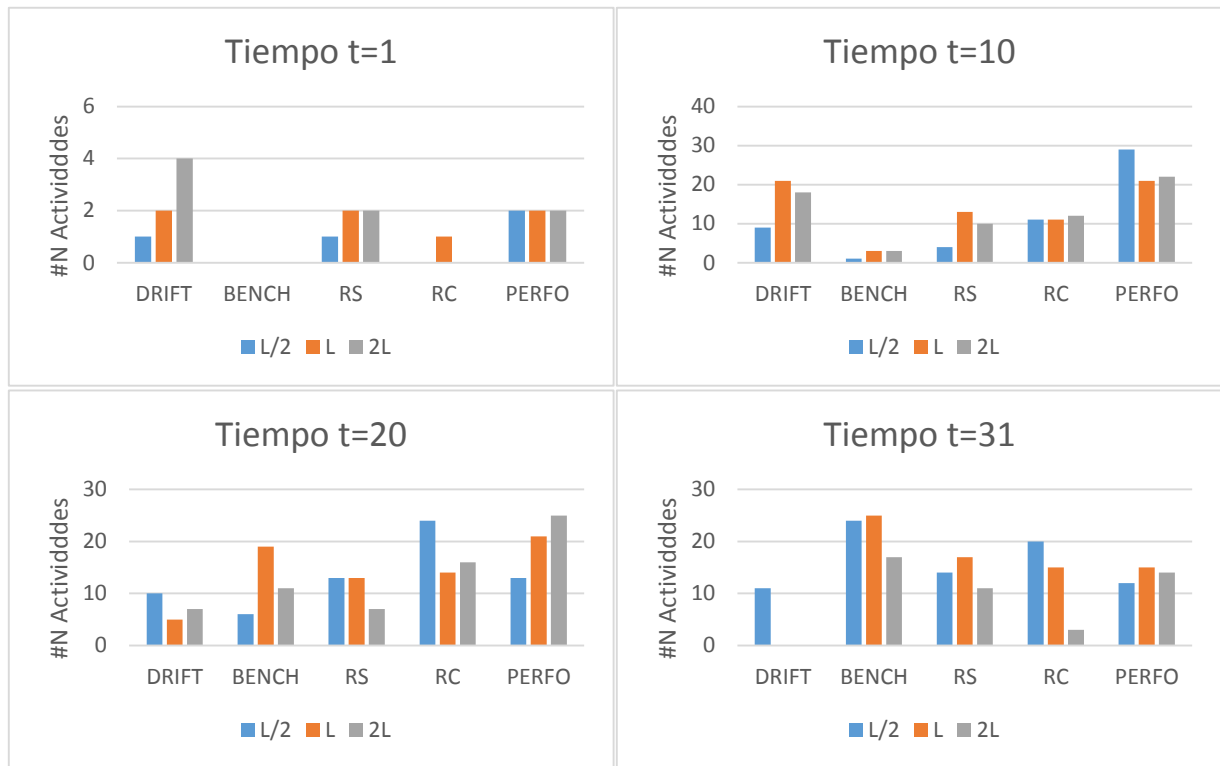


Figura 30: Número de actividades en ejecución según periodo de tiempo.

En la Figura 30 se observa que para el caso L/2 existe una baja ejecución de actividades de extracción durante los primeros periodos, centrandose su extracción casi al final del periodo de evaluación, lo que genera que quede alto número de actividades sin agendarse ya que no alcanza a realizar el relleno y posterior extracción. Para los casos L y 2L se observa una tendencia similar de las actividades en ejecución, sin embargo presenta un mayor número de extracción de bench debido a que el tonelaje de sus caserones no está tan contaminado con material estéril como si ocurre para el caso 2L.

Por otro lado, es posible realizar el mismo análisis pero considerando la fracción de actividad realizada en cada periodo. Así se tiene la siguiente tabla:

ACTIVIDADES DESARROLLADAS DURANTE PERIODO t=1,10,20 y 31				
DIA	ACTIVIDAD	L/2	L	2L
1	DRIFT	1.0	1.6	1.8
	BENCH	0.0	0.0	0.0
	RS	0.5	1.1	0.6
	RC	0.0	0.8	0.0
	PERFO	1.0	0.6	0.6
10	DRIFT	8.6	14.1	11.5
	BENCH	1.0	1.0	4.0
	RS	1.5	5.2	4.4
	RC	1.9	0.8	2.6
	PERFO	10.3	6.1	5.2
20	DRIFT	4.8	1.3	3.7
	BENCH	6.0	6.6	13.8
	RS	6.0	3.3	2.0
	RC	6.7	0.9	3.4
	PERFO	4.2	5.7	7.3
31	DRIFT	2.6	0.0	0.0
	BENCH	10.0	14.8	21.2
	RS	8.0	4.4	2.0
	RC	6.5	2.5	1.1
	PERFO	3.6	6.6	5.9

Tabla 41: Conteo fracción de actividades desarrolladas.

Siguiendo la misma lógica de los gráficos anteriores, se expresa las actividades realizadas según cuatro periodos de tiempo. Para la Tabla 41 se tiene el acumulado de fracciones de actividad realizadas en el periodo señalado. Se observa que la tendencia es la misma expresada en Figura 30 donde para el caso L/2 hay un claro retraso de las actividades de extracción de bench producto de las actividades de relleno, dejando la extracción de bench para los últimos días del periodo de evaluación.



### 3.3.3.3. Comparación secuenciamiento

Finalmente, se realiza una comparación de la secuencia obtenida con la herramienta. Se observa que al comparar los primeros 5 días de evaluación se tiene más del 50% de similitud entre las tres secuencias comparadas. Esto quiere decir que la herramienta tiene una decisión similar al inicio de la extracción propuesta. Realizando el mismo análisis pero a partir de los últimos 10 días de evaluación, se observa que menos del 30% se repite en las tres secuencias, en particular se observa que la única similitud entre actividades realizadas corresponden a actividades de perforación.

A partir de lo anterior es posible comentar que si bien tiene un inicio similar las tres secuencias, durante el transcurso del periodo de evaluación se producen cambios generados por las decisiones que debe tomar dada las distintas actividades presentes. Se refleja nuevamente el efecto generado para el caso L/2 donde la presencia de actividades de relleno retrasa la extracción de los caserones con mineral.

	ACTIVIDAD	1	2	3	4	5	...
L/2	BON_N_1520_K_DR	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	BON_N_1651_N_PERFO	0.54	0.46	0.00	0.00	0.00	0.00
	BON_C_1651_AP_RS	0.46	0.46	0.09	0.00	0.00	0.00
	BON_NN_1500_ZR_DR	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	BON_NN_1520_E_DR	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
	BON_N_1651_M_PERFO	0.00	0.09	0.54	0.37	0.00	0.00
	BON_NN1_1560_YQ_DR	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00
L	BON_NN_1500_ZZ_DR	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	BON_NN_1520_E_DR	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	BON_N_1651_N_PERFO	0.35	0.18	0.47	0.00	0.00	0.00
	BON_NN1_1560_YQ_DR	0.59	0.00	0.00	0.41	0.00	0.00
	BON_NN_1500_ZR_DR	0.00	0.77	0.00	0.00	0.00	0.00
	BON_N_1520_K_DR	0.00	0.00	0.64	0.36	0.00	0.00
2L	BON_NN_1500_ZZ_DR	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	BON_N_1651_N_PERFO	0.54	0.46	0.00	0.00	0.00	0.00
	BON_NN_1520_E_DR	0.32	0.68	0.00	0.00	0.00	0.00
	BON_C_1651_AP_RS	0.09	0.46	0.46	0.00	0.00	0.00
	BON_N_1651_M_PERFO	0.00	0.09	0.54	0.37	0.00	0.00

Tabla 42: Actividades repetidas en los tres casos, primero 5 días del periodo.

En la Tabla 42 se encuentran las actividades ejecutados los primeros 5 días del periodo de evaluación y que se repiten entre los 3 casos. El listado de las actividades completas realizadas en los primeros cinco días está disponible en “Anexo I: Secuencia de extracción casos estudio”.

Para el los últimos 10 días se tienen los siguientes resultados:

	ACTIVIDAD	...	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	
L/2	BON_NN_1660_E_PERFO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	<b>0.04</b>	<b>0.26</b>	<b>0.45</b>	0.26	0.00	0.00
	BON_NN_1660_F_PERFO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	<b>0.44</b>	<b>0.56</b>	
L	BON_NN_1660_E_PERFO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	<b>0.68</b>	<b>0.32</b>	0.00	0.00	0.00	0.00
	BON_NN_1660_F_PERFO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	<b>0.34</b>	<b>0.66</b>	0.00	0.00	0.00
	BON_C_1651_AK_PERFO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	<b>0.39</b>	<b>0.32</b>	<b>0.29</b>
2L	BON_NN_1660_E_PERFO	0.00	0.00	0.00	<b>0.43</b>	<b>0.57</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	BON_NN_1660_F_PERFO	0.00	0.00	0.00	0.00	<b>0.21</b>	<b>0.79</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	BON_C_1651_AK_PERFO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	<b>0.45</b>	<b>0.05</b>	<b>0.31</b>	<b>0.19</b>	0.00	0.00	

Tabla 43: Extracción último 10 días periodo de evaluación

En Tabla 43 es posible observar las actividades de secuencia que se repiten en los tres casos evaluación (el listado completo se encuentra en Anexos). Se tiene que las actividades son únicamente perforación. Esto se debe a que son las únicas actividades que no se ven afectados por la extracción y los rellenos corresponden a los drift y la perforación, por eso es posible lograr similitud en las comparaciones.

### 3.3.4. Impacto de la dilución en la elaboración del plan

Evaluando el impacto que tiene la dilución en la elaboración del plan es posible obtener el siguiente gráfico:

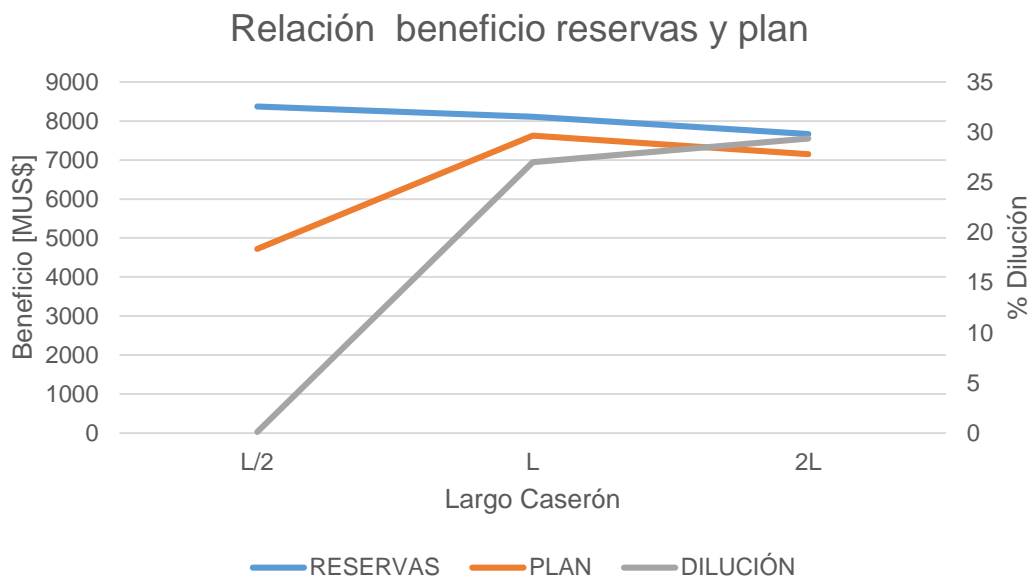


Figura 31: Relación beneficio reservas y plan

En la Figura 31 se observa el beneficio obtenido por el las reservas y el beneficio del plan obtenido en la sección anterior. El beneficio de las reservas corresponde a la valorización de todas las actividades que están destinadas a ser extraídas, en base a los parámetros de evaluación antes mencionados, en cambio el beneficio del plan está dado por la valorización del plan obtenido a través de la herramienta UDESS.

Analizando únicamente las reservas, se observa que para un tamaño menor de caserón se obtiene un mayor beneficio, a diferencia de lo que ocurre evaluando el plan donde el mayor beneficio está entregado para un largo de caserón L. En este caso, más que un efecto económico provocado por el aumento de la cantidad de relleno utilizado, la diferencia de beneficio se debe a un efecto ocasionado por la capacidad operacional que se tiene para ejecutar las actividades.

A partir de lo anterior se puede observar que al analizar el impacto de la dilución se tiene que las decisiones en cuanto al diseño del caserón cambian según correspondan a una evaluación de la envolvente o al plan. Si bien la tendencia de la curva de beneficio para el caso del tamaño L y 2L se ve similar entre las reservas y el plan, existe una diferencia mayor de beneficio para la evaluación realizada según el plan.

## 4. ANÁLISIS

### 4.1. Metodología construcción planes de producción

Luego de realizar una serie de etapas desde comenzar por simples ejemplos que convergieron a evaluación de proyectos con más de un criterio en su evaluación, es posible observar que la realización de planes de producción no es tarea fácil.

Una vez realizados los modelos y su posterior evaluación en UDESS fue posible encontrarse constantemente con actividades que de acuerdo al plan real de la mina evaluada, estaban planificadas a ser realizadas durante el periodo de evaluación pero que la herramienta no las ejecutaba. Estos resultados ponían en cuestionamiento el modelo que se estaba desarrollando debido a que el método se basa en una fuente de datos que está destinada a ser cumplida en su totalidad. Analizando los resultados, es posible observar que ocurrieron tres fenómenos:

- En primer lugar existen actividades que no tienen asociadas sus precedencias a alguna actividad que genera valor. Por tanto, toda la secuencia productiva de esa secuencia es un costo, por lo que la herramienta decide no realizarlas.
- Otro caso que ocurre es que existen actividades que no son extraídas pero que si representan un beneficio para el negocio. Como se mencionó anteriormente, la base de datos dada para la evaluación representa las reservas definidas por la mina en estudio. Al ser estas definidas de manera arbitraria en base a parámetros operacionales no necesariamente representan la mejor opción de extracción para el mes en evaluación. Por tanto, la herramienta opta por no extraerla y por ende no programarla en su secuencia de extracción dado a que no forma parte de una solución óptima del problema.
- Y por último, las actividades propuestas a desarrollar durante el periodo de evaluación no se pueden ejecutar dada la capacidad operacional que tiene restringida a las actividades (*"max rate"*).

A partir de estas tres tendencias, queda demostrado en este estudio que efectivamente las reservas destinadas para un periodo de tiempo no parecen ser la mejor opción como respuesta al proceso minero en análisis. Esto se debe principalmente a que la definición de reservas por periodo está basada en temas diseño y de operatividad del proceso minero.

En cuanto al impacto que tiene el considerar la dilución dentro de los planes de producción, se observa que si genera interferencia en los resultados obtenidos. Debido a que la dilución hoy es considerada como un parámetro "constante" de acuerdo a ciertas características de la calidad de las reservas, no es posible apreciar con exactitud su impacto en las labores futuras. En este estudio se hizo un simple análisis de evaluar los beneficios a partir de la envolvente económica de las reservas y luego a la evaluación económica del plan y se encontraron de inmediato diferencias. Esto se debe a que efectivamente el tener la dilución considerada dentro de la evaluación de un plan de

producción junto con manifestarse de acuerdo a su efecto en la evaluación económica también se ve reflejada en la toma de decisiones para la realización de actividades y a la interferencia que genera la ejecución de cada una de ellas, ya que el material estéril disponible también se considerado como un elemento a agendar.

## **4.2. Uso de modelos matemáticos para la elaboración de planes de producción**

Como se mencionó en capítulos iniciales el uso de modelos matemáticos para la decisión de diseños y planificación minera ha sido desarrollado en gran detalle para minería a cielo abierto. Se han hecho una serie de metodología que permiten encontrar hoy en día el pit óptimo para ser extraído. Para el caso de la minería subterránea aún no se crean herramientas de uso común para aplicar estas técnicas. Si bien ha estado la curiosidad y con el paso del tiempo ha tomado mayor potencialidad, recién hoy en día existen herramientas que logran resolver en cierta medida lo que se hace ya hace muchos años en minería a cielo abierto.

Si se analiza el desarrollo de modelos matemáticos para minería subterránea, estos resultan ser una herramienta bastante eficiente a la hora de tener que encontrar soluciones óptimas a problemas. Debido a la alta incertidumbre que existe en yacimientos de este tipo por la poca certeza de los recursos, es que muchas veces se utiliza como solución simulaciones para poder dar respuestas a ciertas dudas. Si bien las simulaciones ayudan a encontrar tendencia y sirven para utilizarlas como referencia en ciertos casos, hay situaciones, como la planificación minera, en donde generar planes simulados puede tardar considerables sumas de tiempo y recursos y las soluciones no será un plan que entregue certeza en el tiempo.

Como se pudo apreciar en el trabajo presentado, el modelo está basado en una serie de variables de decisiones binarias o enteras las que relacionadas de acuerdo a restricciones específicas del método proporcionan las instancias para generar un planteamiento que tiene como objetivo maximizar la función objetivo.

Si bien aún queda tarea pendiente, es importante mencionar las ventajas de contar con herramientas de este tipo:

- Permite evaluar problema con una alta cantidad de interacciones en periodos de tiempo acotados.
- El modelo es ajustable de acuerdo a los requerimientos solicitados. Esto proporciona que el abanico de opciones donde se puede implementar es bastante alto.
- Es capaz de encontrar soluciones óptimas a problemas que muchas veces no son evaluados bajo esta premisa.

De acuerdo a lo observado en el estudio, modelamientos matemáticas son capaces de integrar diferentes factores en la evaluación de un plan, pudiéndose evaluar en casos de operaciones reales y entregando soluciones en tiempo razonables.

Es posible esperar mejoras en su construcción, como crear nuevas variables más eficientes, también se espera en su uso, como el crear listado de actividades específicas y precedencias claras y no recursivas, pero sin lugar a duda la base para el desarrollo a los problemas de la minería subterránea se encuentra en base a estas técnicas.

## 5. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

A partir del estudio es posible desprender que el uso de optimización matemática mediante la aplicación de herramientas computacionales como lo es UDESS ayuda a la producción y elaboración de planes mineros y secuenciamiento, pero principalmente, aporta en el desarrollo de análisis que se pueden generar a partir de los resultados obtenidos, favorecidos además por el bajo costo en tiempo que tiene su elaboración.

De acuerdo a lo planteado en los objetivos de este trabajo se buscaba establecer una metodología que permitiera proveer de distintas alternativas de secuenciamiento, integrando multicriterios en su evaluación. Como se pudo observar en el transcurso del informe existe una secuencia de actividades que se deben realizar para lograr una correcta elaboración de plan de producción. Es primer lugar determinar una buena fuente de datos de entrada, la que será la base de nuestra planificación, es de vital importancia. El tener claro el secuenciamiento que se sigue de acuerdo al método de operación minera utilizado también resulta ser esencial para conocer las precedencias a ingresar al modelo. Posteriormente, tener claro los criterios a considerar en la evaluación resulta clave para generar un plan que sea completamente representativo de las condiciones de la operación. Y por último, ser capaz de interpretar los datos proporcionados por la herramienta de manera de traducir resultados en eventuales modelos operacionales. De esta forma, es posible hacer uso de sistemas integrados de evaluación que permiten identificar a tiempo temprano eventuales impactos que se tienen en la toma de decisiones.

Evaluando de manera puntual la realización del trabajo desarrollado es posible destacar que la definición de la base de datos es una tarea fundamental. En las evaluaciones realizadas se reflejaron diferentes análisis pero todos destinados a periodos de evaluación de un mes, por lo que su base de datos era bastante acotada. Esto sin lugar a dudas limitó fuertemente los análisis que se pudiera haber realizado debido a que no existía una gran variedad de decisiones por parte de la herramienta propuesta, debido a que las actividades a realizar estaban más bien rígidas. Por ejemplo, considerando la misma evaluación del caso de un bench and fill pero ahora no en corto plazo sino en largo plazo, definiendo como base de entrada las reservas disponibles en el yacimiento y manteniendo secuencia de extracción propia del método, es de esperar que los resultados y las decisiones cambien. Al tener una base de datos acotadas uno restringe por donde comenzar y debido a las precedencias, por donde continuar. Para un caso de mayor dimensión, es decir con mayor número de actividades, donde existe diferentes puntos de entrada y cada uno deriva a una camino de actividades y precedencias distinto, la herramienta tiene muchas más opciones para poder seleccionar una alternativa que se ajuste mejor a las limitantes impuestas entregando la mejor solución cercana a un óptimo.

Referente a lo mismo, para este estudio se tenía a disposición una base de datos dispuesta en un archivo "Excel" la que limita fuertemente a la hora de querer utilizar los datos. A su vez, genera complicaciones y un trabajo largo a la hora de construir las precedencias, lo cual se torna una tarea prolongada y tediosa (muchísimo más largo que las propias evaluaciones del plan). Por tanto, dentro de las consideraciones importantes

a extraer desde este punto es la generación de fuentes de información que estén disponibles en formatos computacionales muchos más genéricos y que permitan hacer uso eficiente de ellas. Así lo menciona en el trabajo realizado por (Rocher, 2012) donde se disponía de un inicio del proyecto muy similar al aquí presentado pero en el cual la fuente de información estaban digitalizadas mediante el software Mine-2D el cual permitía extraer el listado de actividades y sus posteriores precedencias de manera mucho más eficiente.

Este estudio junto con evaluar nuevas herramientas para el desarrollo de planes de producción, buscaba identificar criterios que son relevantes para la elaboración de los planes. Como se mencionó anteriormente, con el fin de simplificar la tarea de realizar los planes muchas veces se omiten criterios únicos y relevantes que tienen un impacto directo o indirecto en la efectiva realización del plan. Por ejemplo, en este caso se evaluó el criterio de relleno que, para este tipo de extracción, es de vital importancia para mantener la continuidad de la producción y de la secuencia. Existieron criterios que no fueron considerados de manera detallada, como lo son los métodos de extracción de drift, las variaciones de extracción de bench o los destinos a los cuales se envía el material extraído, los cuales se proponen ser considerados en trabajos futuros.

Otro criterio que resulta interesante mencionar corresponde a los métodos de extracción de bench. En la faena utilizada para el estudio utilizan la técnica del “under cut”. Esta técnica hace relación a que el caserón es perforado y extraído por la parte inferior de éste y luego queda la cavidad abierta. Esto genera una seguidilla de complicaciones, entre las que se destacan:

- Modificación del ritmo de extracción del caserón, afectando directamente en la planificación.
- Posibilidad de fatiga de material generando subsidencias de sectores y dejando inoperativos sectores de la mina.

El segundo punto sin lugar a dudas es el que más impacta. La estrategia de trabajo realizada hoy en la operación se basa en poder extraer las mejores leyes que se encuentren al alcance de los operadores. Cuando se enfrentan con caserones con estas características no se evalúa de manera detallada la posibilidad de poder realizar continuidad de trabajo en niveles superiores, por lo que se extrae ya que en el momento genera buenas condiciones para el negocio. Un mal manejo de estas cavidades puede provocar el colapso y el cierre de sectores que pueden estar planificados para extracciones futuras. Por lo tanto, este tipo de técnicas que permiten extraer riquezas hoy pero sin medir las consecuencias que traerán en el futuro, demuestran las falencias existentes en el concepto de optimización y la necesidad de tener herramientas que permitan evaluar este tipo de análisis.

En cuanto al criterio geomecánico considerado, la dilución, toma gran relevancia a la hora de elaboración de un plan en particular para minería selectiva. Hoy en día su aplicación se basa en asignar un valor constante de dilución el cual es obtenido mediante datos históricos y con esto se determina el posible material estéril a mover. Esta técnica



si bien es usada de manera genérica y es la forma más práctica de representar la dilución dentro de los planes, para el caso de minería selectiva no parece ser una buena solución. El impacto que tiene la dilución en la extracción de vetas es considerable. Se pudo observar a través del estudio realizado que la dilución junto con afectar el tonelaje de material estéril introducido, genera nuevas actividades a considerar en el proceso. En el caso evaluado, este efecto fue representado únicamente por la creación de nuevas actividades de relleno, pero se puede ver afectado por la creación de actividades de fortificación, de limpieza, tiempos de espera, etc. A partir de los resultados obtenidos quedó demostrado que el beneficio para el plan obtenido por UDESS y el beneficio obtenido a partir de la envolvente de reservas, son diferentes. Esto lleva a concluir que la dilución si genera variación en los resultados obtenidos, los cuales se ven reflejados en aspectos de secuencia a seguir como en decisiones de diseño. Si bien la evaluación fue bastante genérica e integró simples y acotados criterios, es de esperar que al incluir más limitantes que representen de manera aún más certera las condiciones del medio en las cuales se implementará el plan generado, se tengan diferentes opciones de secuenciamiento que permitan al planificador evaluar de mejor manera la continuidad de la operación en base a evaluaciones robustas.

Es importante dejar en claro que la dilución representa un parámetro acotado cuando se habla de geomecánica en minería subterránea. Existe una serie de consideraciones importante que resultan ser cruciales en la toma de decisiones de la continuidad de la operación. La calidad de la roca, asociada a los esfuerzos que se van modificando producto de las nuevas cavidades o desarrollos que se van construyendo, resultan ser aspectos importantes que necesitan una atención particular. Si bien dentro de este estudio no se hace un análisis profundo a estas consideraciones, la metodología propuesta si contribuye a poder replantear las decisiones a tomar en base a evaluaciones previas e impidiendo que la continuidad de la extracción se limite a decisiones operacionales.

Como se menciona durante el trabajo, en la literatura existen diversos autores que hablan de lograr resolver los planes de producción de minería subterránea con ayuda de modelo matemáticos para obtener resultados óptimos, sin embargo no le hacen hincapié a la importancia de considerar los criterios que el proceso minero que envuelve.

Es importante destacar el uso de este tipo de herramientas para la toma de decisiones en la elaboración de planes de producción. Una de las grandes complejidades que tiene la planificación para minería subterránea es la incertidumbre que existe respecto a las reservas existentes. Esto conlleva a que las decisiones tomadas tengan un grado de riesgo bastante alto a la hora de ejecutar los planes. El poder hacer uso de herramientas que permitan anteponerse a las posibles variaciones que se presentan en la operación, contribuyen a un ahorro de tiempo en la toma de decisiones, a un estado de alerta informado del riesgo operacional que se pueda generar, a una minimización de costo por inconveniente no programados, entre otros; complementado así los criterios económicos y operacionales hoy utilizados.

## 6. RECOMENDACIONES

Debido a que este trabajo corresponde a un aporte en relación a la gran gama de opciones con las cuales se puede mejorar el proceso, cabe destacar mencionar las siguientes recomendaciones como trabajo futuro.

Dada la gran diferencia que existe entre los planes de largo plazo en relación a los de corto plazo en minería selectiva, es necesario en primer lugar realizar planes de largo plazo que interactúen más con la información de corto plazo proporcionada de manera histórica. A su vez, los planes de corto plazo presentan variadas modificaciones producto de las variaciones que se van presentando en la operación, por lo que necesidad de reconstruir planes es constante. Es así, como se plantea mejorar las técnicas de almacenamiento de información, de manera que interactúen de forma directa con herramientas similares a la propuesta en este estudio, de manera de generar planes en forma rápida y que asegure la continuidad exitosa de la extracción. A esto, considerar la posibilidad de integrar la dilución como un parámetro “a tiempo real”, es decir, que sea una representación de las reales de las condiciones del yacimiento y no una aproximación, de manera que los planes generados estén contruidos a partir de datos lo más preciso posible.

Por otro lado, se plantea hacer este estudio mucho más extensivo en términos de variables y criterios a evaluar, respondiendo al alto números de interacciones presentes en minería selectiva. Si bien el incremento en el número variables puede aumentar considerablemente el tiempo de resolución del problema, esta evaluación puede entregar una mirada general de sucesos que podrían ocurrir en la operación y que vale la pena tenerlos en consideración a la hora de generar un plan o tomar decisiones respecto a formas de extracción (construcción de Bench “*under cut*”).

Referente a la herramienta, se propone realizar modificaciones al modelo de manera de generar la opción de poder elegir cuánto es el rango de fracción de actividad que se puede ejecutar por periodo, evitando así las tasas muy bajas que entregaron en este trabajo. Esta idea apunta a poder asegurar que lo planificado según la herramienta sea factible operacionalmente.

Finalmente, se recomienda el uso de técnicas matemáticas de optimización que permitan resolver los diversos problemas asociados a la planificación minera de tal forma de aprovechar los recursos disponibles para así lograr los mejores resultados en las extracción de proyectos, considerando que en el futuro sus dimensiones seguirán creciendo, por ende el número de variables a interactuar también aumentará y las técnicas utilizadas hasta el día de hoy serán muy ineficientes.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- A. Hustrulid, W., & L. Bullock, R. (2001). *Underground Minig Methods*. SME.
- Barbaro, R., & Ramani, R. (1986). Generalized multiperiod MIP model for production scheduling and processing facilities selction and location. *Mining Engrg*, 38(2), 107-11.
- Bley, A., & Terblanche, S. (2011). An improved formulation of the underground mie scheduling optimization problem qhen considering selective mining.
- Capes, G. (2009). *Open stope hangingwall design based on general and detailed data collection in rock masses with unfavourable haningwall conditions*. PhD thesis. University of Saskatchewan.
- Carlyle, M., & Eaves, C. (2001). Underground Planning at Stillwater Mining Company. *Interfaces*, 31(4), 50-60.
- Clark, L. M. (1998). *Minimizing dilution in open stope mining with a focus on stope design and narrow vein longhole blasting*. Master of Applied Science, University of British Columbia, Department of Minig and Mineral Process Engineering.
- Clark, L., & Pakalnis, R. (1997). An empirical design approach for estimating unplanned diluton from open stope hangingwalls and footwalls. *99th Anual AGM-CIM conference*. Vancouver.
- Darling, P. (2011). *Mining Engineering Handbook* (3rd ed., Vol. Two). United States of America: SME.
- Henning, J., & Mitri, H. (2007). Numerical modelling of ore dilution in blasthole stoping. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 45(5), 692-703.
- Karzulovic, A., & Alfaro, M. (2004). *MassMin*. Santiago.
- Kazakidis , V., & Scoble, M. (2003). Planning for flexibility in underground mine production systems. *Mining Engineering*, 55(8), 33-38.
- Kutch, M., Newman, N., & Topal, E. (2003). Production Scheduling at LKAB's Kiruna Mine using mixed-integer programming. *Mining Engineering*, 35(4), 35-40.
- Lerchs, H., & Grossman, I. (1964). Optimum design of open-pit mines. *In OPERATIONS RESEARCH*, 12, B59.
- Mah, S. (1992). *Quantification and prediction of wall slough in open stope mining methods*. Master of Applied Science, University of British Columbia, Department of Mining and Mineral Process Engineering.

- Mathews, K., Hoek, E., Wyllie, D., & Stewart, S. (1980). Prediction of stable excavations for mining at depths below 1000 metres in hard rock. *CANMET*, (págs. 802-1571).
- Mclsaac, G. (2005). Metal mining long-term planning of an underground mine using mixed-integer programming.
- Milne, D. (1997). *Underground design and deformation based on surface geometry*. PhD. Thesis, University of British Columbia, Department of Mining and Mineral Process Engineering.
- MineMax. (2006). *Minemax Software Pty Ltd*. Recuperado el 11 de Diciembre de 2014, de <http://www.minemax.com/>
- Nehring, M., Topal, E., Kizil, M., & Knights, P. (2012). Integrated short-and medium-term underground mine production scheduling. *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 112, 365-378.
- Newman, A., Rubio, E., Caro, R., Weintraub, A., & Eureka, K. (2010). A Review of Operations Research in Mine Planning. *Journal Interface*, 40(3), 222-245.
- Potvin, Y. (1988). *Empirical open stope design in Canada*. PhD. Thesis, University of British Columbia, Department of Mining and Mineral Process Engineering.
- Razaman, S. (2007). The new Fundamental Tree Algorithm for production scheduling on open pit mines. *European Journal of Operational Research*, 177, 1153-1166.
- Rocher, W. (2012). *Secuenciamiento óptimo de preparación minera*. Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería de Minas.
- Rubio, E. (2007). *Tópicos avanzados de Planificación Minera*. Universidad de Chile.
- Scoble, M., & Moss, A. (1994). Dilution in underground bulk mining: implications for production management. *Geological Society, London, Special Publications*, 79(1), 95-108.
- Topal, E. (2008). Early start and late start algorithms to improve the solution time for long-term underground mine production scheduling. *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 108(2), 101-107.
- Trout, L. (1995). Underground mine production scheduling using mixed integer programming. In *25th International APCOM Symposium, Melbourne*. The Australian Institute on Mining and Metallurgy, 395-400.
- Wright, E. (1983). Dilution and Mining Recovery-Review of the Fundamentals, *Erzmetall*, (págs. 23-29).

## 8. ANEXOS

### 8.1. Anexo A: Factores geomecánicos

De acuerdo a lo descrito en la sección ANTECEDENTES, los gráficos utilizados para determinar el factor A, B y C son los siguientes:

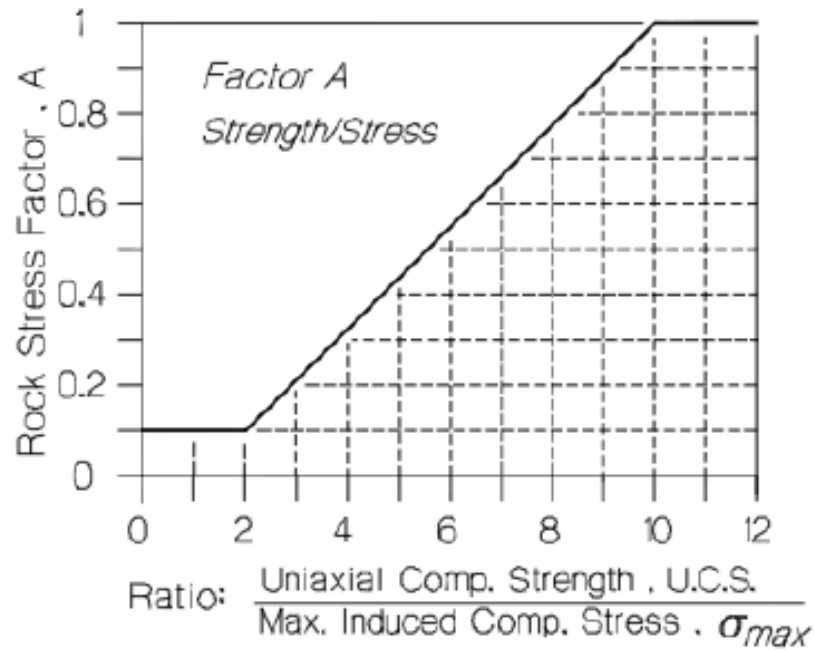


Figura 32: Gráfico de estimación del factor A (Mathews, Hoek, Wyllie, & Stewart, 1980).

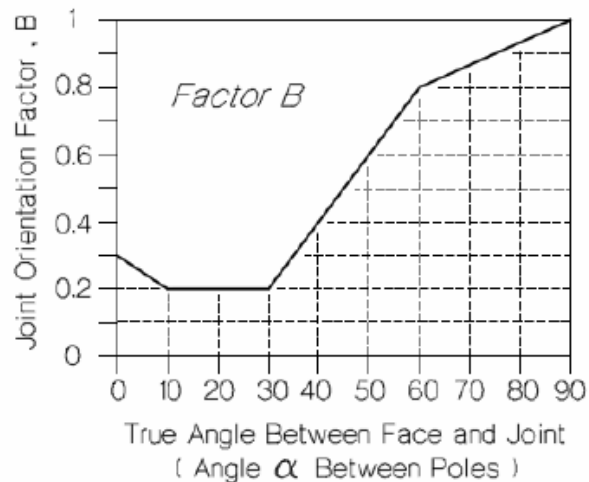


Figura 33: Defecto de la orientación de la roca, Factor B (Mathews, Hoek, Wyllie, & Stewart, 1980)

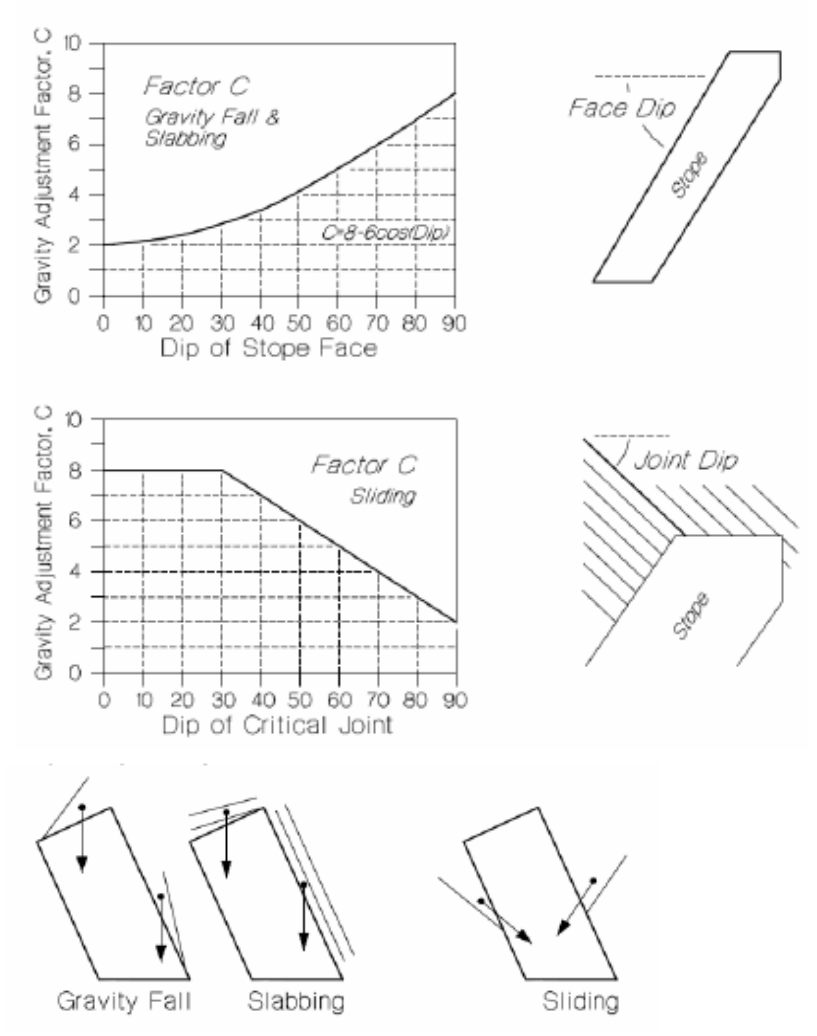


Figura 34: Grafico para la estimación de la inclinación de la superficie del caserón, Factor C (Mathews, Hoek, Wyllie, & Stewart, 1980).

## 8.2. Anexo B: Formulación modelo matemático

### 8.2.1. Esquema comportamiento variables

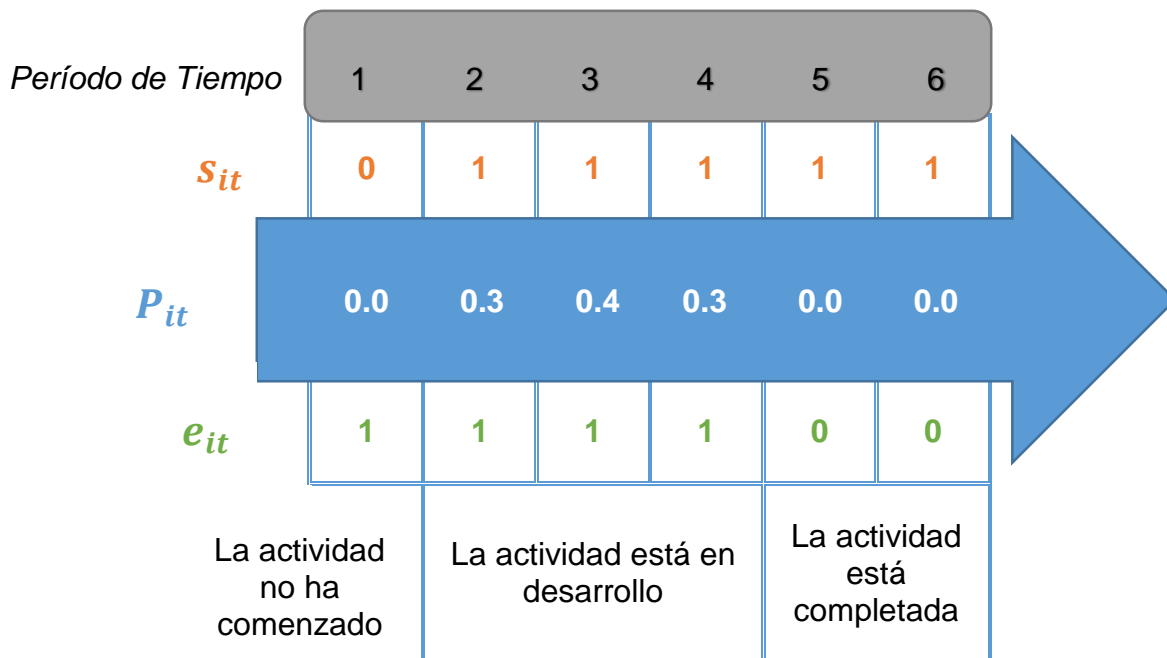


Figura 35: Descripción de las variables principales del modelo (Rocher, 2012).

### 8.2.2. Variables del modelo

Existe una serie de variables de decisión que determinan el modelo, destacándose las tres siguientes:

- La variable principal del modelo la cual es del tipo continuo y se define según:

$p_{it}$ : Porcentaje de la actividad  $i$  realizada en el periodo  $t$

- Se definen variables del tipo binarias para señalar el inicio y término de una actividad:

$$s_{it} \begin{cases} 1, & \text{actividad } i \text{ ha comenzando en periodo } t \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases}$$

$$e_{it} \begin{cases} 1, & \text{actividad } i \text{ no ha terminado en periodo } t \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases}$$

$$\Delta s_{it} = \begin{cases} s_{i1}, & t = 1 \\ s_{it} - s_{it-1}, & t > 1 \end{cases} \quad \Delta e_{it} = \begin{cases} e_{i1} - e_{it+1}, & t \geq 1 \\ e_{it}, & t = T \end{cases}$$

Considerando las variables anteriormente señaladas se describen a continuación otras variables específicas del modelo aplicado.

$\tau_{it}$ : Tiempo consumido en  $t$  por la actividad  $i$  y sus predecesores.

$$\mu_{ipt} = \begin{cases} 1, & \text{si el grupo } P \in P(i) \text{ ya se ha completado en el periodo } t \text{ y} \\ & \text{fue el primer grupo predecesor de } i \text{ en finalizar} \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases}$$

Como se observa  $\tau$  corresponde a una variación aplicada a la variable  $t$ , donde ahora se integran los predecesores. En tanto,  $\mu$  corresponde a una variable binaria que brinda la información sobre las actividades predecesoras terminadas en el periodo  $t$ .

### 8.2.3. Restricciones modelo

Las restricciones corresponden a las limitaciones propias del método que se deben aplicar al modelo para poder hacer un problema que cumpla con los requerimientos solicitados.

En primer lugar se describen las restricciones estructurales, las que representan restricciones básicas que le dan sentido al modelo. Así se tiene:

$$\sum_{t=1}^T p_{it} \leq 1, \quad (\forall i \in A)$$

Esta restricción limita a realizar máximo el cien por ciento de la actividad.

$$\Delta s_{it} \geq 0, \quad \Delta e_{it} \geq 0, \quad (\forall i \in A), (t = 1, \dots, T)$$

En la restricción anterior se impone que debe un único inicio y término para cada actividad.

$$p_{it} \leq s_{it}, \quad (\forall i \in A), (t = 1, \dots, T)$$

Ésta última obliga a la actividad haber sido declarada iniciada antes de desarrollarse.



Adicionalmente en la siguiente restricción plantea que una actividad podrá ser declarada terminada únicamente cuando se ha desarrollado cien por ciento de sí misma.

$$1 - e_{it} \leq \sum_{s \leq t} p_{is}, \quad (\forall i \in A), (t = 1, \dots, T)$$

El porcentaje de desarrollo máximo de la actividad  $i$  en el periodo  $t$  es  $k_t * v_{\max i}$ . Sin embargo, es necesario tener en consideración que una actividad puede tener la capacidad de desarrollarse más de una vez en un periodo, para evitar dicho escenario se plantea la siguiente restricción:

$$p_{it} \leq \min\{k_t * v_{\max i}, 1\}, \quad (\forall i \in A), (t = 1, \dots, T)$$

El valor  $k_t$  corresponde a una corrección que se realiza para generar homogeneidad en la dimensión de los parámetros. Se tiene que  $p_{it}$  se encuentra en porcentaje, mientras que  $v_{\max i}$  corresponde a unidades de longitud o de masa por unidad de tiempo.

Luego es necesario crear la restricción que señala el porcentaje de desarrollo mínimo de la actividad  $i$  en el periodo  $t$ . Se expresa de la siguiente manera:

$$p_{it} - s_{it} - e_{it} \geq -2 + v_{\min i}, \quad (\forall i \in A), (t = 1, \dots, T)$$

Es posible observar que cuando la actividad  $i$  ya ha comenzado en el periodo  $t$  y al mismo tiempo no ha finalizado se cumple que  $s_{it} + e_{it} = 2$ , por tanto la restricción se "activa" y se reduce a una cota mínima para el porcentaje de la actividad realizado  $p_{it} \geq v_{\min i}$ . En cualquier otro caso, por ejemplo cuando la actividad  $i$  ya ha comenzado en  $t$  y puede finalizar en ese periodo ( $s_{it} + e_{it} = 1$ ), la restricción se traduce en  $p_{it} \geq -1 + v_{\min i}$ , es decir, queda sin efecto y no produce alteraciones en el modelo.

Por otro lado se tienen las restricciones correspondientes a los recursos disponibles. Esta restricción está definida ya que no es posible que todas las actividades trabajen a tasa máxima de avance al mismo tiempo debido a que usualmente mientras más actividades se realizan conjuntamente, menor es el rendimiento de cada una por separado. En la Figura 36 se observa esquemáticamente lo planteado.

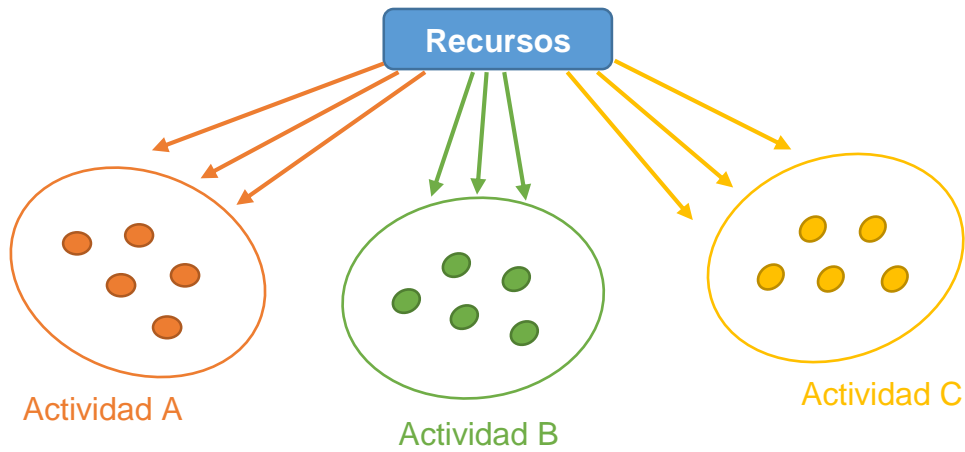


Figura 36: Restricciones de recursos (Rocher, 2012).

Así se define la restricción que limita los recursos utilizados de acuerdo a la disponibilidad de éstos en cada periodo.

$$\sum_{i \in A} c_i^r * p_{it} \leq R_t^r, \quad (i \in A), (r \in R), (t = 1, \dots, T)$$

El parámetro  $R_t^r$  corresponde a la cantidad de recursos  $r$  en un periodo de tiempo  $t$  y  $c_i^r$  denota la cantidad de recursos  $r$  que necesita la actividad  $i$ .

Es importante notar que la restricción tiene gran versatilidad, pudiendo ser aplicada entre otros casos a:

- Una condición de presupuesto al interpretar  $c_i^r$  por costos y  $R_t^r$  por la cantidad del presupuesto total disponible;
- Una condición de consumo de material al interpretar  $c_i^r$  como la cantidad de concreto consumo y  $R_t^r$  la cantidad de concreto que es posible producir para las labores mineras;
- Una condición de utilización de equipos al transformar  $c_i^r$  en cantidad de horas de un equipo a utilizar en la actividad y  $R_t^r$  la cantidad de horas disponibles de un equipo en el periodo  $t$ .

Posteriormente se mencionan las restricciones de precedencia, las cuales hacen relación con que una actividad  $i$  no puede realizarse libremente ya que no puede ser declaradas iniciadas sin haber sido realizado algunos de sus grupos de precedencias (como se observó anteriormente en la Figura 13. Así la siguiente restricción nos dice que un grupo de precedencias  $P \in P(i)$  puede etiquetarse como finalizado en el periodo  $t$  cuando todas las actividades que pertenecen a él están terminadas.

$$\mu_{iPt} \leq 1 - e_{jt}, \quad (\forall i \in A), (t = 1, \dots, T), (j \in P), (P \in P(i))$$

Luego se tiene en la siguiente restricción que la actividad  $i \in A$  podrá comenzar solamente cuando algunos de los grupos de precedencias hayan finalizado.

$$s_{it} \leq \sum_{P \in P(i)} \mu_{iPt}, \quad (\forall i \in A), (t = 1, \dots, T)$$

Se definen nuevas restricciones de tiempo, la cual para cada una de las actividades  $i \in A$  durante el periodo  $t$ , no pueden superar la duración de éste:

$$\tau_{it} \leq k_t$$

En un modelo inicial se planteó la restricción de caminos la cual responden al impedimento generado cuando las actividades posteriores se realizan sin considerar el tiempo consumido por sus predecesores, así plantea que el tiempo acumulado por cualquier secuencia de actividades predecesoras a  $i \in A$  no puede superar la duración del periodo. En el modelo propuesto se tiene que la variable  $\tau_{it}$  tiene un impacto similar al que tenía tal restricción.

Es así como se definen actividades raíces y actividades hojas. Las actividades raíces corresponde a una actividad  $i \in A$  que no tiene actividades que la preceden. En tanto las actividades hoja corresponden a las actividades  $i \in A$  que no preceden a ninguna actividad. Se define así los siguientes conjuntos:

$$A_R = \{i \in A: i \text{ es raíz}\}$$

$$A_L = \{i \in A: i \text{ es hoja}\}$$

Para las actividades  $i \in A$  que son raíces, el tiempo consumido en el periodo  $t$  está dado por la siguiente restricción:

$$\tau_{it} = \frac{1}{v_{\max i}} p_{it}, \quad (\forall i \in A_R), (t = 1, \dots, T)$$

La justificación es que la actividad  $i$  puede realizar a lo más un porcentaje de  $v_{\max i}$  por mes, por tanto en forma proporcional el tiempo que le tomará realizar un porcentaje de  $p_{it}$  será justamente  $\frac{p_{it}}{v_{\max i}}$ .

Finalmente, para las actividades que no son raíces, se agrega un término adicional que nos permite controlar en qué casos deseamos que la restricción sea válida. Se considera la siguiente expresión:

$$M(1 - u_{iPt}) + \tau_{it} \geq \tau_{jt} + \frac{1}{v_{\max i}} p_{it}, \quad (\forall i \in A_R^c), (t = 1, \dots, T), (j \in P), (P \in P(i))$$

$$p_{it} \geq 0, \tau_{it} \geq 0, s_{it} \in \{0,1\}, e_{it} \in \{0,1\}, \quad (\forall i \in A), (t = 1, \dots, T)$$

$$\mu_{it} \in \{0,1\}, \quad (\forall i \in A), (t = 1, \dots, T), (P \in P(i))$$

En esta expresión  $M > 0$  corresponde a una constante adecuada. Así la restricción solo se “activará” para el grupo que se completa en primer lugar, ya que se anula el término adicional, entonces la actividad  $i$  tendrá en consideración el tiempo que le queda disponible para realizarse parcial o totalmente tomando en cuenta lo utilizado por el grupo de predecesor finalizado. En cualquier otro caso la restricción debe ser trivial de manera que no tenga participación en el modelo. Para ello, es suficiente escoger la constante  $M$  igual a la duración del periodo,  $M = k_t$ , ocasionando que la restricción se desactive.

#### 8.2.4. Función Objetivo

La función objetivo se define de acuerdo a los requerimientos necesarios del método. Dependiendo de las condiciones del negocio o de los requerimientos propios de cada compañía es posible encontrar funciones como maximizar recursos, maximizar fono, minimizar costos, etc.

La función objetivo al siguiente modelo planteado se basa en la maximización del valor presente neto (VPN o VAN). Su definición está dada por la siguiente expresión, dada por los conceptos anteriormente definidos:

$$VPN = \sum_{t=1}^T \beta^{\gamma t} \sum_{i \in A} (v_i * p_{it} - v_i^+ \Delta s_{it} - v_i^- \Delta e_{it})$$

Donde  $\beta = \frac{1}{(1+\alpha)^{1/2}}$ ,  $\alpha$  es la tasa de descuento anual y  $\gamma_t = \sum_{s \leq t} k_s$  es el tiempo acumulado hasta el periodo  $t$ , donde  $k_s$  es la duración en meses del periodo  $s$ .

### 8.3. Anexo C: Visualización UDESS

A continuación se describe un detalle de las distintas opciones y ventanas y opciones disponibles para la ejecución de la herramienta UDESS.

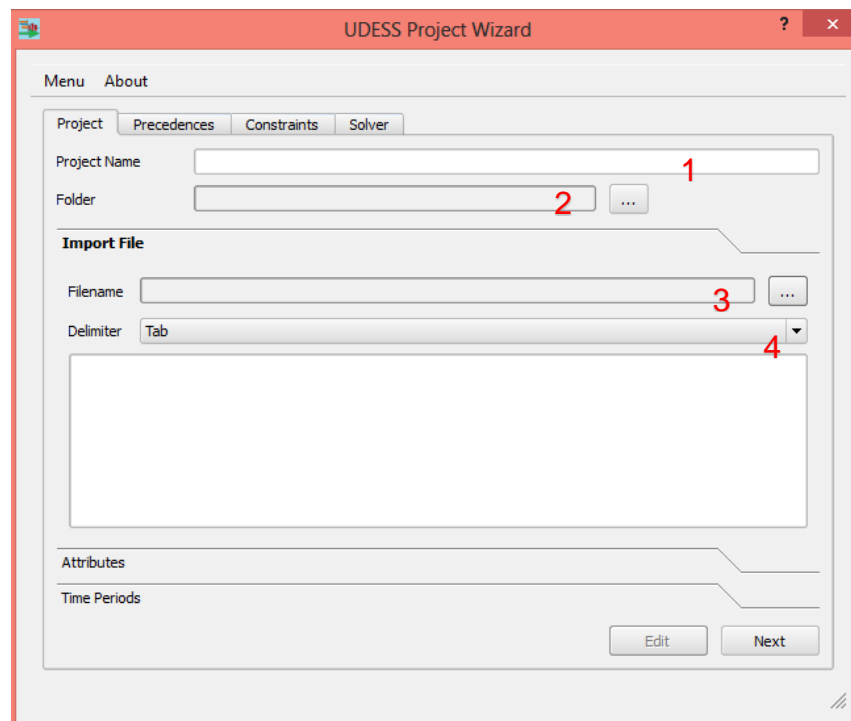


Figura 37: Interfaz gráfica UDESS (1).

La Figura 37 corresponde a la primera imagen con la que se presenta UDESS. Las funciones de las distintas casillas se dividen en dos secciones. En primer lugar en definir el proyecto y su ubicación (1 y 2) y luego “*Import File*” (3 y 4):

- (1) Se define el nombre del proyecto.
- (2) Se determina la carpeta donde se ubicará el proyecto y los archivos de salida.
- (3) Se busca el archivo de “Actividades” y se carga al proyecto.
- (4) Se define si el archivo de actividades está separado por “tab”, “,” , “;” o “space”.

Posteriormente se pasa a la sección “*Attributes*” en donde se asignan los atributos provenientes del archivo de entrada al proyecto.

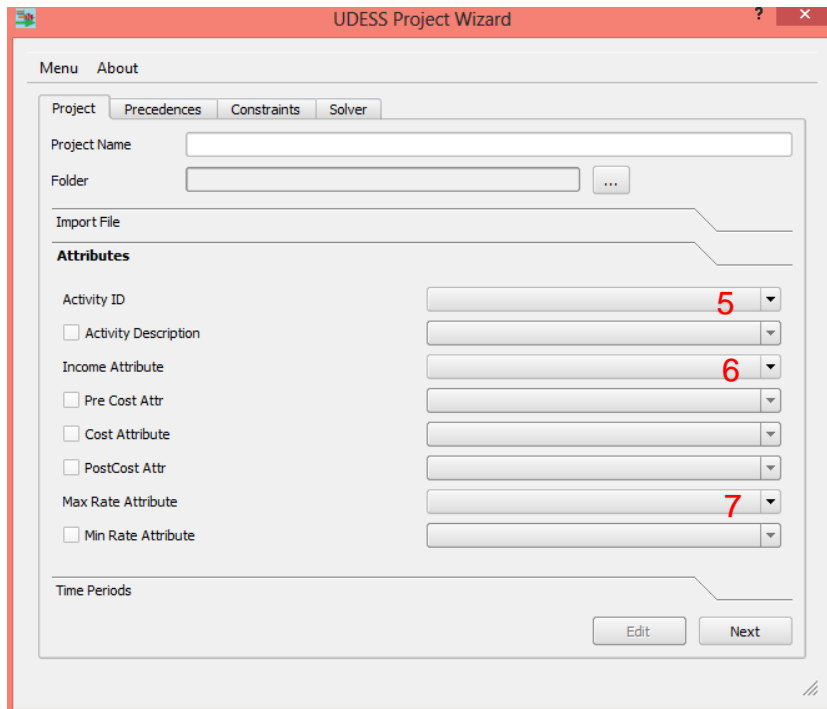


Figura 38: Interfaz gráfica UDESS (2).

- (5) Se identifica con el ID proveniente del archivo de entrada.
- (6) Se identifica el parámetro de ingreso proveniente del archivo de entrada. Las casillas de abajo se seleccionan según correspondan a los costos.
- (7) Se identifica el parámetro de tasa máxima definida en el archivo de entrada.

Finalmente en la pestaña “*Project*” se termina con la sección “*Time Periods*”.

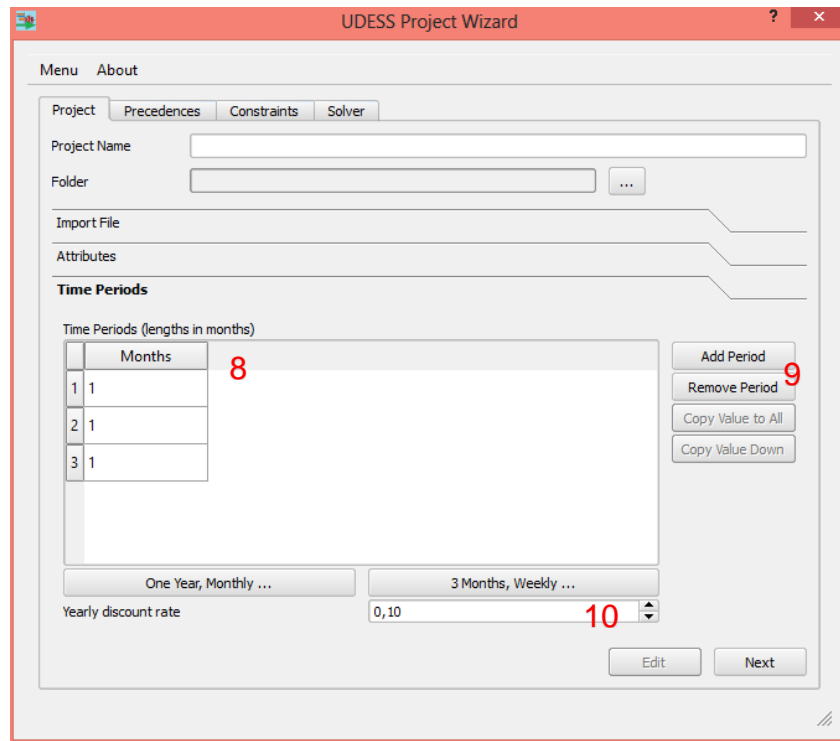


Figura 39: Interfaz gráfica UDESS (3).

- (8) Se define el número de periodos presentes en la evaluación del proyecto. Tienen un largo de meses. Si se desea hacer periodo menos a meses es necesario aplicar un factor de ajuste a cada casilla.
- (9) Corresponde a una serie de botones que facilitan la definición de los periodos. “Add Period” y “Remove Period” sirven para agregar y eliminar periodos respectivamente. “Copy value all” permite copiar el factor de ajuste asignado a una casilla a todas las casillas de tiempo creadas. “Copy value down” permite copiar el factor de ajuste a la casilla que está inmediatamente debajo de la selección.
- (10) Se define la tasa de descuento del proyecto. Es una tasa de descuento anual y se expresa en decimales.

Luego se presiona el botón “Next” y se sigue con la siguiente pestaña “Precedences”.

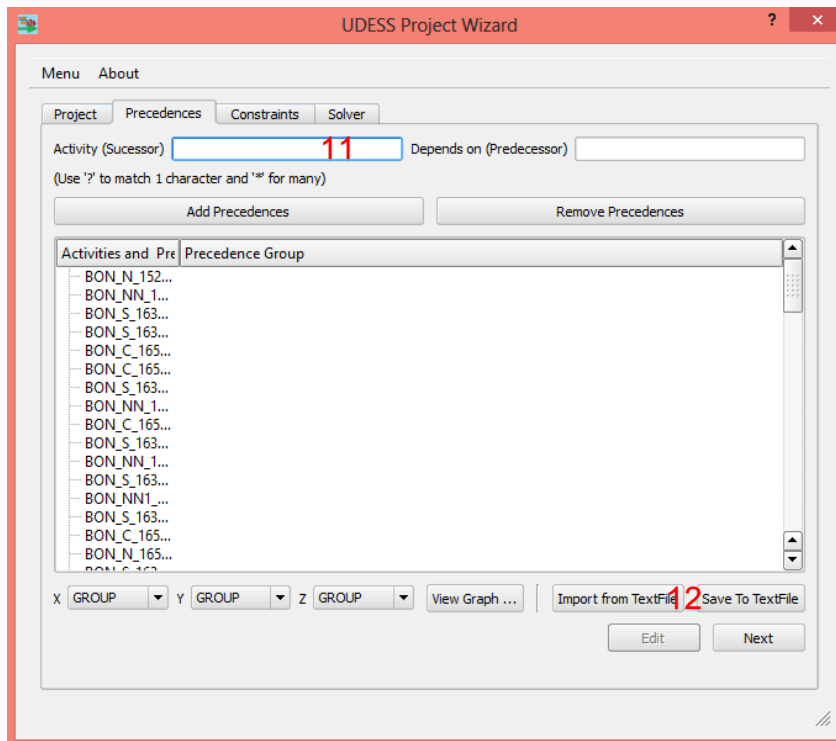


Figura 40: Interfaz gráfica UDESS (4).

Existen dos formas de agregar las precedencias. Las cuales se describen de acuerdo a los números:

- (11) Se va agregando las precedencias una a una. Se ingresa el ID de la actividad sucesora y el ID de la actividad predecesora y luego se presiona “*Add Precedences*”.
- (12) Se selecciona “*Import from TextFile*” y se selecciona el archivo de precedencias anteriormente descrito.

Luego se sigue por la pestaña “Constraints” la cual se observa en la siguiente figura:



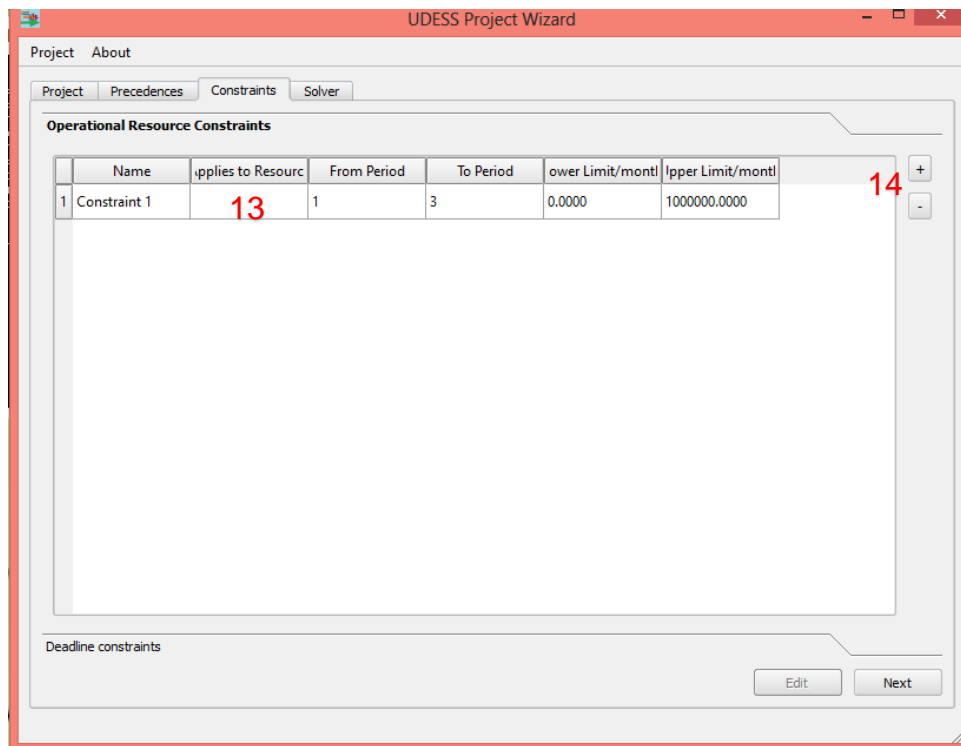


Figura 41: Interfaz gráfica UDESS (5).

En esta etapa de la preparación del proyecto se definen las restricciones impuestas al proyecto.

- (13) En esta sección se define cada restricción. Se determina un nombre, luego se define a que variable será impuesta, posteriormente se define el periodo al cual se iniciará la restricción y en cual terminará. Por último se define la cifra de restricción la cual está en unidades de [límite superior/mes]
- (14) Corresponden a dos botones que permiten crear o eliminar nuevas restricciones.

Una vez definidas las restricciones es posible pasar a la última etapa de preparación del proyecto para luego ser evaluado. Se tiene la siguiente imagen:

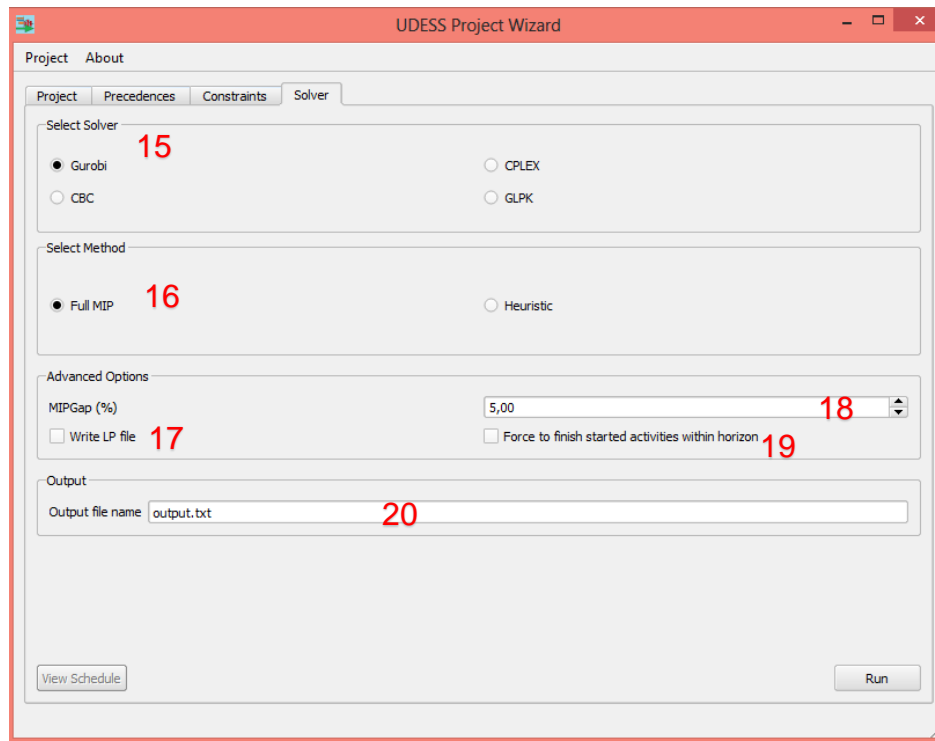


Figura 42: Interfaz gráfica UDESS (6).

En la pestaña “*Solver*” es posible encontrar las siguientes funciones:

- (15) Permite seleccionar el optimizador a ocupar para la evaluación. Para efectos de este trabajo únicamente se utilizará Gurobi.
- (16) Permite seleccionar el método de evaluación. Para efectos de este trabajo se utilizará únicamente “*Full MIP*”.
- (17) Al seleccionar esta opción es posible reportar el archivo .LP de la evaluación. Este archivo entrega detalles de las iteraciones realizadas.
- (18) Corresponde al GAP asignado para la evaluación. Se puede modificar de acuerdo a los requerimientos.
- (19) Al selecciona esta opción se fuerza a que una actividad iniciada deba ser finalizada.
- (20) Se describe el nombre del archivo de salida de la evaluación.

Finalmente se presiona el botón “*Run*” y comienza la optimización del problema.

## 8.4. Anexo D: Datos plan de referencia

### 8.4.1. Caso sin dilución

Ley1 g/ton		Caserón					
		1	2	3	4	5	6
Nivel	1	10.06	9.41	10.44	11.78	11.03	9.59
	2	9.87	10.02	11.27	9.97	9.6	9.69
	3	10.19	8.68	11.13	10.43	10.32	10.11
	4	9.31	9.49	10.61	10.52	10.16	9.14

Tabla 44: Leyes caserones sin dilución.

Beneficio Ley1 USD		Caserón					
		1	2	3	4	5	6
Nivel	1	151,360	126,802	149,420	93,208	214,264	133,742
	2	159,378	115,424	174,057	200,450	153,271	169,366
	3	84,934	83,931	247,288	220,168	115,205	119,347
	4	172,567	156,699	162,609	122,877	224,777	87,064

Tabla 45: Beneficio caserones sin dilución.

### 8.4.2. Caso dilución 45 %

Ley2 g/ton		Caserón					
		1	2	3	4	5	6
Nivel	1	4.09	3.77	4.18	4.74	4.37	3.85
	2	3.88	4.01	4.29	3.9	3.83	3.82
	3	4.05	3.44	4.41	4.17	4.17	4.04
	4	3.7	3.81	4.22	4.11	4.06	3.64

Tabla 46: Leyes caserones dilución 45%.

Beneficio Ley2 USD		Caserón					
		1	2	3	4	5	6
Nivel	1	22,743	14,631	23,115	18,178	35,792	16,640
	2	19,717	16,121	26,538	25,019	18,574	19,992
	3	12,055	6,031	42,020	33,808	17,958	16,963
	4	18,304	18,828	25,450	17,658	32,354	8,626

Tabla 47: Beneficio caserones dilución 45%.

#### 8.4.3. Caso dilución estimación teórica

Ley3 g/ton		Caserón					
		1	2	3	4	5	6
Nivel	1	4.86	4.26	5.13	5.24	5.06	4.59
	2	4.57	5.05	5.25	4.76	4.28	4.37
	3	4.34	3.78	4.91	4.99	4.64	4.65
	4	4.25	4.52	4.94	4.89	4.83	4.03

Tabla 48: Leyes caserones dilución teórica.

Beneficio Ley3 USD		Caserón					
		1	2	3	4	5	6
Nivel	1	39,332	24,376	42,283	23,507	54,282	31,737
	2	35,805	33,305	46,827	49,874	29,079	33,988
	3	15,497	11,085	57,293	58,220	25,389	27,252
	4	33,428	36,061	40,904	30,461	56,643	14,198

Tabla 49: Beneficio caserones dilución teórica.

## 8.5. Anexo E: Esquema yacimiento caso de estudio

A continuación se muestra el esquema en dos dimensiones del yacimiento a evaluar.

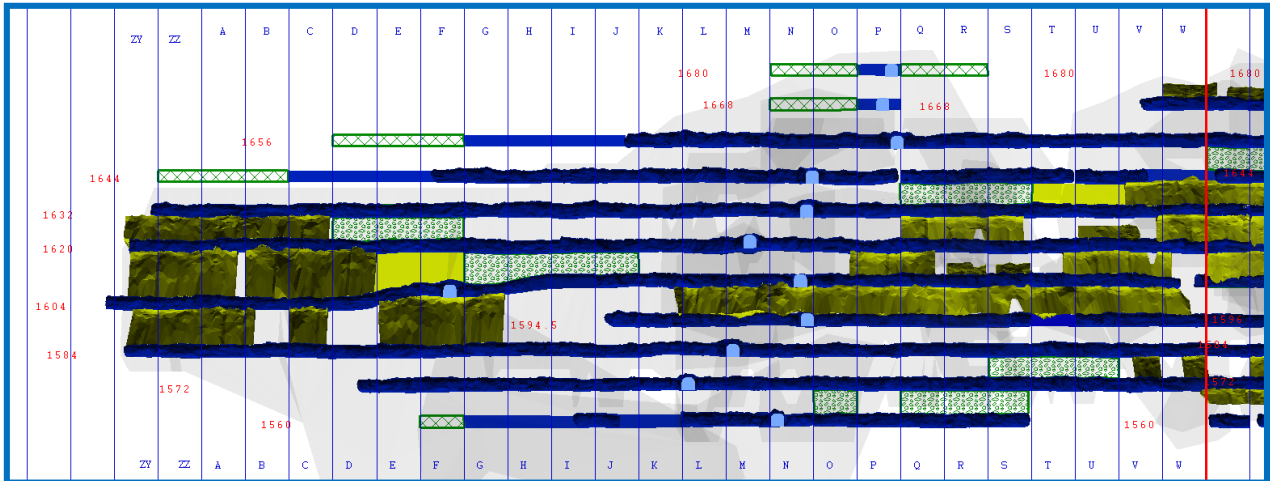


Figura 43: Esquema sector AES subsector Norte.

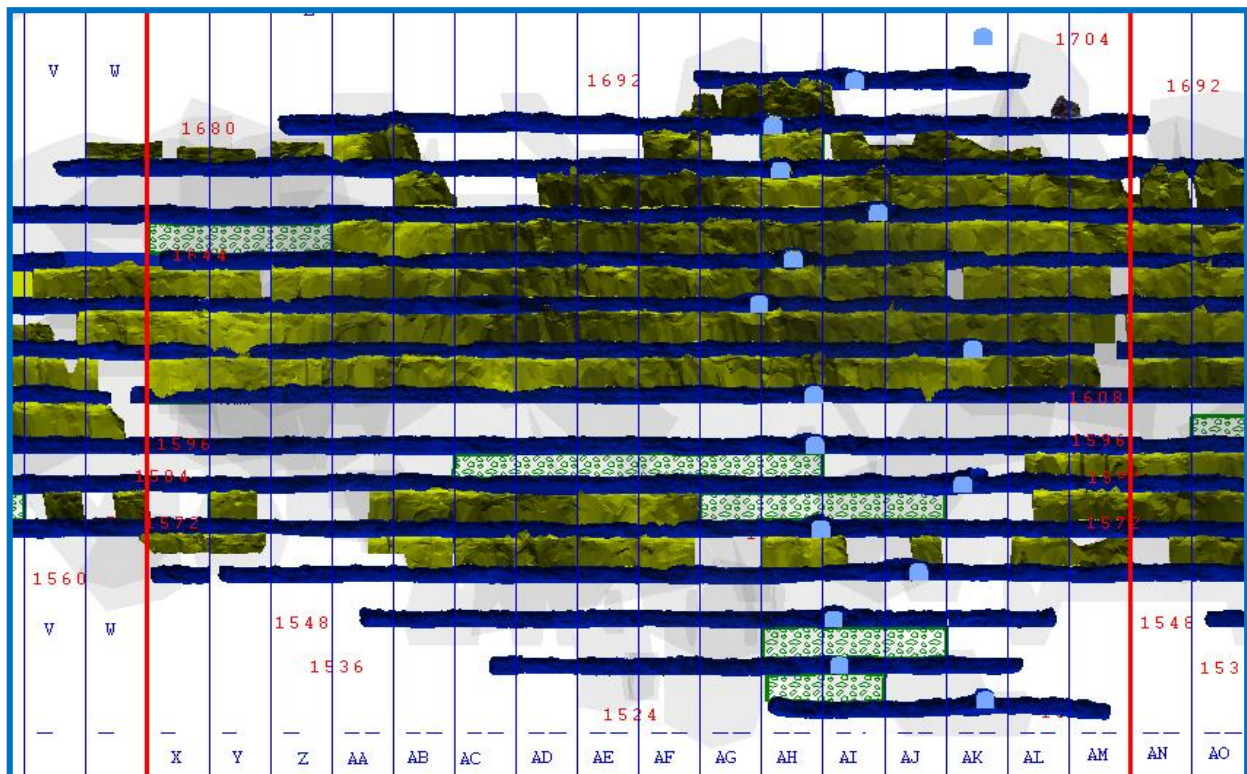


Figura 44: Esquema sector AES subsector Central.

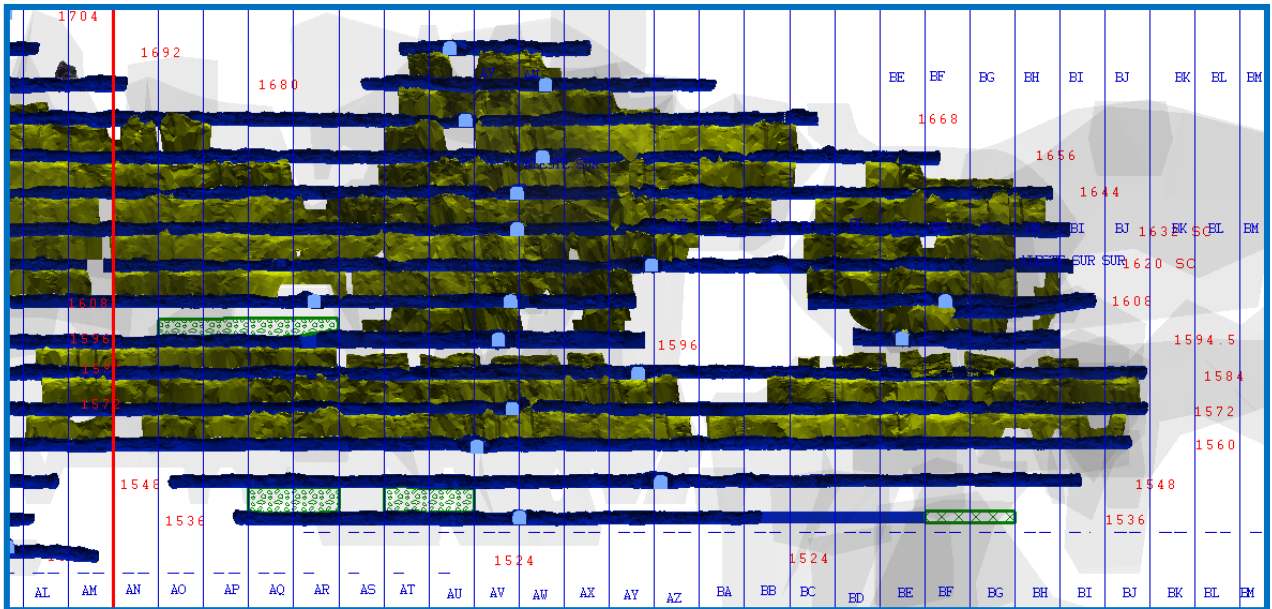


Figura 45: Esquema sector AES subsector Sur.

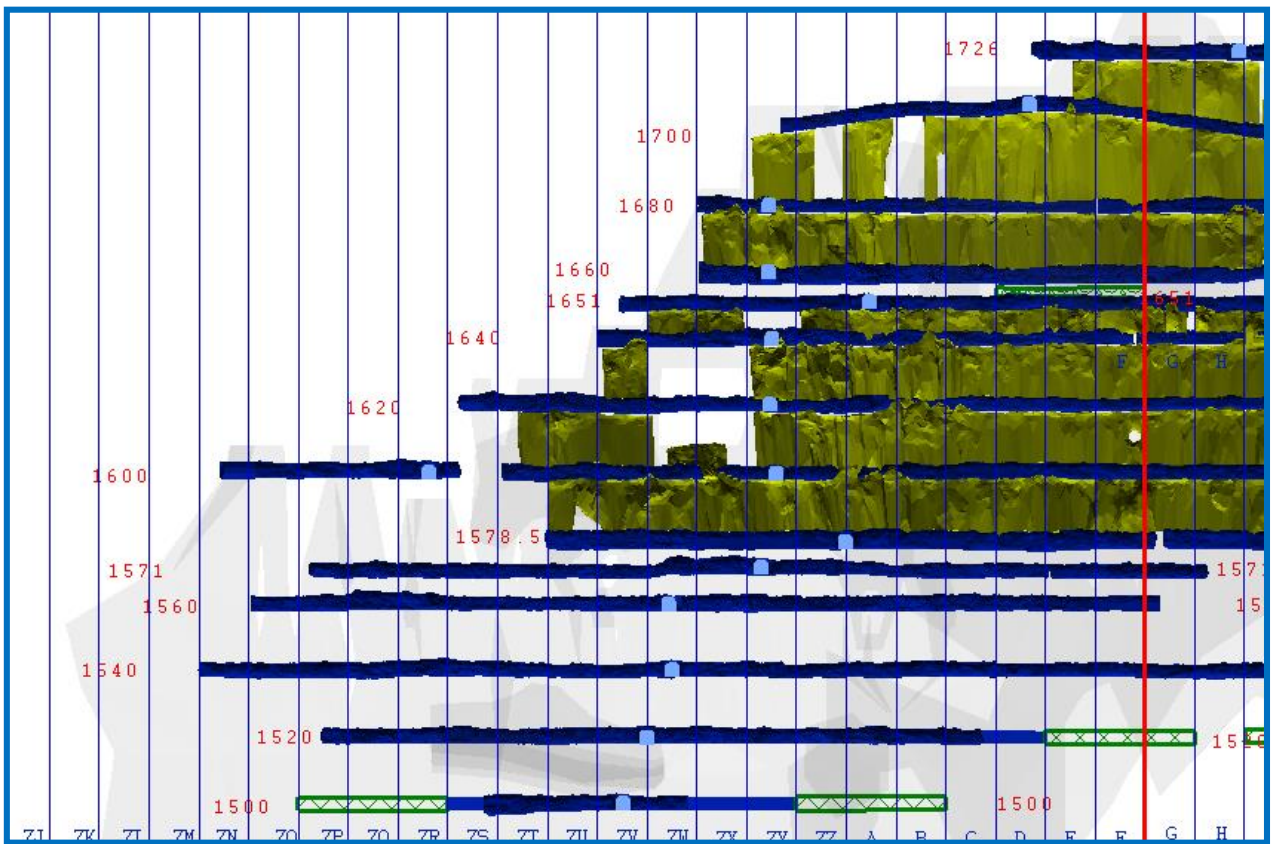


Figura 46: Esquema sector BON subsector Norte Norte.

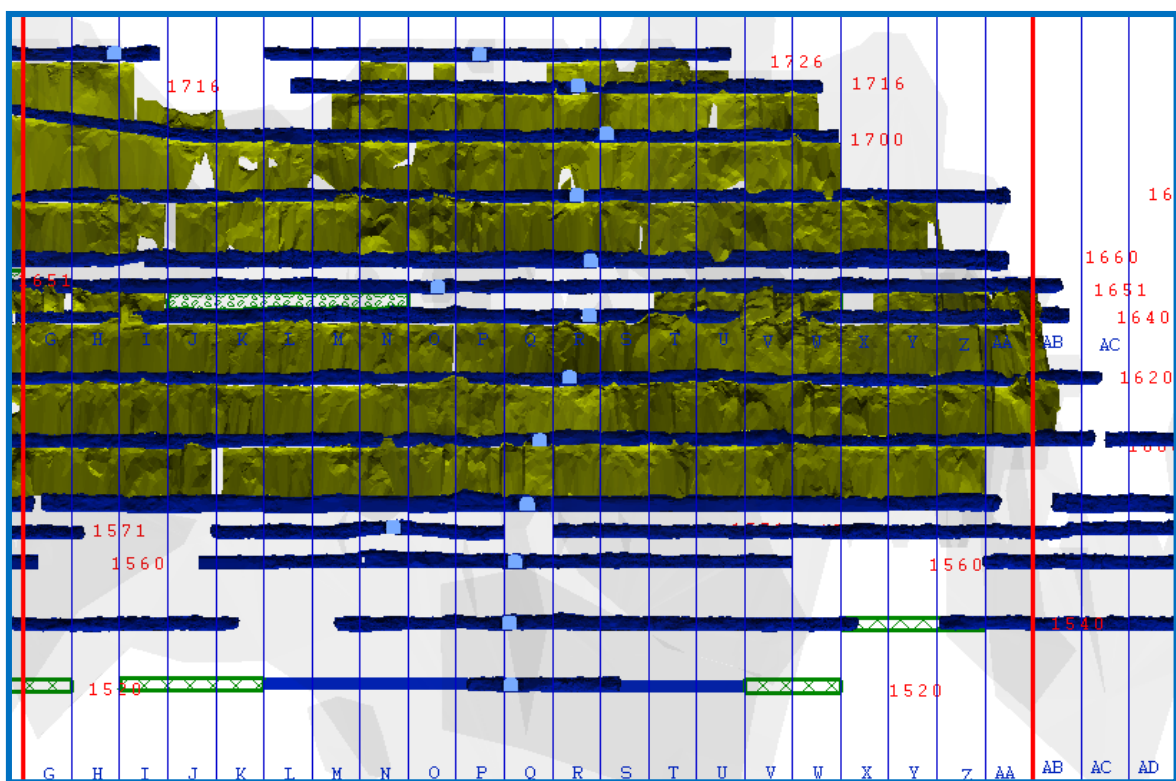


Figura 47: Esquema sector BON subsector Norte.

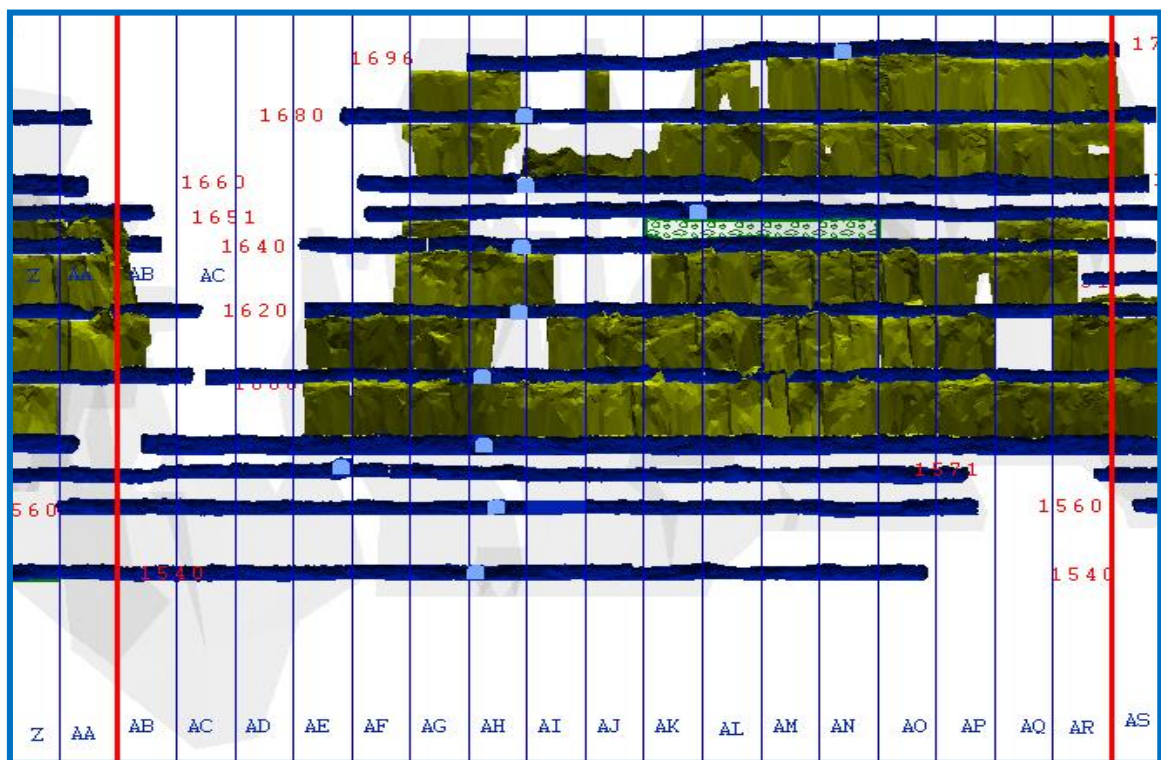


Figura 48: Esquema sector BON subsector Central.

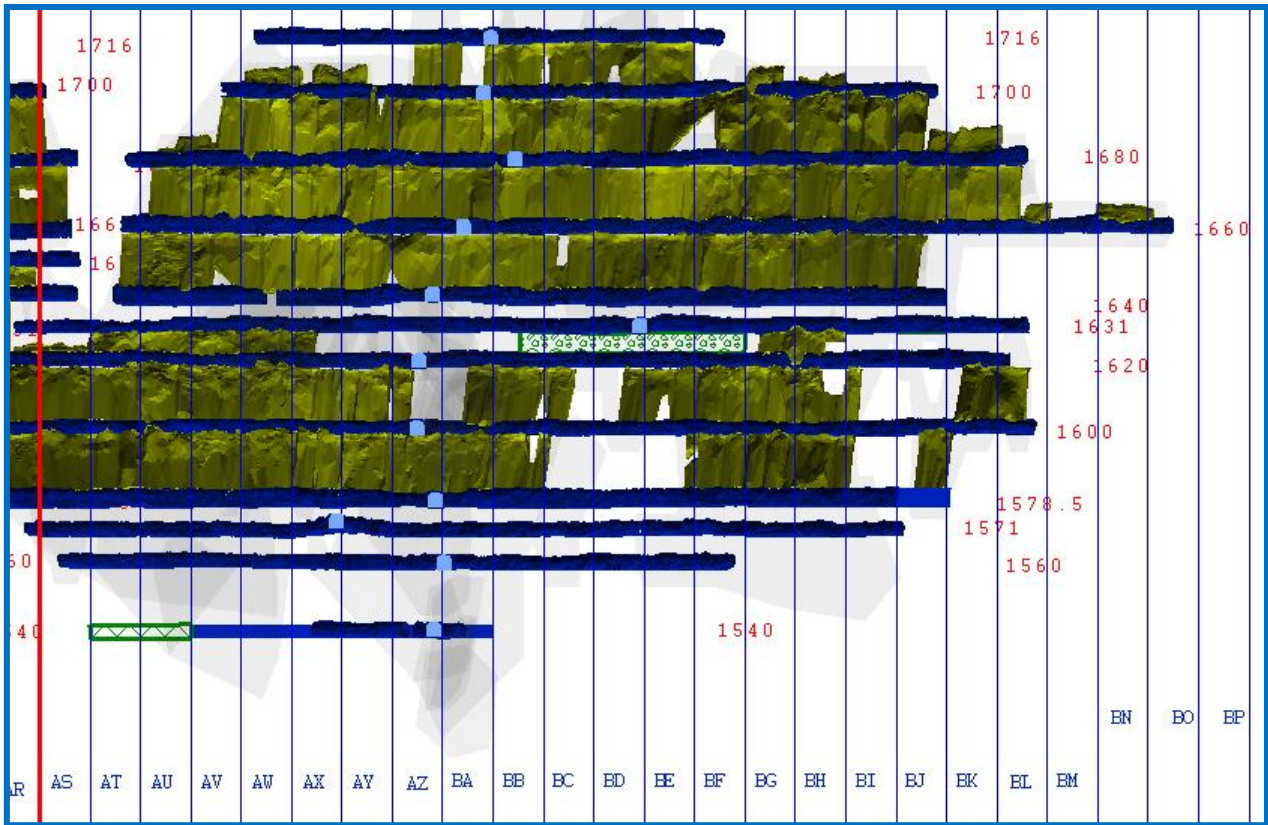


Figura 49: Esquema sector BON subsector Sur.



## 8.6. Anexo F: Restricción reconstrucción plan actual

Día	RESTRICCIONES	
	-	+
1	11606.4	14185.6
2	10099.8	12344.2
3	20590.2	25165.8
4	18441.9	22540.1
5	26505	32395
6	23938.2	29257.8
7	32866.2	40169.8
8	29099.7	35566.3
9	27063	33077
10	26226	32054
11	38306.7	46819.3
12	61826.4	75565.6
13	57753	70587
14	27927.9	34134.1
15	42826.5	52343.5
16	26198.1	32019.9
17	28179	34441
18	35237.7	43068.3
19	38083.5	46546.5
20	36995.4	45216.6
21	42938.1	52479.9
22	62412.3	76281.7
23	77004	94116
24	32922	40238
25	79570.8	97253.2
26	47820.6	58447.4
27	49466.7	60459.3
28	39701.7	48524.3
29	35126.1	42931.9
30	19781.1	24176.9
31	43356.6	52991.4

Tabla 50: Restricciones impuestas a la recreación del plan actual.

## 8.7. Anexo G: Restricciones sensibilización plan diciembre

RESTRICCIONES DICIEMBRE 2013					
CASO		t	(-)	(+)	Forzar Término actividad
<b>CASO 1</b>	TON_CF [ton/mes]	1-16	25,000	42,130	NO
	TON_CF [ton/mes]	17-26	20,000	31,992	
	TON_CF [ton/mes]	27-31	25,000	42,130	
	M3_RS [m3/mes]	1-31	-	59,200	
	M3_RC [m3/mes]	1-31	-	34,224	
<b>CASO 2</b>	TON_CF [ton/mes]	1-16	25,000	42,130	SI
	TON_CF [ton/mes]	17-26	20,000	31,992	
	TON_CF [ton/mes]	27-31	25,000	42,130	
	M3_RS [m3/mes]	1-31	-	59,200	
	M3_RC [m3/mes]	1-31	-	34,224	
<b>CASO 3</b>	TON_CF [ton/mes]	1-31	20,000	38,196	SI
	M3_RS [m3/mes]	1-31	-	59,200	
	M3_RC [m3/mes]	1-31	-	34,224	
<b>CASO 4</b>	TON_CF [ton/mes]	1-31	20,000	40,000	SI
	M3_RS [m3/mes]	1-31	-	59,200	
	M3_RC [m3/mes]	1-31	-	34,224	
<b>CASO 5</b>	TON_CF [ton/mes]	1-31	20,000	40,000	SI
	M3_RS [m3/mes]	1-31	-	59,200	
	M3_RC [m3/mes]	1-31	-	34,224	
	TERMINAR	15-31	100	100,000	
<b>CASO 6</b>	TON_CF [ton/mes]	1-31	20,000	40,000	SI
	M3_RS [m3/mes]	1-31	-	59,200	
	M3_RC [m3/mes]	1-31	-	34,224	
	TERMINAR	15-31	180	100,000	
<b>CASO 7</b>	TON_CF [ton/mes]	1-31	20,000	40,000	SI
	M3_RS [m3/mes]	1-31	-	59,200	
	M3_RC [m3/mes]	1-31	-	34,224	
	TERMINAR	15-31	180	100,000	
	M_PERFO[m/mes]	1-31		19,280	

<b>CASO 8</b>	TON_CF [ton/mes]	1-31	20,000	40,000	SI
	M3_RS [m3/mes]	1-31	-	59,200	
	M3_RC [m3/mes]	1-31	-	34,224	
	TERMINAR	15-31	200	100,000	
	M_PERFO[m/mes]	1-31	-	19,280	

Tabla 51: Restricciones análisis cantidad de actividades cumplidas.

## 8.8. Anexo H: Gráficos calculo ELOS

### 8.8.1. Según metodología de Clark

#### 8.8.1.1. Tamaño L

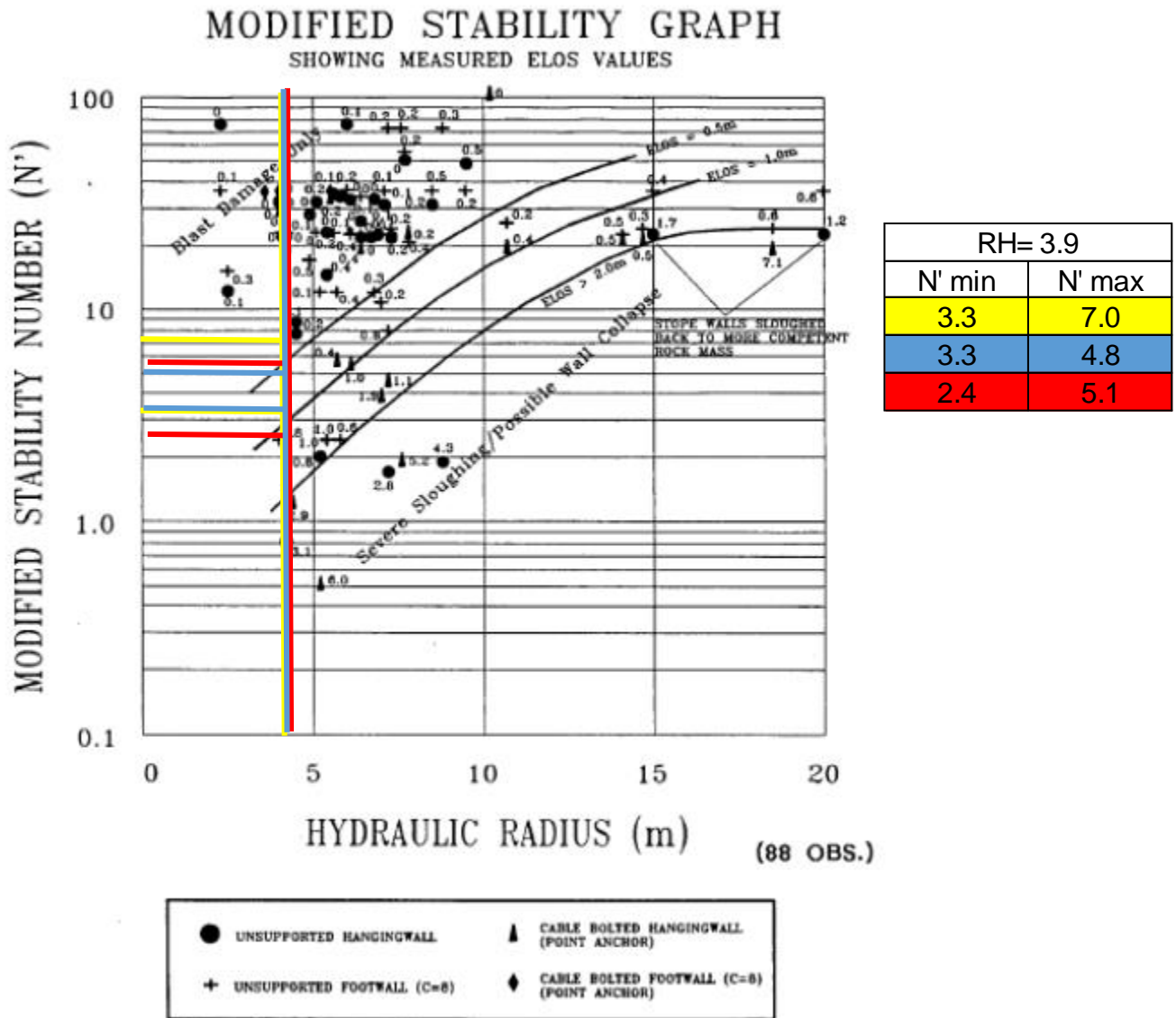


Figura 2-6. Guía de estimación de dilución de Clark (1998).

Figura 50: Estimación ELOS, RH=3.9

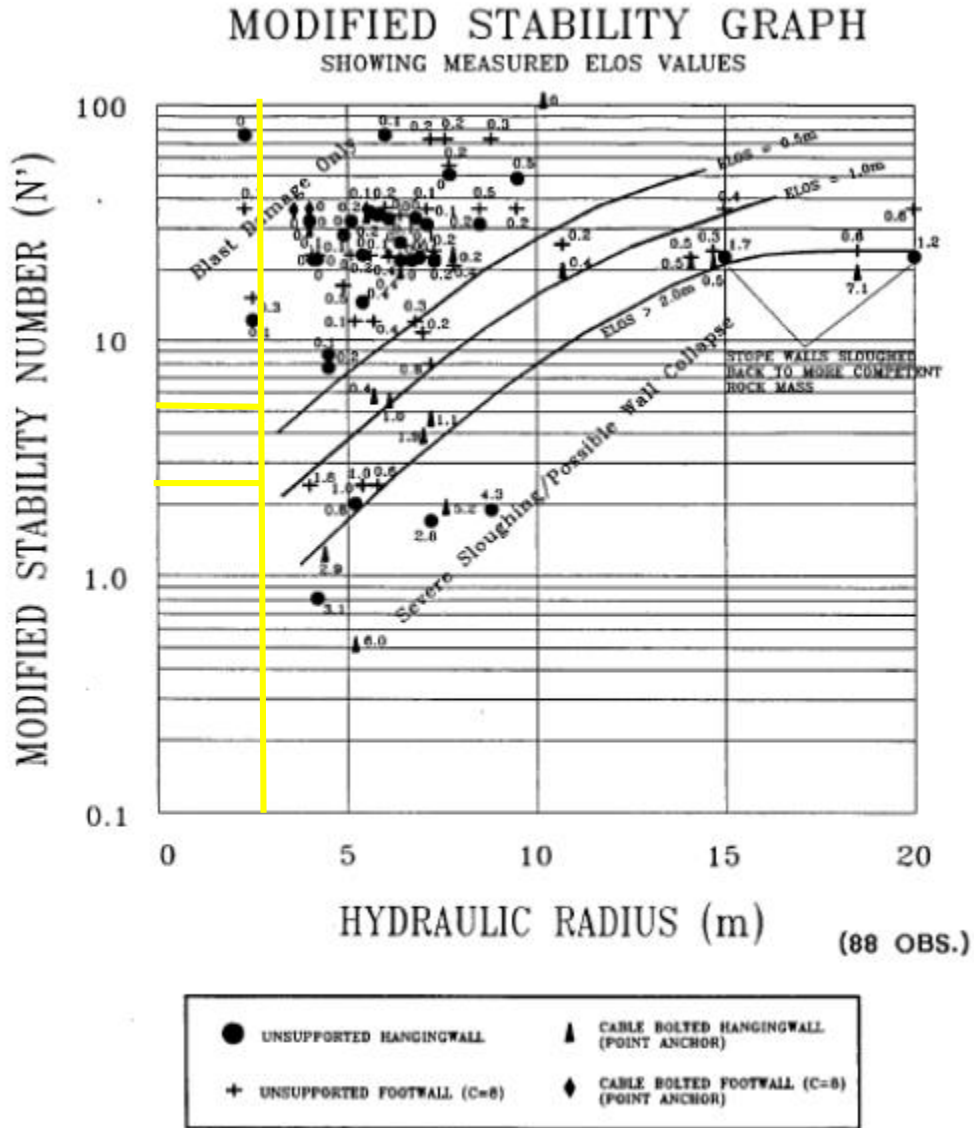


Figura 2-6. Guía de estimación de dilución de Clark (1998).

Figura 51: Estimación ELOS, RH: 3.9. N'min: 2.4, N' max: 5.1.

8.8.1.2. Tamaño 2L

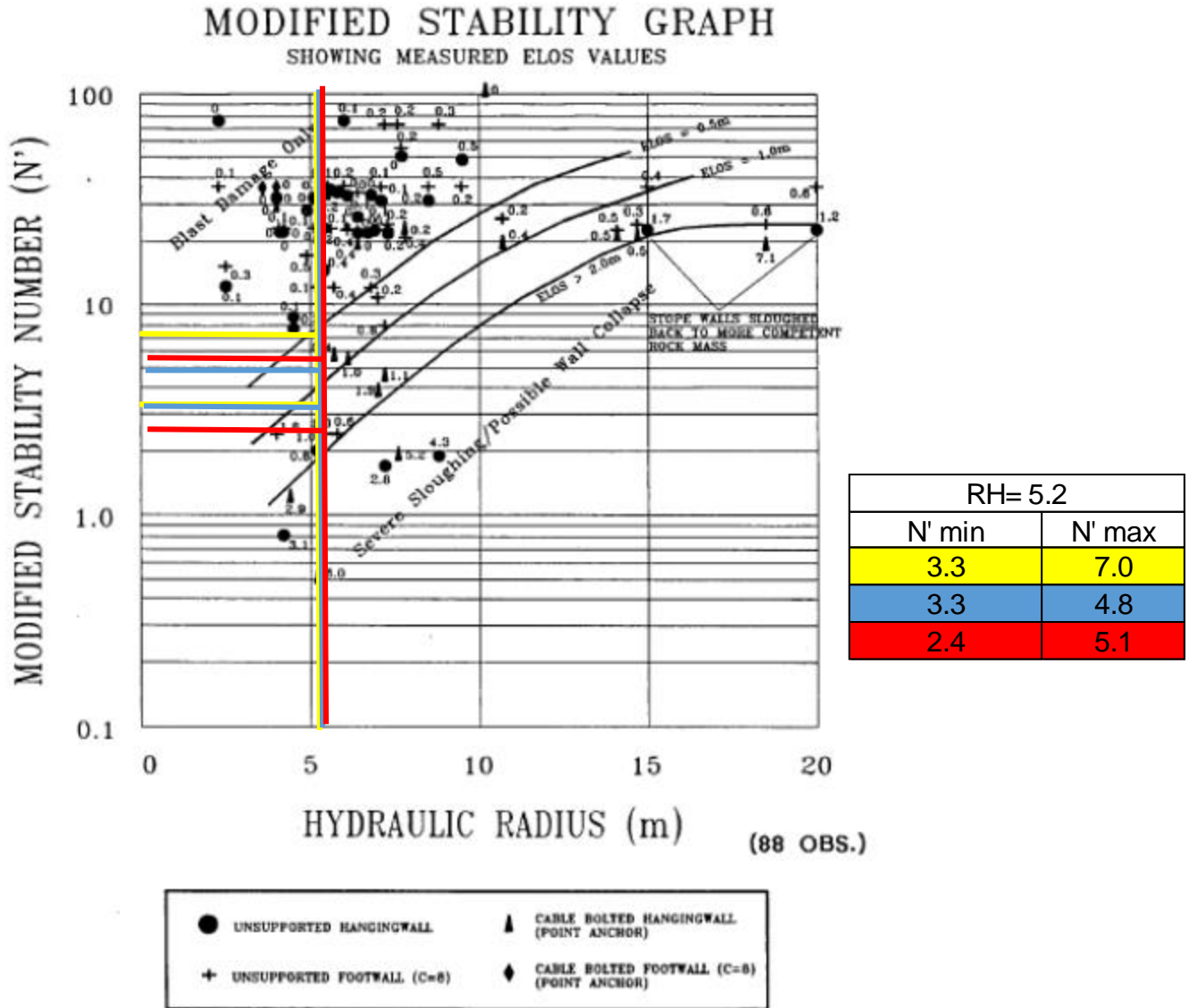


Figura 2-6. Guía de estimación de dilución de Clark (1998).

Figura 52: Estimación ELOS, RH=5.2

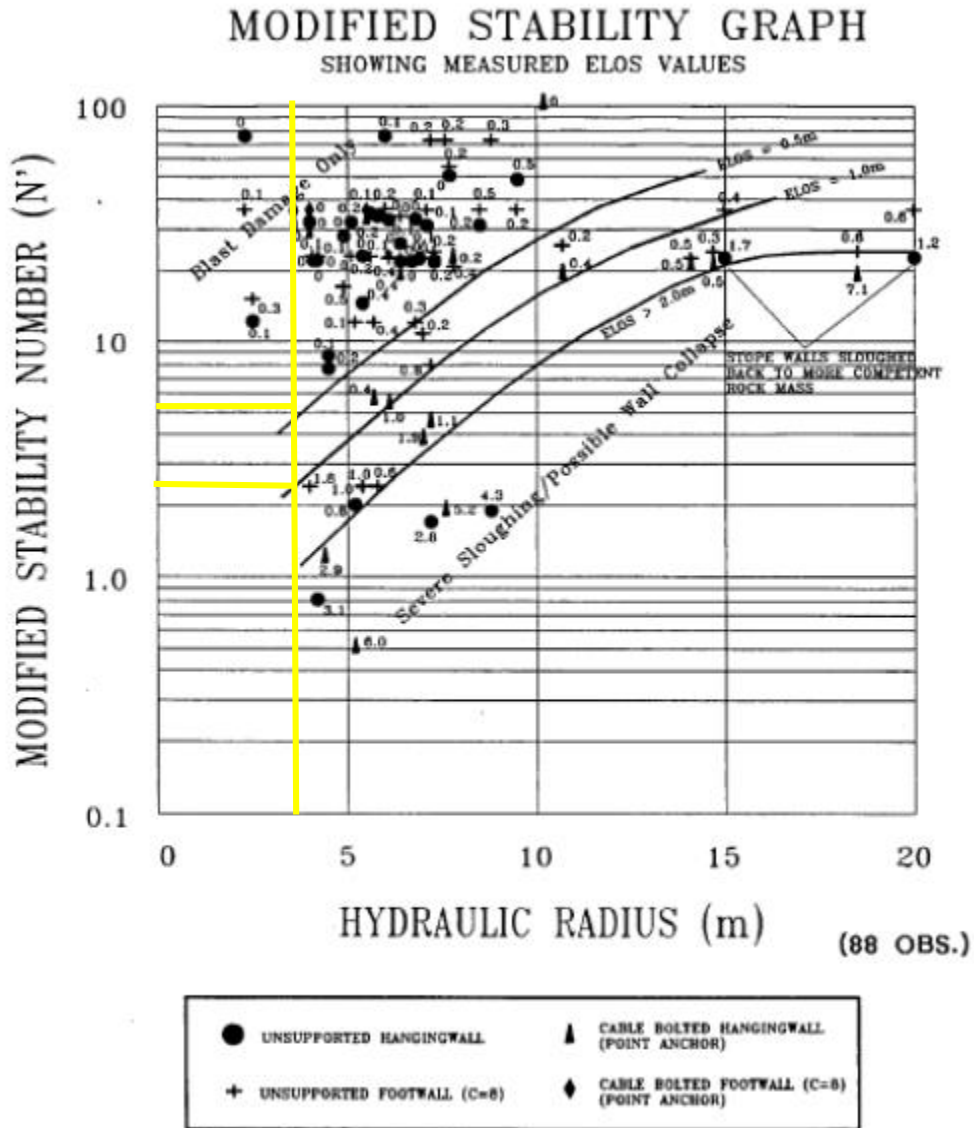


Figura 2-6. Guía de estimación de dilución de Clark (1998).

Figura 53: Estimación ELOS, RH=3,3, N'min:2.4, N'max:5.1

## 8.8.2. Según metodología de Capes

### 8.8.2.1. Tamaño L

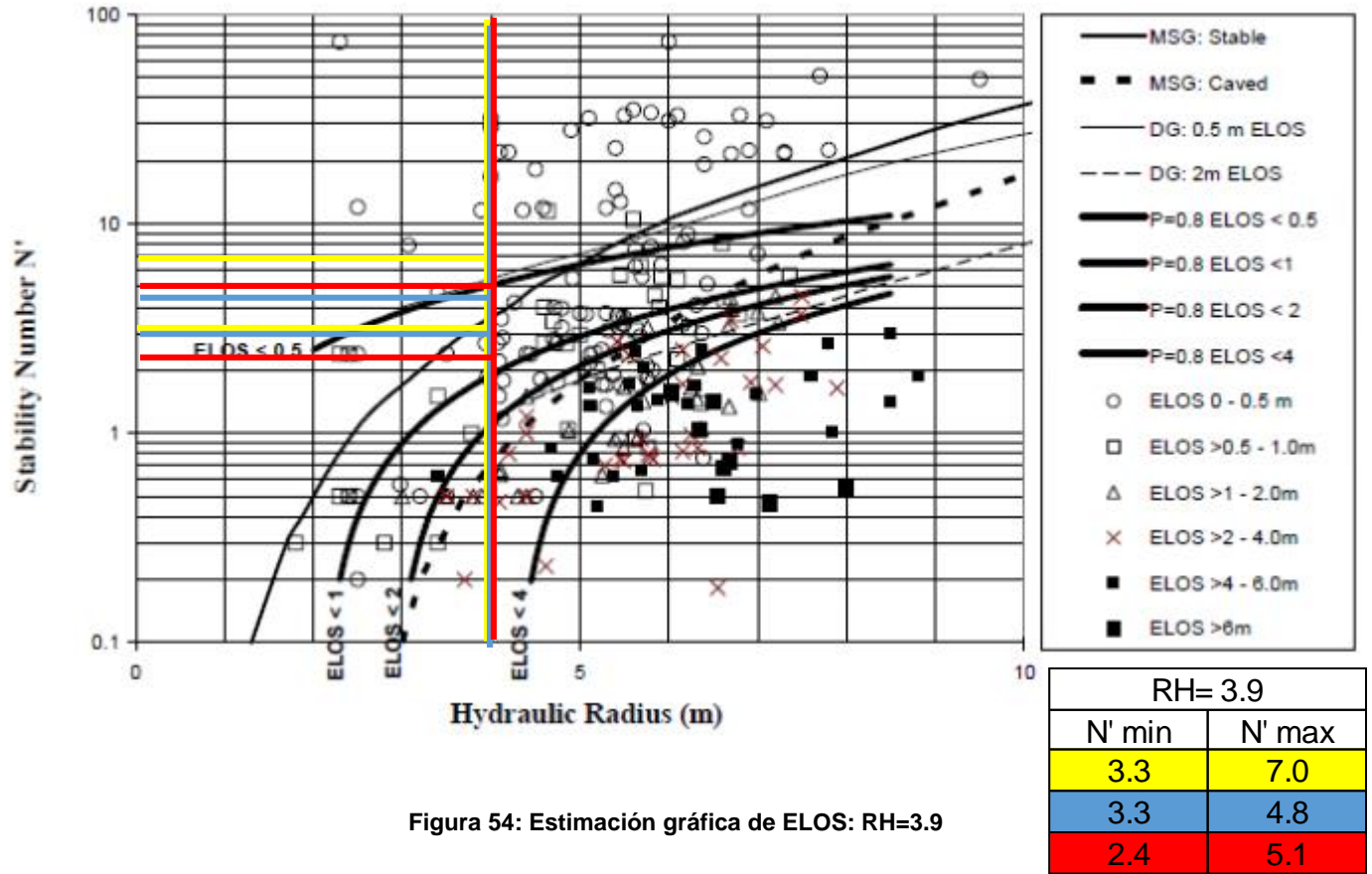


Figura 54: Estimación gráfica de ELOS: RH=3.9



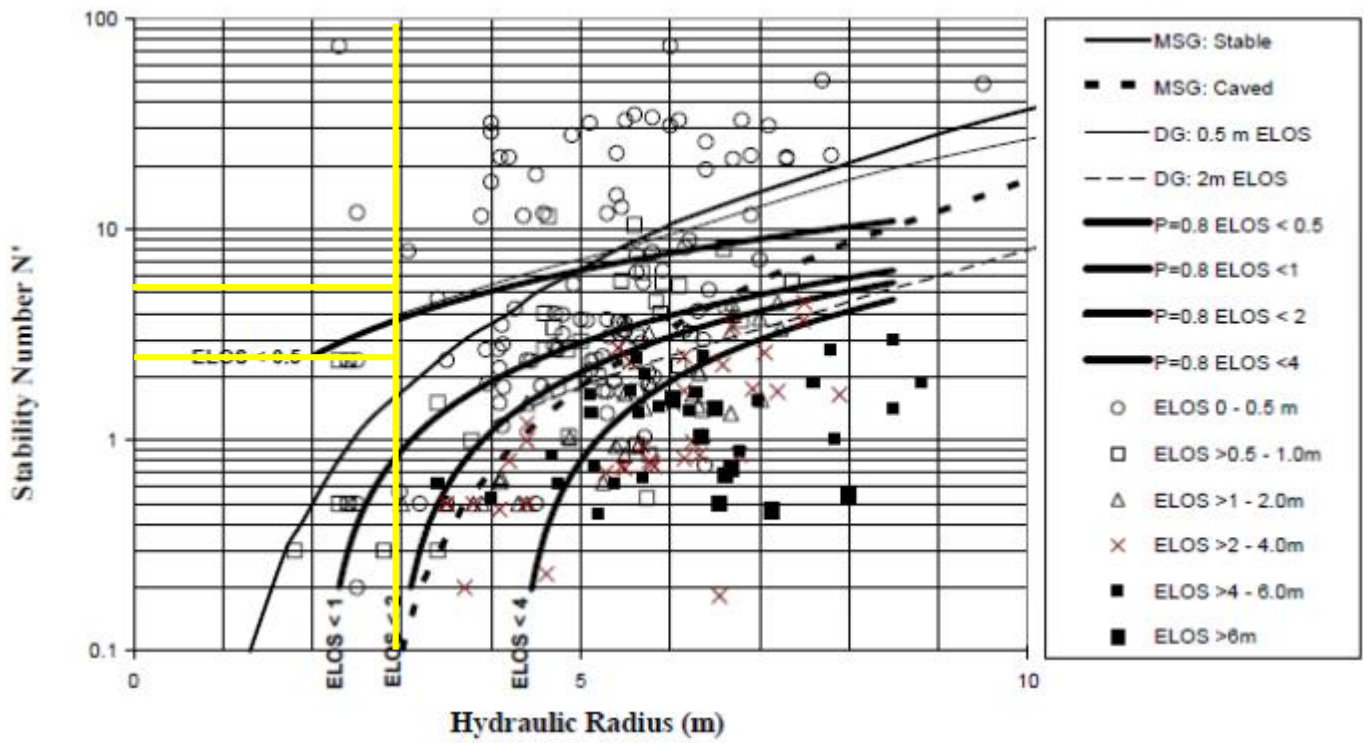


Figura 55: Estimación ELOS, RH: 3.9. N'min: 2.4, N' max: 5.1.

8.8.2.2. *Tamaño 2L*

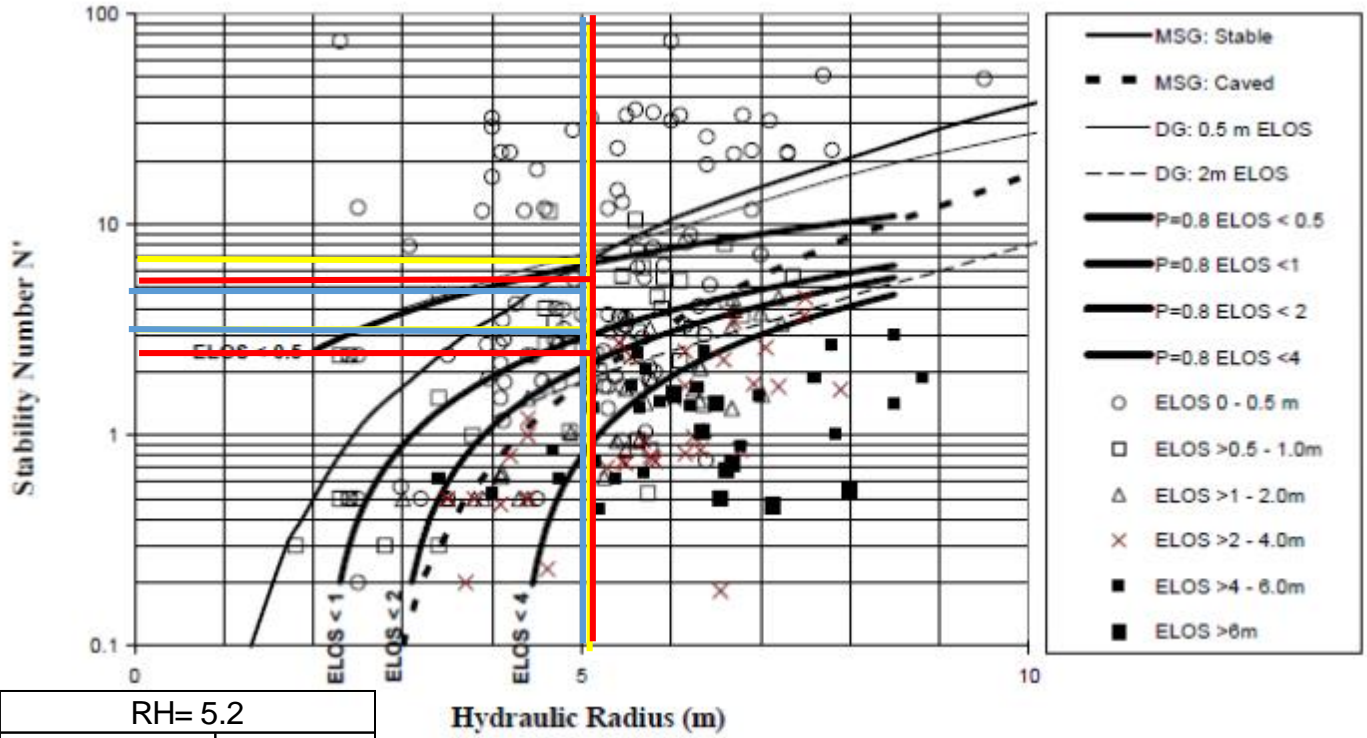


Figura 56: Estimación ELOS método gráfico, RH=5.2

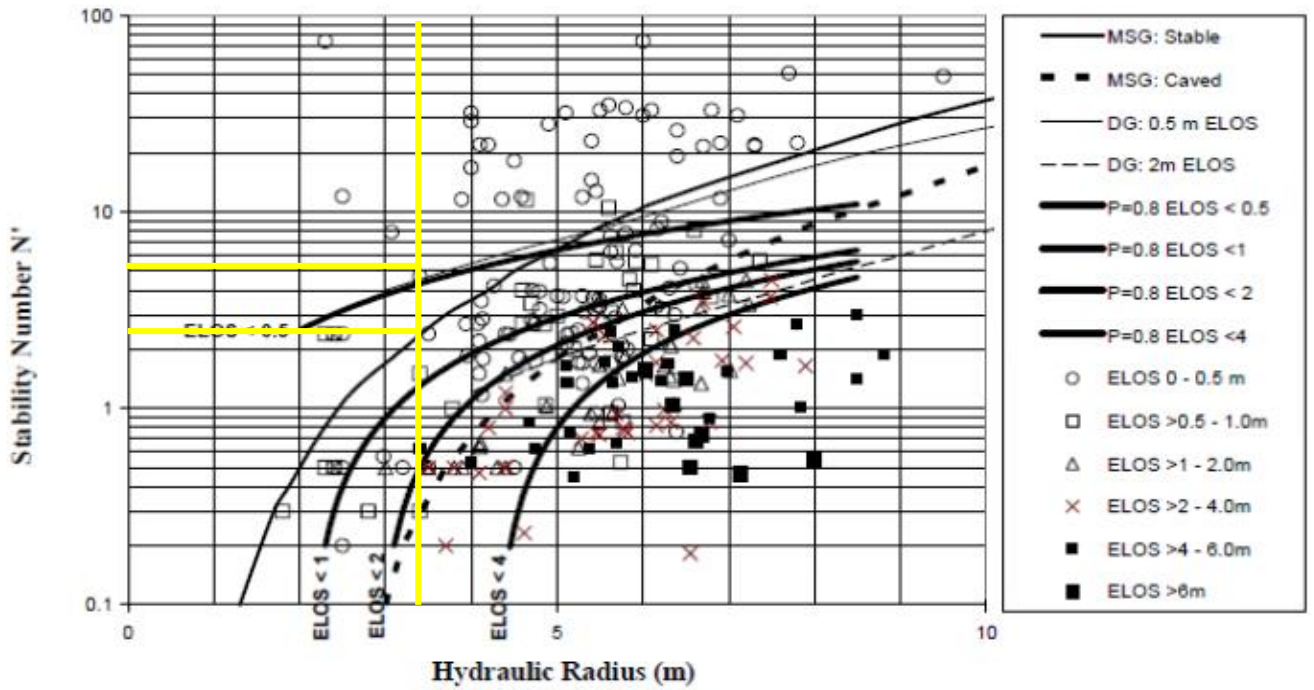


Figura 57: Estimación ELOS método gráfico, RH=3,3,  $N'$ min:2.4,  $N'$ max:5.1

## 8.9. Anexo I: Secuencia de extracción casos estudio

### 8.9.1. Actividades iniciales

	ACTIVIDAD	1	2	3	4	5	...
L/2	BON_N_1520_K_DR	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	BON_N_1651_N_PERFO	0.54	0.46	0.00	0.00	0.00	0.00
	BON_C_1651_AP_RS	0.46	0.46	0.09	0.00	0.00	0.00
	BON_S_1631_BB/2_PERFO	0.45	0.45	0.11	0.00	0.00	0.00
	BON_NN_1500_ZR_DR	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	BON_NN_1520_E_DR	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
	BON_N_1651_M_PERFO	0.00	0.09	0.54	0.37	0.00	0.00
	BON_C_1651_AK_PERFO	0.00	0.00	0.45	0.45	0.11	0.00
	BON_S_1631_BC_PERFO	0.00	0.00	0.34	0.45	0.11	0.11
	BON_NN1_1560_YQ_DR	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00
L	BON_N_1651_I/2_RS	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	BON_NN_1500_ZZ_DR	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	BON_S_1631_BD/2_RS	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	BON_NN_1520_E_DR	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	BON_N_1651_N_PERFO	0.35	0.18	0.47	0.00	0.00	0.00
	BON_S_1631_BD1/2_PERFO	0.00	0.77	0.23	0.00	0.00	0.00
	BON_NN1_1560_YQ_DR	0.59	0.00	0.00	0.41	0.00	0.00
	BON_NN_1520_F_DR	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
	BON_NN_1500_ZR_DR	0.00	0.77	0.00	0.00	0.00	0.00
	BON_N_1520_K_DR	0.00	0.00	0.64	0.36	0.00	0.00
2L	BON_NN_1500_ZZ_DR	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	BON_N_1651_N_PERFO	0.54	0.46	0.00	0.00	0.00	0.00
	BON_S_1631_BH_RS	0.49	0.49	0.01	0.00	0.00	0.00
	BON_NN_1520_E_DR	0.32	0.68	0.00	0.00	0.00	0.00
	BON_NN_1500_A_DR	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	BON_C_1651_AP_RS	0.09	0.46	0.46	0.00	0.00	0.00
	BON_N_1651_I/2_RC	0.00	0.06	0.94	0.00	0.00	0.00
	BON_S_1540_AU_DR	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
	BON_S_1540_AT_DR	0.00	0.00	0.77	0.23	0.00	0.00
	BON_N_1651_M_PERFO	0.00	0.09	0.54	0.37	0.00	0.00

Tabla 52: Actividades realizadas los primeros cinco días de evaluación.

## 8.9.2. Actividades finales

	ACTIVIDAD	...	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	
L/2	BON_NN_1660_E_PERFO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	<b>0.04</b>	<b>0.26</b>	<b>0.45</b>	0.26	0.00	0.00
	BON_S_1631_BE2/2_RS	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	<b>1.00</b>	0.00	0.00	0.00	
	BON_C_1651_AM2/2_RC	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	<b>0.04</b>	<b>0.52</b>	<b>0.44</b>	0.00	0.00
	BON_S_1631_BD1/2_BENCH	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	<b>0.17</b>	<b>0.83</b>	0.00	0.00	
	BON_N_1651_L1/2_RS	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	<b>1.00</b>	0.00	0.00	
	BON_C_1651_AM2/2_RS	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	<b>0.15</b>	<b>0.85</b>	0.00	0.00
	BON_N_1651_M2/2_BENCH	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	<b>1.00</b>	0.00	0.00
	BON_NN_1660_F_PERFO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	<b>0.44</b>	<b>0.56</b>
	BON_C_1651_AM1/2_BENCH	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	<b>0.09</b>	<b>0.91</b>	0.00
	BON_NN_1660_F1/2_BENCHUC	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	<b>1.00</b>
L	BON_C_1651_AN_BENCH	0.00	0.00	0.00	0.00	<b>0.13</b>	<b>0.43</b>	<b>0.44</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	BON_NN_1660_E_PERFO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	<b>0.68</b>	<b>0.32</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	
	BON_N_1651_N_RS	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	<b>0.37</b>	<b>0.37</b>	0.00	<b>0.25</b>	0.00	<b>0.01</b>	
	BON_C_1651_AM_BENCH	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	<b>0.46</b>	<b>0.46</b>	<b>0.08</b>	0.00	0.00	
	BON_NN_1660_F_PERFO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	<b>0.34</b>	<b>0.66</b>	0.00	0.00	0.00	
	BON_NN_1660_F_BENCHUC	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	<b>0.03</b>	<b>0.31</b>	<b>0.61</b>	<b>0.05</b>	
	BON_C_1651_AN_RS	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	<b>0.28</b>	<b>0.05</b>	<b>0.34</b>	<b>0.34</b>	
	BON_C_1651_AK_PERFO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	<b>0.39</b>	<b>0.32</b>	<b>0.29</b>	
	BON_N_1651_J_RC	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	<b>0.09</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	<b>0.46</b>	<b>0.46</b>	
BON_C_1651_AL_BENCH	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	<b>0.28</b>	<b>0.07</b>	<b>0.65</b>		
2L	BON_N_1651_LM_RS	0.00	<b>0.23</b>	<b>0.26</b>	<b>0.26</b>	<b>0.25</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	BON_S_1631_BCBD_BENCH	0.00	0.00	<b>0.34</b>	<b>0.32</b>	<b>0.34</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	BON_NN_1660_E_PERFO	0.00	0.00	0.00	<b>0.43</b>	<b>0.57</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	BON_NN_1660_F_PERFO	0.00	0.00	0.00	0.00	<b>0.21</b>	<b>0.79</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	BON_N_1651_N_BENCH	0.00	0.00	0.00	0.00	<b>0.03</b>	<b>0.42</b>	<b>0.42</b>	0.00	0.00	<b>0.13</b>	0.00	0.00	
	BON_C_1651_AMAN_RS	0.00	0.00	0.00	<b>0.02</b>	<b>0.20</b>	<b>0.20</b>	<b>0.20</b>	<b>0.09</b>	<b>0.20</b>	<b>0.09</b>	0.00	0.00	
	BON_C_1651_AK_PERFO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	<b>0.45</b>	<b>0.05</b>	<b>0.31</b>	<b>0.19</b>	0.00	0.00	
	BON_NN_1660_EF_BENCHUC	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	<b>0.14</b>	<b>0.23</b>	<b>0.23</b>	<b>0.17</b>	<b>0.08</b>	<b>0.14</b>	
	BON_C_1651_AKAL_BENCH	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	<b>0.22</b>	<b>0.39</b>	<b>0.39</b>	
	BON_S_1631_BB/2_PERFO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	<b>0.11</b>	0.00	<b>0.45</b>	<b>0.45</b>	

Tabla 53: Actividades realizadas los últimos 10 días de evaluación