



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

AUTOMATIZACIÓN DEL DISEÑO ROBUSTO DE CASERONES

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

HUMBERTO NICOLAS SOTO SILVA

PROFESOR GUÍA:
CRISTIAN POBLETE MATAMALA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
JAVIER CORNEJO GONZÁLEZ
LUIS FELIPE ORELLANA ESPINOZA

SANTIAGO DE CHILE
2020

AUTOMATIZACIÓN DEL DISEÑO ROBUSTO DE CASERONES

Un elemento esencial en planificación estratégica es la captura de la renta económica que surge a partir de la optimización de la porción de material a ser explotada. En el caso la minería subterránea para SLS, esta etapa se refiere a la optimización de caserones. Actualmente, la forma de abordar tradicionalmente este problema, corresponden a un ejercicio de carácter determinista y, por lo tanto, no suele contemplar incertidumbre de elementos clave como pueden ser el precio, o características de la roca, que pueden afectar tanto al diseño óptimo como a la recuperación minera.

Este trabajo propone una metodología que se basa en la automatización de la simulación de miles de escenarios donde se consideran las diferentes variables de diseño, contemplando con ello incertidumbre de las variables exógenas, con ello será posible visualizar el universo de diseño factible y la elección de los escenarios más robustos.

Dentro de los ejercicios propios de este trabajo, se utilizaron datos de dos minas de la tercera región de Chile, los cuales se utilizaron para validar los resultados según los criterios actuales de selección de las mineras, estableciendo los resultados óptimos, los cuales fueron comparados con la selección de los escenarios robustos. Se observa que si bien hay una disminución en la media del valor total de 2.6% existe además una disminución de la variabilidad del valor total representado en un descenso de la desviación estándar respecto a las medias. Por lo tanto, el escenario robusto corresponde a un escenario mucho menos sensible frente a variaciones en parámetros económicos. Algo observable en la distribución de los resultados del escenario óptimo y escenario robusto.

Cabe destacar que los sólidos generados a través de esta metodología corresponden a unidades que son utilizadas en la planificación a largo plazo por lo que es inevitable la labor de refinar el diseño de manera manual para establecer las unidades que serán utilizadas en tanto a nivel táctico como operacional.

Finalmente, esta metodología permite obtener la mejor configuración de diseño de caserones, de acuerdo a los criterios de selección del planificador. Los cuales pueden ser maximizar el valor total o las reservas mineras, junto con minimizar la variación de estos los resultados. El diseño de caserones es automatizado y los tiempos de trabajo y de ejecución son reducidos, comparativamente realizar un diseño de la manera tradicional toma alrededor de 1 mes a un mes y medio mientras que la metodología mostrada en este trabajo es capaz de replicar y mejorar aquellos resultados en un periodo de horas.

ROBUST STOPE DESIGN AUTOMATION

An essential element in strategic mine planning is the capture of the economic profit that arises from the optimization of the portion of material to be exploited. In the case of underground mining, particularly for SLS, this stage refers to the optimization stopes. Currently, the way of traditionally addressing this problem corresponds to a deterministic exercise and, therefore, it does not usually contemplate uncertainty of key elements such as the price, or characteristics of the rock, which can affect both the optimal design and to mining recovery.

This work proposes a methodology that is based on the automation of the simulation of thousands of scenarios where the different design variables are considered, thus contemplating the uncertainty of the exogenous variables, with which it will be possible to visualize the feasible design universe and the choice of the most robust scenarios.

Within the exercises of this work, data from two mines in the third region of Chile were used, which were used to validate the results according to the current selection criteria of the mining companies, establishing the optimal results, which were compared with selecting robust scenarios. It is observed that although there is a decrease in the mean of the total value of 2.6%, there is also a decrease in the variability of the total value represented in a decrease in the standard deviation with respect to the means. Therefore, the robust scenario corresponds to a much less sensitive scenario when faced with variations in economic parameters. Something observable in the distribution of the results of the optimal scenario and robust scenario.

It should be noted that the solids generated through this methodology correspond to units that are used in long-term planning, so the work of refining the design manually is inevitable to establish the units that will be used at both the tactical and operational.

Finally, this methodology allows to obtain the best design configuration for stopes, according to the planner's selection criteria. Which can be to maximize the total value or the mining reserves, together with minimizing the variation of these results. The design of stopes is automated and the work and execution times are reduced, comparatively, it takes around 1 month to 1.5 months to design in the traditional way, while the methodology shown in this work is capable of replicating and improving those results in a period of hours.

Dedicatoria

A mis padres y hermano, por su constante y eterno apoyo, por ser un pilar fundamental en mi vida, por enseñarme valores, y claro, también defectos, pero por sobre todo agradecer su amor incondicional.

A mi pareja, Deyanira, gracias *Teté* por su amor, apoyo y compañía increíble desde los lejanos días en los que comenzaba la carrera, por enseñarme a querer y madurar. También a sus padres y a la Cami por recibirme como un integrante más en su hogar.

Al Jose, Seba y el Gonzalo por su eterna amistad la cual perdura desde el colegio, por cada junta y momentos únicos que hemos compartido, espero que sean muy felices siempre.

A cada uno de los integrantes de mi familia, por ser parte de mi vida les deseo lo mejor a todos y espero ser un orgullo para aquellos integrantes que no me alcanzaron a ver cerrando esta etapa, un abrazo al cielo para mis abuelos y tíos.

A los integrantes del equipo de Dassault Systèmes por haberme dado la oportunidad de realizar mi trabajo de título y dar mis primeros pasos en el mundo profesional. En particular, destacar al ala norte de la oficina, gracias por cada consejo, comentario y momento que me han dado convirtiendo la estadía en un placer.

Tabla de contenido

Capítulo 1: Introducción	1
1.1 Introducción	1
1.2 Objetivos.....	2
1.2.1 Objetivo General.....	2
1.2.2 Objetivo Específico	2
1.3 Alcance.....	2
1.4 Contenido de Capítulos	3
Capítulo 2: Marco Teórico.....	4
2.1 <i>Sublevel Stopping</i>	4
2.2 Algoritmos usados en la selección y optimización de diseño de caserones	8
2.2.1 <i>Stope Shape Optimizer (Slice Method)</i>	10
2.2.2 El problema en la definición de la ubicación de caserones	11
2.3 Características Geomecánicas	12
2.3.1 Q de Barton	12
2.3.2 Resistencia a la compresión uniaxial (UCS)	15
2.3.3 Estado tensional	15
2.3.4 Presencia y características de estructuras.....	17
2.4 Diseño de Pilares.....	17
2.4.1 Pilares Verticales	17
2.4.2 Pilares Horizontales.....	19
2.5 Diseño de Caserones	21
2.5.1 Descripción Caserón	21
2.5.2 Diseño de Caserones	22
2.5.3 Métodos Gráficos de Estabilidad	27
2.6 Diseño Robusto	32
2.7 Softwares utilizados.....	33
2.7.1 SIMULIA Isight.....	33
2.7.2 Python	34
2.7.3 GEOVIA Surpac	35
Capítulo 3: Metodología	36

3.1	Identificación de componentes y variables del proceso.....	38
3.2	Variables Involucradas.....	39
3.2.1	Variables de Diseño.....	39
3.2.2	Variables No Controladas	40
3.3	Resultados de la metodología.....	41
3.4	Descripción del Caso de estudio.....	42
3.4.1	Mina 1.....	42
3.4.2	Mina 2.....	46
3.5	Automatización del proceso y selección escenario robusto	51
3.6	Validación de la metodología	54
3.6.1	Validación de resultados.....	54
3.6.2	Análisis de sensibilidad de los datos.....	55
Capítulo 4: Aplicación y Resultados.....		56
4.1	Definición de Objetivos estratégicos	56
4.2	Validación de la metodología	57
4.2.1	Mina 1.....	57
4.2.2	Mina 2.....	61
4.3	Escenario Robusto	64
4.3.1	Escenario robusto variables económicas.....	64
4.3.2	Escenario robusto variables geomecánicas	67
4.4	Análisis de Sensibilidad de los datos	70
Capítulo 5: Discusión		75
Capítulo 6: Conclusiones		78
Capítulo 7: Bibliografía.....		79
Capítulo 8: Anexos.....		81
8.1	Ejemplos funcionamiento algoritmo de optimización “Slice Method”	81
8.2	Resumen resultados Mina 2	82

Índice de Figuras

Figura 2. 1 Caserón <i>Sublevel Stopping</i> . Fuente: Villaescursa, 2014.	5
Figura 2. 2 Método <i>Bench and Fill</i> . Fuente: Apuntes Fundamentos de Tecnología Minera MI4070, 2016.	5
Figura 2. 3 Perfil de explotación <i>Sublevel Stopping</i> y pilares. Fuente: Villaescursa, 2014.	6
Figura 2. 4 <i>Sublevel Stopping</i> Convencional. Hamrin, 2001.	7
Figura 2. 5 <i>Sublevel Stopping</i> variante <i>Long Blast Hole</i> (Hamrin, 2001)	7
Figura 2. 6 Ejemplo definición de la geometrías del slice method, malla regular, orientación XZ. Fuente: <i>Stope Shape Optimizer</i> Versión 3.1.0 Reference Manual.	10
Figura 2. 7 Recopilación de Calidad de roca en minas canadienses. Fuente: Potvin & Hudyma,1989)	14
Figura 2. 8 Relación calidad de roca y ancho caserón. Fuente: Potvin & Hudyma,1989. .	14
Figura 2. 9 Componentes del tensor de esfuerzos en 3D. Fuente: Mecanica de rocas MI4060, 2015.	15
Figura 2. 10 Tipos de esfuerzos. Fuente: Hudson, Cornet y Christiansson, 2003.	16
Figura 2. 11 Ejemplo Área tributaria, Fuente: Mecanica de rocas MI4060, 2015.	17
Figura 2. 12 Esfuerzo inducido sobre pilares. Fuente: Hoek & Brown, 1980.	18
Figura 2. 13 Nomograma espesor mínimo del pilar corona. Fuente: Tavakoli, 1994.	20
Figura 2. 14 Grafico Esfuerzo inducido/Esfuerzo horizontal vs Altura Caserón/Ancho del pilar. Fuente: Tavakoli, 1994.	20
Figura 2. 15. Esquema Caserón, Elaboración propia.	22
Figura 2. 16 Curvas de diseño para paredes <i>Crown/End Wall</i> . Fuente: Stewart & Forsyth,1995.	23
Figura 2. 17 Curvas de diseño para los planos <i>Hanging/Foot Wall</i> . Fuente: Stewart & Forsyth,1995.	24
Figura 2. 18 Gráfico Factor A. Fuente: Mathews, 1980.	24
Figura 2. 19 Factor B, elaboración propia.	25
Figura 2. 20 Parámetros Factor B. Fuente: Mathews, 1980.	26
Figura 2. 21 Gráfico Factor C. Fuente: Mathews, 1980.	27
Figura 2. 22 Gráfico de estabilidad de Mathews (1980)	28
Figura 2. 23 Grafico de estabilidad modificado por Potvin (1988)	28
Figura 2. 24 Gráfico de estabilidad de Mathews modificado por Stewart & Forsyth (1995)	29
Figura 2. 25 Gráfico de Estabilidad de Mathews para regresión logarítmica (Mawdesley, Trueman & White, 2001)	30
Figura 2. 26 Funciones de probabilidad para las zonas estables, falla mayor y <i>caving</i> (Mawdesley, 2002).	30
Figura 2. 27 Contornos de isoprobabilidad (Mawdesley, 2002)	31
Figura 2. 28 Gráfico de estabilidad de Mathews para la regresión logística con zona de <i>caving</i> (Mawdesley, 2002)	31

Figura 3. 1 Flujo de trabajo Diseño Robusto de Caserones, Elaboración propia	37
Figura 3. 2 Resumen actividades, entradas y salidas, Elaboración propia	39
Figura 3. 3 Modelo de bloques, vista planta	43
Figura 3. 4 Modelo de bloques, vista XZ	43
Figura 3. 5 Modelo de bloques, vista YZ	44
Figura 3. 6 Caserones obtenidos mediante metodología tradicional, vista en planta.....	44
Figura 3. 7 Caserones obtenidos mediante metodología tradicional, vista XZ.....	45
Figura 3. 8 Caserones obtenidos mediante metodología tradicional, vista YZ.....	45
Figura 3. 9 Modelo de bloques, vista planta	47
Figura 3. 10 Modelo de bloques Mina 2, vista XZ	48
Figura 3. 11 Modelo de bloques Mina 2, vista YZ	48
Figura 3. 12 Desarrollos y caserones, vista planta	49
Figura 3. 13 Desarrollos y caserones, vista XZ	50
Figura 3. 14 Desarrollos y caserones, vista YZ	50
Figura 3. 16 Flujo de trabajo Isight.....	53
Figura 3. 15 Ejemplo calculo estadístico de estabilidad, Elaboración propia	54
Figura 4. 1 Caserones resultantes Mina 1, vista isometrica.	58
Figura 4. 2 Caserones metodología tradicional Mina 1, vista isométrica.	58
Figura 4. 3 Comparativa caserones SSO y caserones metodología tradicional, vista isométrica.	59
Figura 4. 4 Distribución largo de caserones.	59
Figura 4. 5 Distribución de alto de caserones.	60
Figura 4. 6 Distribución de ancho medio de caserones.	60
Figura 4. 7 Gráfico largo vs alto vs tonelaje, ancho 24 metros.	62
Figura 4. 8 Gráfico largo vs alto vs fino, ancho 24 metros.	63
Figura 4. 9 Gráfico largo vs alto vs ley media, ancho 24 metros.	63
Figura 4. 10 Histograma resultados media valor total.	65
Figura 4. 11 Gráfico largo vs alto vs media valor total, ancho 24 metros.....	65
Figura 4. 12 Histograma escenario optimo vs escenario robusto, parámetros económicos.	66
Figura 4. 13 Boxplot escenario optimo vs escenario robusto, parámetros económicos... ..	67
Figura 4. 14 Histograma escenario optimo vs escenario robusto, parámetros geomecánicos.....	69
Figura 4. 15 Boxplot escenario optimo vs escenario robusto, parámetros geomecánicos.69	69
Figura 4. 16 Gráfico Pareto Fino total	70
Figura 4. 17 Gráfico Pareto ley media.....	70
Figura 4. 18 Grafico efectos <i>Dip</i> cortes	71
Figura 4. 19 Puntos de inicio vs Ley media, caserones ancho 30 metros fijo	72
Figura 4. 20 Puntos de inicio vs Ley media, caserones ancho 40 metros fijo	72
Figura 4. 21 Problema de la grilla, elaboración propia	72
Figura 4. 22 Grafico Largo [m] vs Alto [m] vs Valor total [USD]	73

Figura 4. 23 Grafico Largo [m] vs Alto [m] vs Tonelaje [t]	74
Figura 4. 24 Grafico Largo [m] vs Alto [m] vs Ley Media [%]	74

Índice de Tablas

Tabla 2. 1 Clasificación de macizo rocoso según Barton	13
Tabla 2. 2 Asignación de Puntaje resistencia a la roca intacta	21
Tabla 2. 3 Valores predictivos para límites entre zonas	31
Tabla 2. 4 Señal ruido. Fuente: Diseño de Experimentos, 2013.....	32
Tabla 3. 1 <i>Benchmarking</i> dimensiones caserón.....	40
Tabla 3. 2 <i>Benchmarking</i> dimensiones pilar.....	40
Tabla 3. 3 Dimensiones modelo de bloque Mina 1.....	42
Tabla 3. 4 Cubicación Mina 1.....	42
Tabla 3. 5 Dimensiones modelo de bloque Mina 2.....	46
Tabla 3. 6 Cubicación Mina 2.....	46
Tabla 4. 1 Matriz de diseño Minera Mina 1	57
Tabla 4. 2 Tabla comparativa caserones minera, obtenidos mediante la nueva metodología Mina 1.	61
Tabla 4. 3 Matriz de diseño, Mina 2.	61
Tabla 4. 4 Tabla comparativa caserones obtenidos a través de la nueva metodología Mina 2	62
Tabla 4. 5 Distribución de probabilidades, variables económicas.....	64
Tabla 4. 6 Comparativa escenario base versus caso robusto dada incertidumbre en variables económica	66
Tabla 4. 7 Distribución de probabilidades, variables geomecánicas.....	67
Tabla 4. 8 Resultados probabilidad de estabilidad caso base	68
Tabla 4. 9 Comparativa escenario base versus caso robusto dada incertidumbre en variables geomecánica	68
Tabla 4. 10 Comparativa escenario base versus caso robusto dada probabilidad de estabilidad	68

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1. Q de Barton	12
Ecuación 2. Q de Barton modificada.....	13
Ecuación 3 Relación esfuerzo horizontal y vertical.....	16
Ecuación 4. Razón área tributaria y área del pilar	18
Ecuación 5. Calculo esfuerzo inducido.....	18
Ecuación 6. Confinamiento promedio del pilar (Cpav).....	18

Ecuación 7. Fricción del pilar (K).....	18
Ecuación 8. Resistencia del pilar (S).....	19
Ecuación 9. Factor de seguridad (F.S.).....	19
Ecuación 10. Q de Barton	21
Ecuación 11. RMR Bieniawski	21
Ecuación 12. RMR Laubscher	21
Ecuación 13. Resistencia del macizo Rocoso	21
Ecuación 14. Número de estabilidad de Mathews.....	22
Ecuación 15. Factor C	26
Ecuación 16 Estadístico probabilidad de estabilidad.....	55

Capítulo 1: Introducción

1.1 Introducción

Para la llevar a cabo un proyecto de minería subterránea existen distintos sistemas de explotación que pueden ser utilizados, dentro de los cuales encontramos aquellos que utilizan caserones como unidad básica de explotación como son *sublevel stopping*, *sublevel long hole* u *open stopping*. El caserón, en el contexto de la minería, consiste en una envolvente que permite identificar la porción de un yacimiento de atractivo económico. Físicamente está representada por una excavación de grandes dimensiones que en su interior posee mineral de atractivo económico, esta excavación puede ser auto soportadas, mediante la utilización de pilares entre excavaciones, o bien soportadas con rellenos u otros elementos de refuerzo.

El proceso de selección de diseño de caserones constituye un paso esencial en la planificación estratégica puesto que mediante la optimización de las reservas a ser explotadas es posible maximizar y asegurar el valor total del proyecto.

En esta etapa de ingeniería se evalúan aspectos tanto económicos como geotécnicos a fin de determinar la cantidad, forma y dimensiones que considera el diseño los caserones. Sin embargo, la forma tradicional de abordar este problema corresponde a un ejercicio de carácter determinista y que no suele considerar la incertidumbre de elementos claves como son el precio, las leyes minerales o las características propias de la roca, es decir, existe una serie importante de variables que tienen un impacto directo en el diseño óptimo en función del valor del proyecto, la recuperación minera o la factibilidad de construcción.

Considerando los avances computacionales y el desarrollo de softwares actuales es posible plantear nuevas formas de abordar el problema de diseño que permitan incorporar la incertidumbre de las distintas variables. Este trabajo propone una nueva metodología la cual se basa en la automatización de la simulación de miles de escenarios donde se consideran las distintas variables involucrados en el proceso de diseño, contemplando con ello la incertidumbre en aquellas variables no controlables, con lo cual sea posible analizar y visualizar el universo de diseño factible y de esta manera, seleccionar el o los escenarios más robustos frente a cambios en las condiciones en la cual está inmerso el proyecto en tiempos que antes no eran razonables.

De esta manera es posible asegurar el valor total mediante la medición y control de distintos índices claves (KPI) así como además se puede disminuir los riesgos asociados a la variabilidad de parámetros geomecánicos, los cuales pueden originar fallas o colapsos y cuyas consecuencias pueden ser daños y pérdidas en la continuidad operacional.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Generar una metodología que permita definir un diseño óptimo, en función de la recuperación minera o el valor total, de caserones de carácter robusto frente a la incertidumbre de las variables no controlables representadas mediante la automatización de un flujo de trabajo el cual permita la simulación de miles de escenarios.

1.2.2 Objetivo Específico

Identificar y definir los parámetros de diseño y las variables no controladas asociadas al proceso de diseño de caserones, determinar su comportamiento y los valores usualmente utilizados en la industria a fin de obtener una simulación de carácter representativa.

Elaborar una metodología que contemple un modelo de simulación que incorpore aquellas variables propias del diseño de caserones antes mencionadas y genere resultados tales como flujo de caja total, factor de seguridad y recuperación que sirvan como índices para el posterior análisis de resultados.

Estudiar los efectos que tiene la incertidumbre de las variables no controladas sobre los índices definidos como respuesta y determinar cuáles son parámetros relevantes junto a cuál es la mejor combinación de cara a los requerimientos del diseño.

1.3 Alcance

El alcance del trabajo desarrollado corresponde a lo siguiente:

- La metodología propuesta está enfocada en minas explotadas mediante sistemas que utilizan caserones como unidades básicas de explotación, tal como *sublevel stoping*.
- La construcción del modelo de simulación fue realizada en Isight 2019, el cual contempla la utilización de SURPAC 2019 y códigos escritos en lenguaje de Python. Estos softwares fueron utilizados debido a que la empresa contaba con las licencias de estos productos.
- La forma de diseño de caserones es de carácter esquemático, y está enfocada en la planificación a largo plazo en minería subterránea teniendo claro que SURPAC 2019 permite generar formas más complejas.
- El diseño minero se validará geomecánicamente mediante métodos gráficos de estabilidad, específicamente se utilizará el gráfico de Mathews.
- Para determinar el flujo de caja total de los caserones resultantes se utilizan valores para aquellos parámetros económicos provenientes de *benchmarking*.

1.4 Contenido de Capítulos

Los contenidos de esta investigación se discuten en los siguientes capítulos:

- Capítulo 1: Corresponde a la introducción, se presenta la problemática y el motivo de este trabajo, junto con los objetivos y alcances del presente trabajo.
- Capítulo 2: En este capítulo se da cuenta de los antecedentes que sostienen el trabajo realizado, se menciona el estado del arte de las distintas metodologías para determinar los caserones óptimos, la aplicación de simulaciones en la minería y las características de los parámetros involucrados en el diseño de caserones.
- Capítulo 3: Se describe la metodología propuesta para desarrollar la solución que permite automatizar el diseño de los caserones. Muestra el flujo de trabajo que será la representación de las simulaciones en proyectos de minería subterránea que empleen caserones como unidad de explotación.
- Capítulo 4: Muestra los resultados de la aplicación de la metodología desarrollada en dos casos de estudio.
- Capítulo 5: Presenta los análisis realizados de los resultados obtenidos en el capítulo anterior.
- Capítulo 6: Conclusiones generales del trabajo realizado y recomendaciones a tener en consideración a la posterioridad.
- Capítulo 7: Referencias en las cuales se basa este trabajo para su desarrollo.

Capítulo 2: Marco Teórico

El siguiente capítulo cumple con el objetivo de entregar los conocimientos necesarios para el desarrollo de este trabajo, además contextualiza la labor de la investigación dando sustento a la metodología desarrollada e implementada, por lo tanto, validando los resultados obtenidos.

2.1 *Sublevel Stopping*

Existen distintos mecanismos mediante los cuales se puede extraer la porción del macizo rocoso de interés económico, en particular cuando hablamos de minería subterránea existen 3 clasificaciones: auto-soportados, soportados artificialmente y hundimiento. El primero considera la utilización de excavaciones en la roca cuyo objetivo es la extracción del mineral a baja dilución proveniente de la porción estéril de la roca, dentro de este tipo encontramos *Sublevel Stopping* y *Room & Pillar*. En tanto los sistemas soportados artificialmente utilizan rellenos, usualmente materiales cementados, para sostener las excavaciones luego de la extracción del mineral como sucede en *Cut & Fill*, al igual que en los auto-soportados, la gran ventaja de estos métodos es la selectividad y una mayor recuperación. Finalmente, los métodos hundimiento aprovechan el flujo gravitacional para lograr la extracción sin embargo presentan una mayor dilución, ejemplos de este tipo de sistemas es el *Block/Panel Caving* y *Sublevel Caving*. Es durante las primeras etapas de un proyecto minero donde se debe seleccionar el sistema de explotación. Para esto se consideran el tamaño, la orientación y las características del cuerpo mineralizado.

Se suele utilizar el *Sublevel Stopping* como método de explotación particularmente en casos de yacimientos de carácter masivo o tabular, en la mayoría de los casos cuya potencia sea mayor a 10 m, subverticales a verticales y cuya roca, tanto caja como mineral, presentan buena competencia para disminuir la probabilidad de tener dilución externa.

En este método de explotación el mineral se arranca de la roca mediante perforación y tronadura empleados en forma de abanicos verticales con lo cual se generan excavaciones de grandes dimensiones que reciben el nombre de caserones y corresponden a la unidad básica de explotación de este método. Este material se recolecta en embudos ubicados en la parte inferior de los caserones. Las paredes deben tener un ángulo de inclinación del caserón mayor que el ángulo de reposo del material quebrado.

El método considera distintos desarrollos: un nivel de extracción/producción, embudo de recolección, calles de perforación, una chimenea la cual sirve como cara libre para las distintas tronaduras, entre otros.

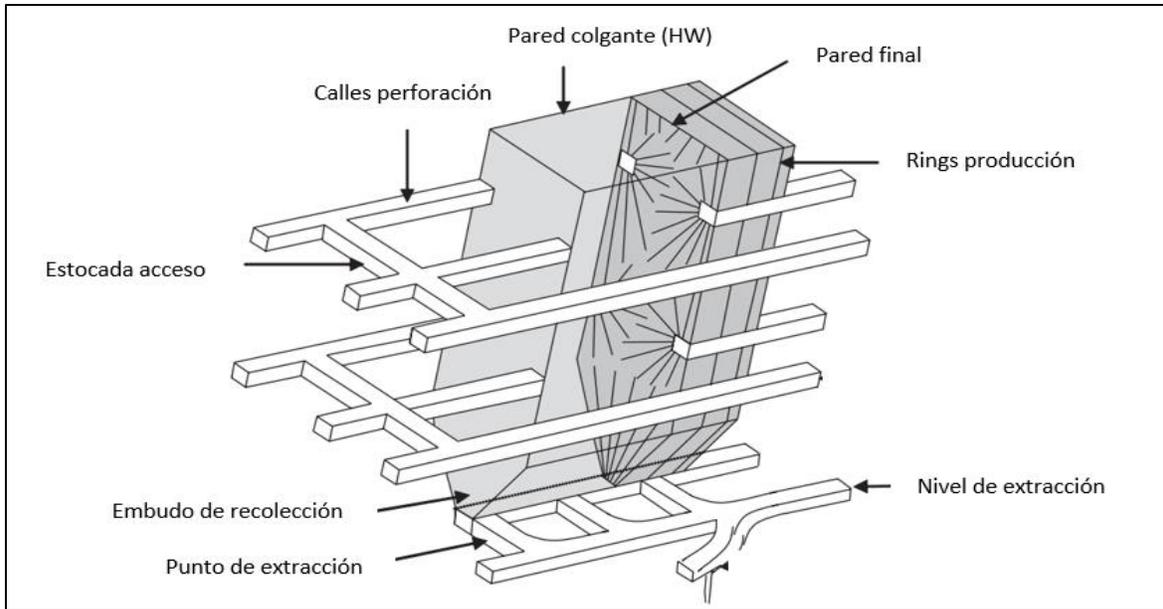


Figura 2. 1 Caserón *Sublevel Stopping*. Fuente: Villaescursa, 2014.

Existen distintas variantes operacionales en la explotación, una de las posibilidades considera el relleno cementado de las excavaciones una vez realizada la explotación, de esta manera se da estabilidad a las paredes y pueden ser aprovechados como pisos o techo en los niveles posteriores. Cabe destacar que este tipo de operaciones suele estar asociado a minería de características polimetálicas, existen operaciones que emplean este método de explotación enfocados en la extracción de un único elemento como por ejemplo cobre.

Uno de los métodos de explotación que considera el relleno es el "*Bench and Fill*", el cual se describe a modo esquemático en la siguiente figura.

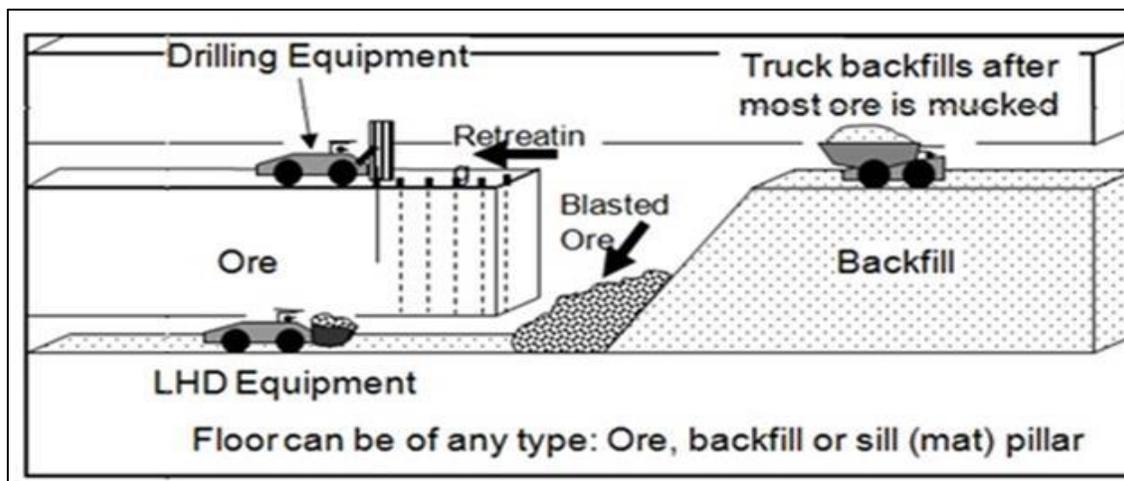


Figura 2. 2 Método *Bench and Fill*. Fuente: Apuntes Fundamentos de Tecnología Minera MI4070, 2016.

Otra variante operacional considera a los caserones como excavaciones que deben ser autosoportados dejando pilares, de estéril o de mineral de baja ley, entre las distintas unidades de explotación, es decir, sin la necesidad de utilizar cemento como relleno para de esta manera facilitar tanto la operatividad como la factibilidad económica de aquel proyecto.

En este caso las características de la roca, condición de esfuerzos (capítulo 2.3 Características Geomecánica) y condiciones operacionales impactan tanto en el tamaño de los caserones como de los pilares, así como en la productividad del sistema de explotación. Usualmente, las ubicaciones de los caserones son determinados a fin de maximizar el valor económico del proyecto. Para esto se han desarrollado distintos métodos para determinar la ubicación óptima. (Capítulo 2.2 Algoritmos usados en la selección y optimización de diseño de caserones)

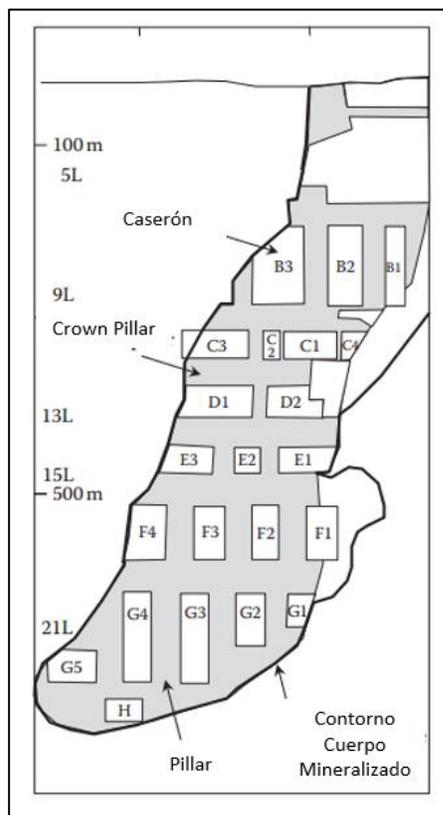


Figura 2. 3 Perfil de explotación *Sublevel Stopping* y pilares. Fuente: Villaescursa, 2014.

El tamaño y numero de caserones depende de factores tanto internos tales como ritmo de producción y externos como campos de esfuerzos, estructuras presentes y calidad del macizo rocoso a fin de obtener un diseño factible y operacionalmente seguro.

Existen distintas variantes cuya diferencia radica en la forma de realizar las perforaciones, el largo de estos tiros y la secuencia de extracción. En las siguientes imágenes se observan dos metodologías convencional y *Long Blast Hole*.

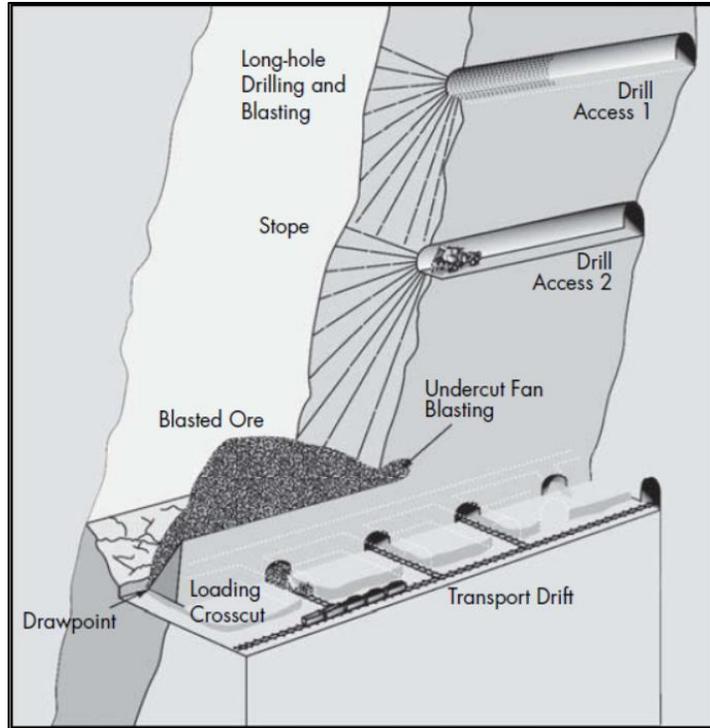


Figura 2. 4 *Sublevel Stoping Conventional*. Hamrin, 2001

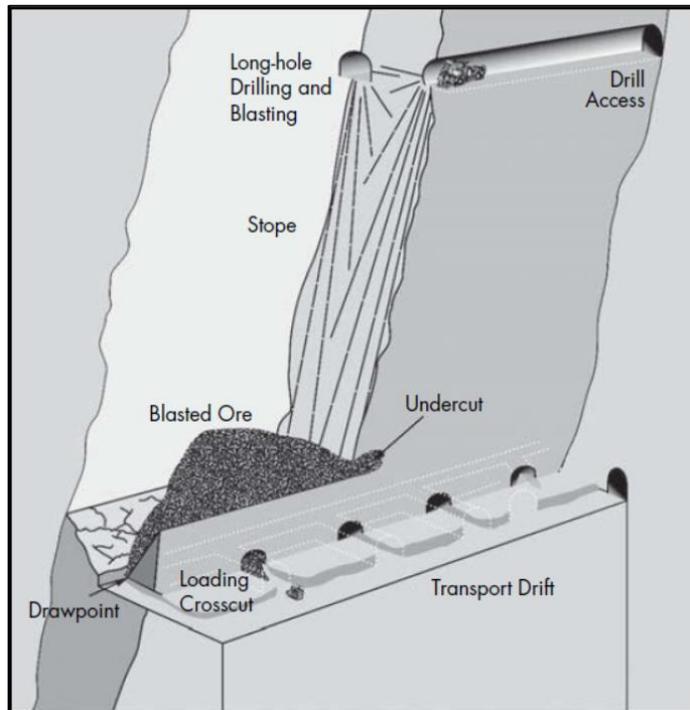


Figura 2. 5 *Sublevel Stoping variante Long Blast Hole* (Hamrin, 2001)

2.2 Algoritmos usados en la selección y optimización de diseño de caserones

Como se mencionó anteriormente la selección de ubicación de los caserones corresponde a la etapa en la cual se busca maximizar el valor del proyecto en la etapa posterior de planificación a través de un diseño óptimo. Por lo que para cumplir con aquel relevante objetivo se han desarrollado distintos algoritmos o metodologías que evalúen aquellos bloques que contenidos dentro de caserón final maximicen el valor de este mismo respetando las restricciones del tipo geométrico y geomecánicos. A continuación, se mencionan algunos ejemplos de estos.

Alford desarrolla el algoritmo de caserón flotante (*Floating Stope Algorithm, 1995*), en este algoritmo se debe definir una ley de corte que marque diferencias entre aquella porción que es mineral cual es estéril para luego flotar un bloque virtual que asimile la forma mínima del caserón, se entrega el punto de partida y se traslada este bloque virtual por la extensión del modelo de bloques del yacimiento hasta que encuentre la posición de mayor ley el cual será definido como la ubicación del caserón. En el caso de existir distintas posibilidades para un mismo bloque virtual se determina que el caserón óptimo corresponde al de mayor ley. Dentro de los principales problemas de este algoritmo es que la solución suele generar caserones “*traslapados*” los cuales se producen debido a que comparten algún bloque de alta ley. Por lo tanto, requiere del criterio y la decisión de un ingeniero para determinar la solución, decisión que termina alejando la solución del óptimo.

Cawrse extiende el método de caserón flotante y, basándose en el mismo principio que el algoritmo de Alford genera el “*Multi Pass Floating Stope Algorithm*” (2001), el cual define no solo una única envolvente, sino que varias basadas en una serie de parámetros con los cuales se diseñan los caserones. Sin embargo, esta mejora no soluciona los problemas existentes en la metodología de Alford.

Maximun Value Neighbourhood (MVN) es una metodología heurística presentada por Ataee-Pour en 2004. La aproximación MVN consiste en determinar un set de vecindades factibles para cada bloque perteneciente al modelo de bloques e identificar la vecindad óptima basado en el valor económico, las dimensiones de esta vecindad se encuentran restringidos por las limitaciones tanto geotécnicas como operacionales. La secuencia exige un primer punto a partir del cual inicie el análisis, por ejemplo, la esquina del modelo de bloques donde se calcula el valor económico de aquel caserón, si el valor es positivo el caserón se mantiene y los bloques contenidos son marcados a fin de no volver a considerarlos en las siguientes opciones de diseño de caserones, por el contrario, de ser negativo el caserón es descartado y se intenta nuevamente desplazando el caserón dentro del modelo de bloques. Este procedimiento continúa hasta evaluar la totalidad del yacimiento obteniendo como respuesta la mejor combinación de bloques evaluando todas las vecindades.

El gran problema de este algoritmo es que al ser una solución heurística del problema es que dependiendo del punto de análisis inicial los resultados varían por lo que para un mismo cuerpo mineralizado habrá distintos diseños. Además, que se asegure el valor positivo por cada caserón no asegura el valor óptimo de la totalidad del diseño.

Topal y Sens (2009) presentan un algoritmo heurístico para la optimización 3D del diseño de caserones permitiendo de diferentes formas y tamaños. Durante la optimización, que utiliza el valor económico de los caserones como criterio de decisión, se evita el desarrollo de caserones “*traslapados*” teniendo como resultado un único set de caserones no “*traslapados*” cuando en realidad existe una serie de combinaciones de caserones que no son considerados en el análisis.

Posteriormente (2011) Sens genera un algoritmo de optimización combinatorial que establece el set de caserones que maximiza la utilidad y cumpla con las restricciones del problema. Una de las ventajas que presenta es la incorporación del tiempo de extracción en el cálculo de valor mediante parámetros como número de caserones, producción diaria y flujo de caja de los caserones. Una de las principales desventajas es que por su forma de optimizar el programa no suele incorporar pilares ni *crown pillar* ya que estos tienden a depender de la posición del caserón.

Little, Knights y Topal (2013) presentan un modelo de optimización integrado que utiliza la programación entera en la generación de planes de largo plazo orientados en optimizar el diseño de caserones y además generar programas de producción especialmente en operaciones del tipo *Sublevel Stopping*. La metodología regulariza el modelo de bloques a un único tamaño para poder optimizar de considerando dos tamaños de caserones fijos, establecidos por el usuario. A partir de esto, se determina el total de caserones posibles en la extensión del modelo de bloques, y según un intervalo regular en cada dirección (X, Y e Z) crea caserones a evaluar con el modelo. Finalmente, se identifican los caserones con utilidad respecto al modelo de planificación y que cumplan con las consideraciones geotécnicas.

Finalmente, Sandanayake (2014) presento un acercamiento heurístico donde en función de las restricciones físicas y geotécnicas de la mina se definen los tamaños máximos de los caserones para la maximización del valor. Para esto se pasa de un modelo de bloques a uno económico además se considera un set de caserones cuyas paredes o vértices no se encuentren en contacto para luego calcular el valor económico de cada set y determinar el de mayor beneficio correspondiente al óptimo de la solución. Como desventaja de este modelo se tiene un alto costo computacional de acuerdo a la cantidad de soluciones que puede existir para un mismo modelo de bloques.

2.2.1 Stope Shape Optimizer (Slice Method)

El método de corte o “*Slice Method*” corresponde a la solución implementada por Alford Mining Systemes (AMS) utilizada en softwares como DATAMINE, VULCAN y SURPAC en sus respectivos módulos de diseño de caserones. Para su aplicación se requiere definir algunas características del yacimiento. De acuerdo a la orientación del cuerpo mineralizado se tienen las siguientes 2 categorías:

- Vertical: orientación del cuerpo mineralizado en los planos XZ o YZ.
- Horizontal: orientación en plano XY.

El usuario debe especificar la orientación del cuerpo mineralizado, de acuerdo a las dos categorías antes mencionadas, y sobre el plano de la orientación se realiza un enmallado al modelo de bloques. A partir de lo anterior es posible definir ejes con nombres genéricos:

- Eje U: Define el “*strike*” y largo de los caserones, corresponde al eje principal.
- Eje V: Determina la dirección secundaria y la altura (caso vertical) o ancho (horizontal) de los caserones
- Eje W: Es la dirección terciaria y es en el cual ocurre la optimización. En esta dirección es donde se generan pequeños cortes de a través del yacimiento que se encadenan siguiendo las restricciones geométricas ingresadas.

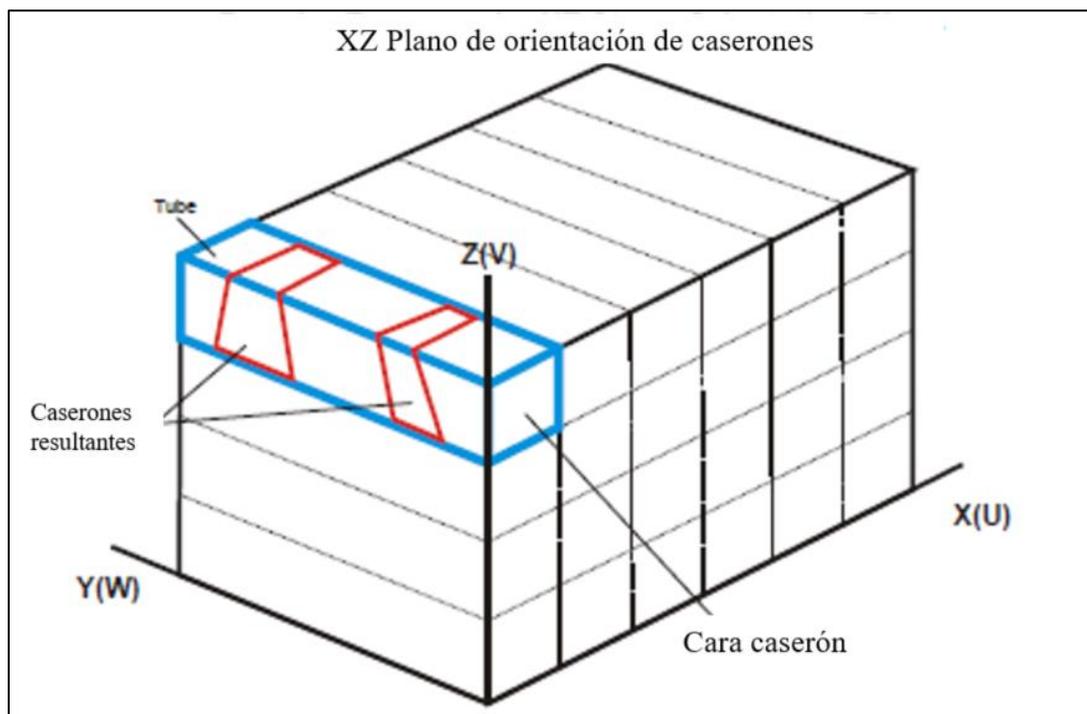


Figura 2. 6 Ejemplo definición de la geometrías del slice method, malla regular, orientación XZ. Fuente: *Stope Shape Optimizer* Versión 3.1.0 Reference Manual

En función la Figura 2. 6 podemos describir la geometría de la siguiente manera:

- Plano de orientación de los caserones: Plano definido por la orientación del enmallado (XZ, YZ, XY).

- Cara de los caserones: Corresponde a la forma definida por las dimensiones U y V.
- El “*Tube*”: Espacio 3D, definido por la cara del caserón y la extensión del enmallado en el eje W.

El método genera y evalúa pequeños cortes definidos por el usuario a través de las zonas mineralizadas (es decir, a lo largo del “*Tube*”), estos cortes se recopilan dentro de formas que satisfacen las restricciones de ancho de caserón y pilares definidos por el usuario y que cumplan con los valores de ley media o de valor del caserón objetivo. En caso de no cumplir con alguna restricción son eliminados. Las formas generadas corresponden a elementos de distinto largo a fin de ajustar de mejor manera al yacimiento y por tanto obtener mejores resultados de recuperación y flujo de caja.

Es relevante mencionar que por construcción del método la optimización ocurre en una única dimensión, correspondiente al eje W. Existe en desarrollo actualmente una variante que permite optimizar en 2 dimensiones, ejes V y W, el cual no se encuentra disponible al momento de este trabajo.

Es aplicable cuerpos mineralizados tanto tabulares estrechos como anchos y de características subverticales a subhorizontales. Los resultados corresponden a cuerpos esquemáticos, paralelepípedos, los cuales cumple con dar una guía en la planificación a largo plazo en minería subterránea que utilice caserones.

2.2.2 El problema en la definición de la ubicación de caserones

Particularmente, el ejercicio de la definición de la ubicación y forma de los caserones corresponde a un ejercicio de carácter determinista, el procedimiento actual consiste en la selección de perfiles del yacimiento donde de forma manual se dibujan y definen las envolventes que corresponden a los caserones, luego de finalizar esta etapa de diseño los caserones resultantes son evaluados en términos de estabilidad mecánica y en caso de no cumplir con el factor de seguridad solicitado el procedimiento debe volver a repetirse.

Cabe destacar que dentro del análisis no se suele incorporar la incertidumbre proveniente tanto de variables internas como externas. Esta omisión suele provocar en muchos casos diferencias de los retornos obtenidos de un proyecto minero respecto a aquellos prometidos en el estudio de perfil y por lo tanto implican altas probabilidades de errores en la estimación del CAPEX, magnitud de reservas, costos operacionales productividad y determinación de leyes.

Las variables internas están relacionadas con la organización de la empresa y sus activos, así como también por sus procesos. Mientras que las externas, son aquellas ajenas a la empresa, como la incertidumbre del mercado, desconocimiento del yacimiento, etc.

Por lo tanto, al momento de definir la ubicación de los caserones es necesario contemplar esta variabilidad de los factores involucrados en la decisión a fin de minimizar la variabilidad o ruido de los resultados. Es decir, incorporando la incertidumbre en el análisis es posible entregarle al diseño la cualidad de robustez.

2.3 Características Geomecánicas

Particularmente en sistemas de explotación *Sublevel Stopping* los parámetros de entrada de mayor importancia para verificar la factibilidad de implementar aquel sistema de explotación son aquellas relacionadas a la condición geotécnica del macizo rocoso, los cuales corresponden a los siguientes:

- Q de Barton modificado
- Resistencia a la compresión uniaxial de la roca
- Estado tensional
- Presencia y características de estructuras

2.3.1 Q de Barton

Es el sistema de clasificación más relevante para esta memoria pues corresponde al índice utilizado por Mathews en sus trabajos de estabilidad de caserones los cuales serán detallados más adelante. Este sistema permite establecer sistemas de sostenimiento de túneles y considera en su evaluación 6 parámetros:

- RQD: Corresponde al índice designación de calidad de roca definido por Deere.
- J_n : Factor asociado al número de set de estructuras presentes en el macizo rocoso.
- J_r : Factor asociado a la rugosidad de las estructuras.
- J_a : Factor asociado a la condición de alteración.
- J_w : Factor asociado a la condición de agua.
- SRF (Stress Reduction Factor): Factor asociado al efecto de la condición de esfuerzos presentes en el macizo rocoso.

Los parámetros antes mencionados se relacionan de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$$

Ecuación 1. Q de Barton

El primer coeficiente (RQD/J_n) hace referencia al tamaño de los bloques de roca, el segundo (J_r/J_a) representa la resistencia al corte entre bloques y el último coeficiente es (J_w/SRF) hace referencia al estado tensional.

Particularmente Mathews utiliza una modificación de este sistema en el cual el último coeficiente (J_w/SRF) tiene valor 1. Por lo tanto, la ecuación queda:

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

Ecuación 2. Q de Barton modificada

En la siguiente tabla se observa la descripción del macizo rocoso según la clasificación de Barton.

Tabla 2. 1 Clasificación de macizo rocoso según Barton

Q	Descripción Calidad de la Roca
0,001 - 0,01	Muy Pobre
0,01 - 0,1	Pobre
0,1 - 1	Muy Malo
1 - 4	Malo
4 - 10	Regular
10 - 40	Bueno
40 - 100	Muy Bueno
100 - 400	Excelente
400 - 1000	Excepcional

Particularmente para *Sublevel Stopping* se han realizado estudios (Potvin & Hudyma, 1989) enfocados en 34 minas de Canadá, donde se determina que la calidad de la roca mineralizada era buena a muy buena, es decir $Q' > 10$ en un 85% de estas minas.

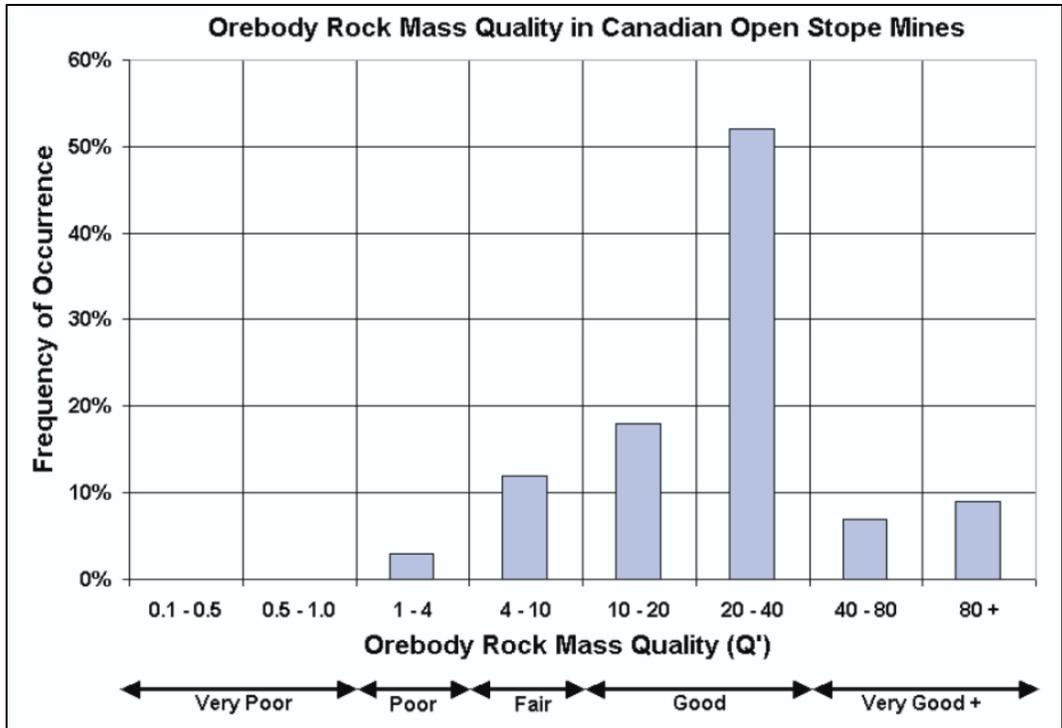


Figura 2. 7 Recopilación de Calidad de roca en minas canadienses. Fuente: Potvin & Hudyma, 1989)

Otro resultado de aquel estudio hace relación entre la potencia del cuerpo mineralizado y el índice Q'. Se determinó que en 7 de cada 9 operaciones que presentan una calidad de roca mineralizada regular a muy mala ($Q' < 10$), tienen una potencia inferior a 10 m. Por lo tanto, el método *Sublevel Stopping* puede ser empleado en condiciones de roca regular a muy mala, para cuerpos mineralizados con forma de vetas angostas.

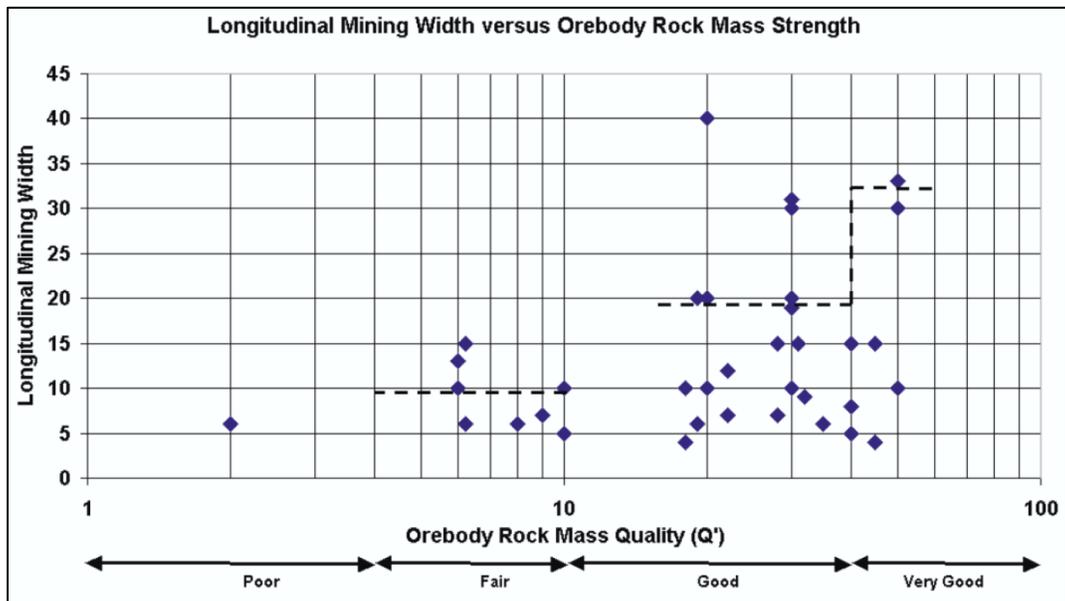


Figura 2. 8 Relación calidad de roca y ancho caserón. Fuente: Potvin & Hudyma, 1989.

2.3.2 Resistencia a la compresión uniaxial (UCS)

El comportamiento mecánico de las rocas está definido por su resistencia y su deformabilidad. La resistencia es el esfuerzo que soporta una roca para determinadas deformaciones. Cuando la resistencia se mide en probetas de roca sin confinar se denomina resistencia a compresión simple, y su valor se emplea para la clasificación geotécnica de las rocas. Se obtiene mediante el ensayo de resistencia uniaxial o de compresión simple.

Se pueden utilizar estudios exhaustivos de UCS para suministrar datos estructurales para muchas aplicaciones de minería e ingeniería, entre ellas, distintos estudios geotécnicos de excavaciones subterráneas, como es el caso de caserones y desarrollos.

2.3.3 Estado tensional

Los esfuerzos son fundamentales en el diseño de excavaciones subterráneas, tanto civiles como mineras. El esfuerzo está definido como fuerza por unidad de área y su unidad de medición son los MPa.

Los esfuerzos en tres dimensiones quedan determinados por esfuerzos normales y de corte, sumando un total de 9 componentes. Éstos están definidos en planos y direcciones cartesianas de la siguiente forma, cabe destacar que la convención que se presenta toma como esfuerzo positivo al esfuerzo compresivo.

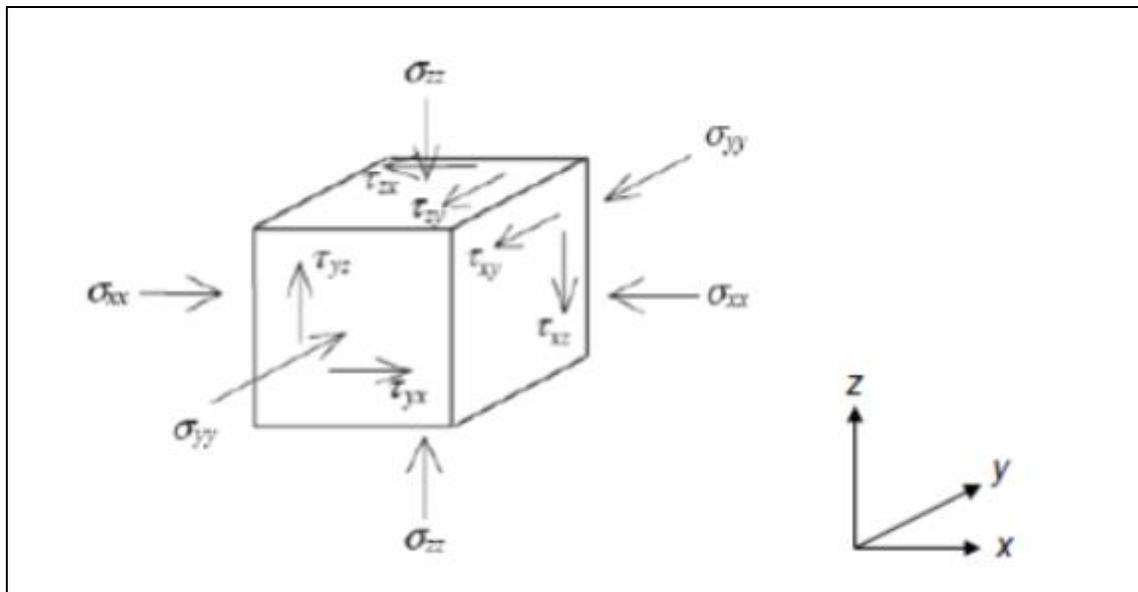


Figura 2. 9 Componentes del tensor de esfuerzos en 3D. Fuente: Mecánica de rocas MI4060, 2015.

La actividad minera causa una división entre distintos tipos de esfuerzos, los cuales se pueden dividir en esfuerzos in situ e inducidos. Los primeros se relacionan a las condiciones preexistentes en el macizo rocoso, mientras que los esfuerzos inducidos son aquellos que se

originan producto de las excavaciones. Los esfuerzos In situ dependen del esfuerzo gravitacional y tectónico.

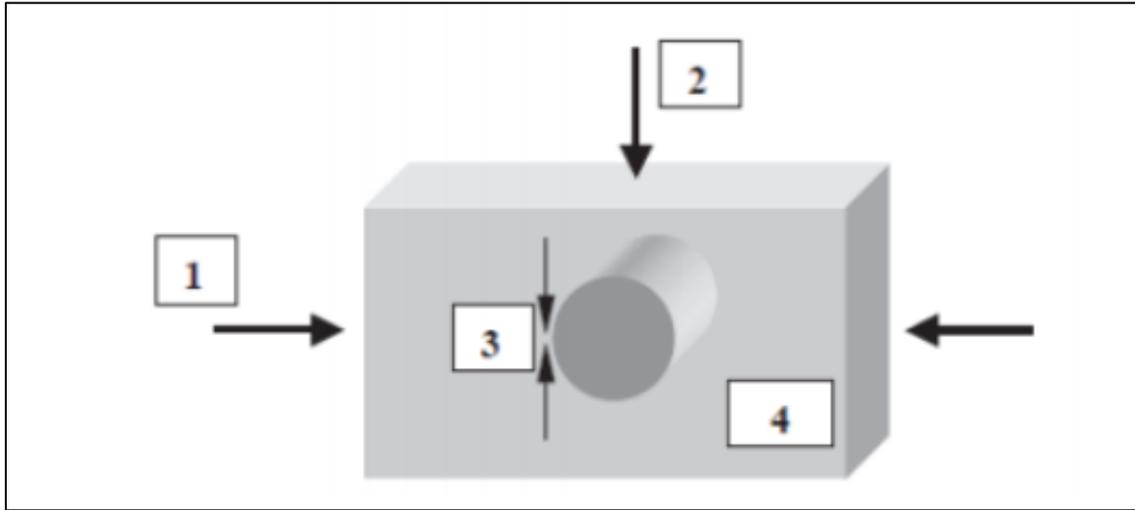


Figura 2. 10 Tipos de esfuerzos. Fuente: Hudson, Cornet y Christiansson, 2003.

En particular en la metodología mediante *Sublevel Stopping* es importante destacar 2 relevantes, esfuerzo vertical y horizontal.

El esfuerzo gravitacional o vertical, σ_v , generalmente es el resultado del peso de la columna de roca por unidad de área sobre el lugar de medición, pero suele estar afectado además por otras variables como la topografía, esfuerzos inducidos, procesos geológicos, erosión y tectonismo.

El esfuerzo horizontal es mucho más complejo y depende de más factores como las condiciones de borde y las propiedades de la roca. Se define además la razón de esfuerzo vertical y horizontal de la siguiente manera:

$$k = \frac{\sigma_h}{\sigma_v}$$

Ecuación 3 Relación esfuerzo horizontal y vertical

La razón k de esfuerzos contempla valores que varían entre 0 a 5.5 según estudios empíricos y depende de la profundidad. Cuando el valor es mayor a 3 se estima que la relación de los esfuerzos está asociada a procesos de erosión en la capa más superficial de la corteza terrestre, además de otros factores como composición de la roca y tectonismo. A menor profundidad el k es mayor, por otro lado, cuando aumenta la profundidad, el esfuerzo vertical aumenta hasta igualar al esfuerzo horizontal adquiriendo valores de k cercanos a 1.

2.3.4 Presencia y características de estructuras

En las primeras etapas de la investigación de la geología de un área, se debe poner mucha atención en el conjunto de discontinuidades presentes en el macizo rocoso. Los cuales deben ser caracterizados en ubicación y orientación. Siendo los planos los más comunes de ellos.

La presencia de estos elementos puede afectar en la estabilidad de los distintos caserones ya que están asociados a elementos de características distintas a aquellas del macizo rocoso por lo que deben ser consideradas como un factor de ajuste dentro del análisis de estabilidad.

2.4 Diseño de Pilares

Para lograr un diseño factible y seguro de una operación *Sublevel Stopping* auto-soportada se requiere la utilización de pilares entre los caserones contiguos. Existen dos tipos de pilares los cuales deben ser dimensionados:

2.4.1 Pilares Verticales

Pilares de esta característica se dimensionan utilizando la metodología implementada por Lunder & Pakalnis (1997). Como primer paso se debe determinar la razón entre el área tributaria y el área del pilar. Siendo área tributaria aquella área que multiplicada por la carga uniforme define la carga total que actúa sobre el pilar.

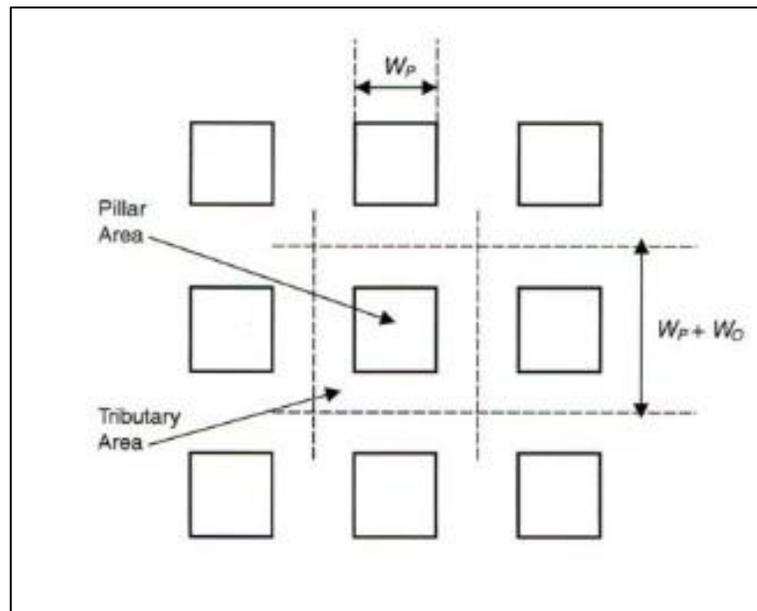


Figura 2. 11 Ejemplo Área tributaria, Fuente: Mecanica de rocas MI4060, 2015.

$$\frac{\text{Área Tributaria}}{\text{Área del Pilar}} = \frac{w_p + w_o}{w_p}$$

Ecuación 4. Razón área tributaria y área del pilar

Donde:

w_p = Ancho del pilar

w_o = Ancho del caserón

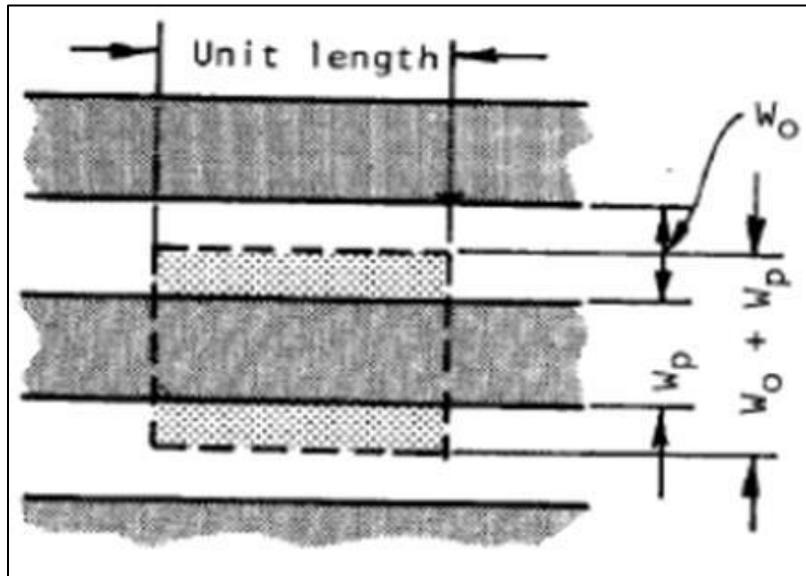


Figura 2. 12 Esfuerzo inducido sobre pilares. Fuente: Hoek & Brown, 1980.

La relación anterior es utilizada a continuación para determinar el esfuerzo inducido según la siguiente ecuación:

$$\sigma_{inducido} = \sigma_{vertical} \times \frac{\text{Área Tributaria}}{\text{Área del Pilar}} = \sigma_{vertical} \times \frac{w_p + w_o}{w_p}$$

Ecuación 5. Calculo esfuerzo inducido

Posteriormente se debe calcular la resistencia del pilar, para esto se determinan 2 parámetros, los cuales hacen referencia al confinamiento promedio del pilar y la fricción del pilar, mediante las siguientes expresiones:

$$C_{pav} = 0,46 \times \left[\log \frac{w}{h} + 0,75 \right] \left[\frac{1,4}{\left(\frac{w}{h} \right)} \right]$$

Ecuación 6. Confinamiento promedio del pilar (C_{pav})

$$K = \tan \left[\text{acos} \left(\frac{1 - C_{pav}}{1 + C_{pav}} \right) \right]$$

Ecuación 7. Fricción del pilar (K)

Donde:

w = Ancho del pilar (m)

h = Altura del pilar (m)

En función de estos parámetros es posible definir la resistencia del pilar de acuerdo a la siguiente expresión.

$$S = k \times \sigma_{ci} \times (C_1 + K \times C_2)$$

Ecuación 8. Resistencia del pilar (S)

Donde:

k = Factor de relación (0,44)

σ_{ci} = Resistencia a la compresión de la roca intacto [MPa]

C_1, C_2 = Coeficientes empíricos ($C_1 = 0,68$ y $C_2 = 0,52$)

Finalmente se calcula el factor de seguridad de acuerdo a la siguiente expresión:

$$F.S. = \frac{S}{\sigma_{inducido}}$$

Ecuación 9. Factor de seguridad (F.S.)

2.4.2 Pilares Horizontales

Para el dimensionamiento de los pilares horizontales o Crown Pillar se implementará la metodología implementada por Tavakoli (1994) donde se esquematiza el pilar como una viga empotrada en sus 2 extremos.

Como primer se utiliza el nomograma de la siguiente figura para determinar el espesor mínimo, a fin de obtener una primera aproximación.

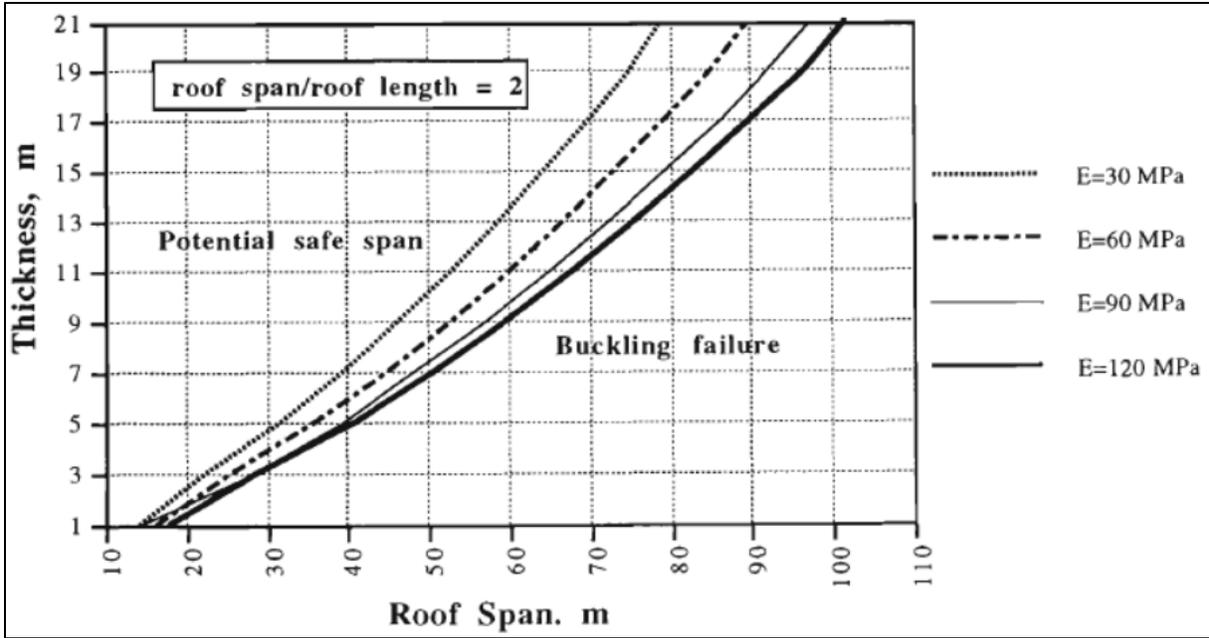


Figura 2. 13 Nomograma espesor mínimo del pilar corona. Fuente: Tavakoli, 1994.

El esfuerzo inducido se obtiene relacionando la altura del caserón y el espesor del pilar en el siguiente gráfico.

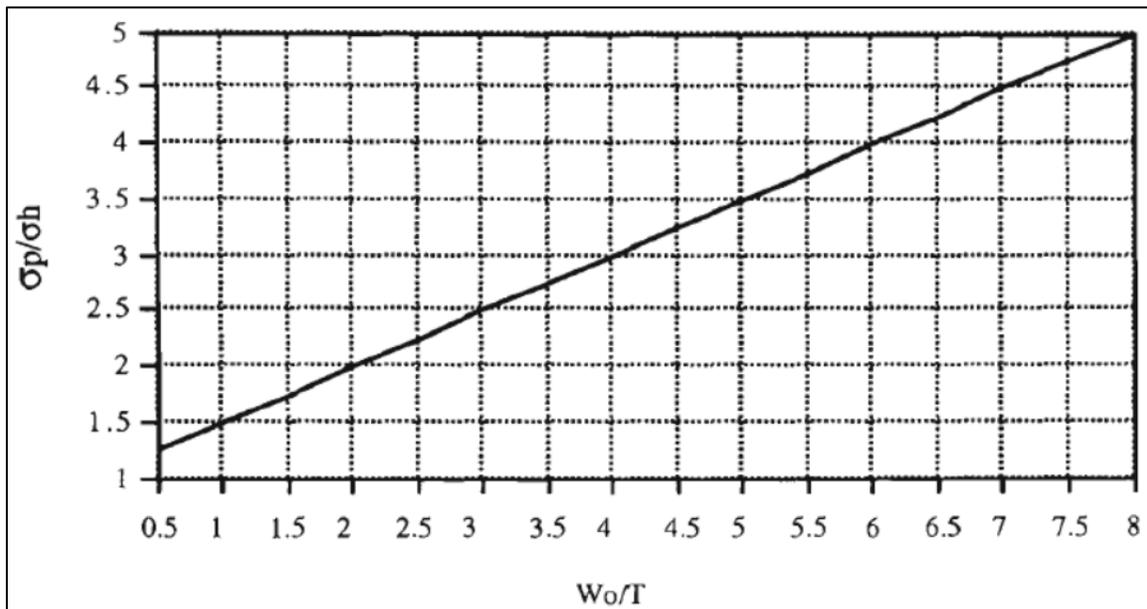


Figura 2. 14 Grafico Esfuerzo inducido/Esfuerzo horizontal vs Altura Caserón/Ancho del pilar. Fuente: Tavakoli, 1994.

La resistencia del pilar corona o loza se determina mediante el uso de las siguientes expresiones:

$$Q = Q' x \frac{J_w}{SRF}$$

Ecuación 10. Q de Barton

$$RMR_b = 9 x \ln Q + 44 \quad [MPa]$$

Ecuación 11. RMR Bieniawski

$$RMR_L = 0,9 x RMR_b + 2 \quad [MPa]$$

Ecuación 12. RMR Laubscher

$$RMS (S) = IRS x \left(\frac{RMR_L - P(IRS)}{80} \right) x 0,8 \quad [MPa]$$

Ecuación 13. Resistencia del macizo Rocoso

Donde:

RMS = Resistencia del macizo rocoso [MPa]

IRS = Resistencia de la roca intacta (UCS) [MPa]

RMR_L = Rock Mass Rating de Laubscher

P(IRS) = Puntaje Resistencia a la roca intacta

RMR_B = Rock Mass Rating de Bieniawski

El puntaje de la resistencia de la roca intacta, P(IRS), corresponde a una asignación de un valor de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 2. 2 Asignación de Puntaje resistencia a la roca intacta

P(IRS)	Rango UCS
15	Mayor o igual a 250
12	100 - 250
7	50 - 100
4	25 - 50
2	5 - 25
1	1 - 5

2.5 Diseño de Caserones

2.5.1 Descripción Caserón

Las unidades de explotación del método *Sublevel Stopping*, es decir, los caserones, quedan definidos por las siguientes paredes: *Hanging Wall*, *Foot Wall*, *Crown* y *End /Side Wall* los cuales se muestran en la siguiente figura. Además, existen 2 ángulos los cuales son *Dip* y *Strike*.

Algunos de los parámetros antes mencionados se observan en la siguiente figura:

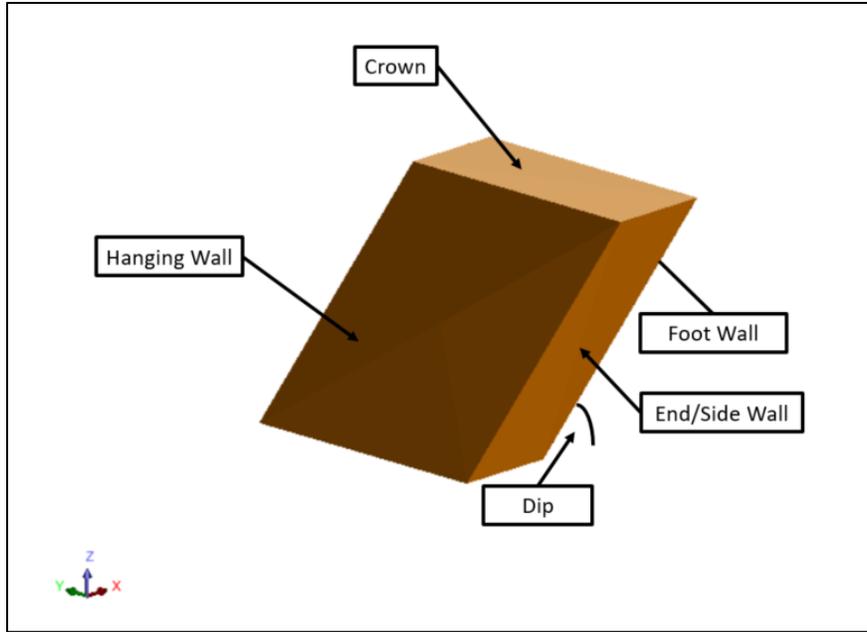


Figura 2. 15. Esquema Caserón, Elaboración propia.

2.5.2 Diseño de Caserones

Mathews presenta una herramienta grafica de diseño y análisis de estabilidad que utiliza el factor de forma y el número de estabilidad como parámetros de entrada.

El radio hidráulico corresponde a un factor de forma y se define como:

$$RH = \frac{A}{P}$$

Donde:

- A = Área de cara evaluada
- P = Perímetro de cara evaluada

Mientras que el número de estabilidad contempla el valor de Q' y 3 factores de corrección: A, B y C que hacen referencia a la condición de esfuerzos, el set de estructura y el ángulo de las paredes del caserón respectivamente.

El número de estabilidad de Mathews se define con la siguiente expresión:

$$N = Q' \times A \times B \times C$$

Ecuación 14. Número de estabilidad de Mathews

2.5.2.1 Factor A: Factor de esfuerzos

El factor A representa el efecto del fracturamiento debido a la condición de esfuerzos presentes en la excavación y la resistencia a la compresión uniaxial, puede tener valores entre 0 y 1.

Para determinar el factor de esfuerzo de los distintos planos del caserón se debe medir el esfuerzo inducido en el punto medio de cada plano. Para realizar esto se utilizan las curvas de diseño introducidas por Stewart & Forsyth (1995) los cuales se muestran en la **Figura 2. 16** y **Figura 2. 17**.

En caso de que el esfuerzo inducido sea de magnitud negativa el valor del Factor A corresponde a 1, excepto exista una relajación total o tangencial donde el factor A toma valor 0,7.

Una vez determinado el esfuerzo inducido actuante en el punto medio de cada pared, se determina el factor A de acuerdo al grafico en la Figura 2. 18, donde se evalúa la razón entre la resistencia a la compresión uniaxial (UCS) y el máximo esfuerzo inducido en compresión.

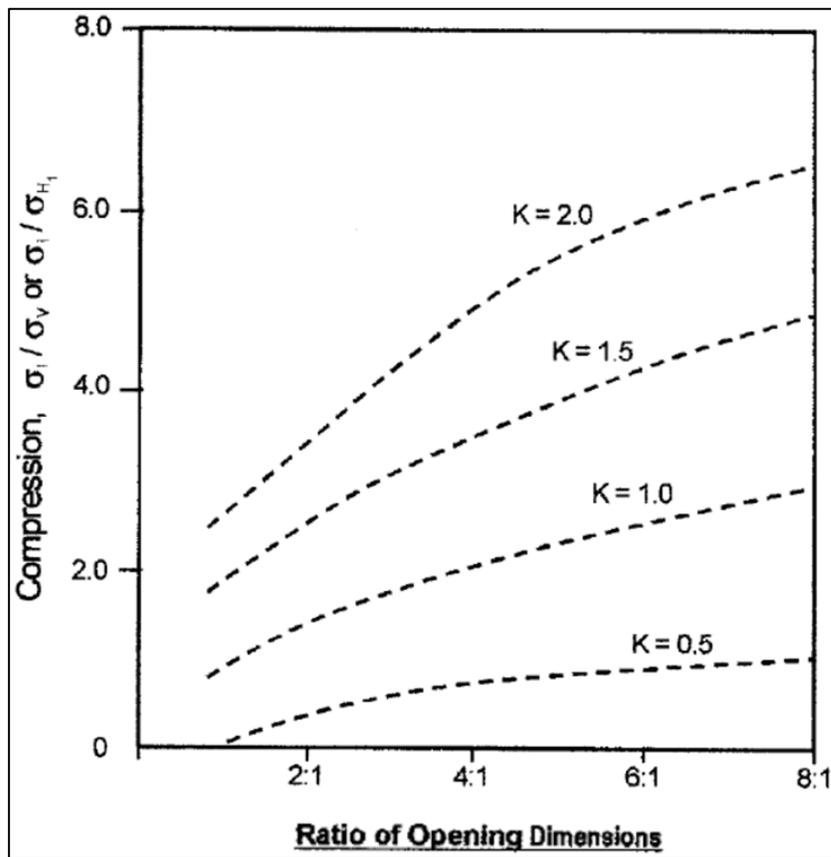


Figura 2. 16 Curvas de diseño para paredes Crown/End Wall. Fuente: Stewart & Forsyth, 1995.

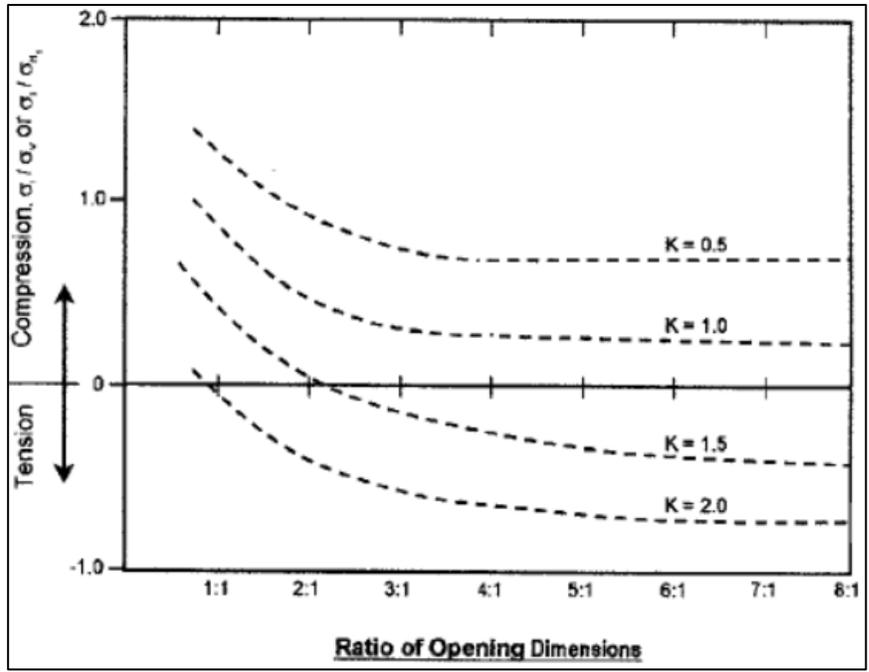


Figura 2. 17 Curvas de diseño para los planos *Hanging/Foot Wall*. Fuente: Stewart & Forsyth, 1995.

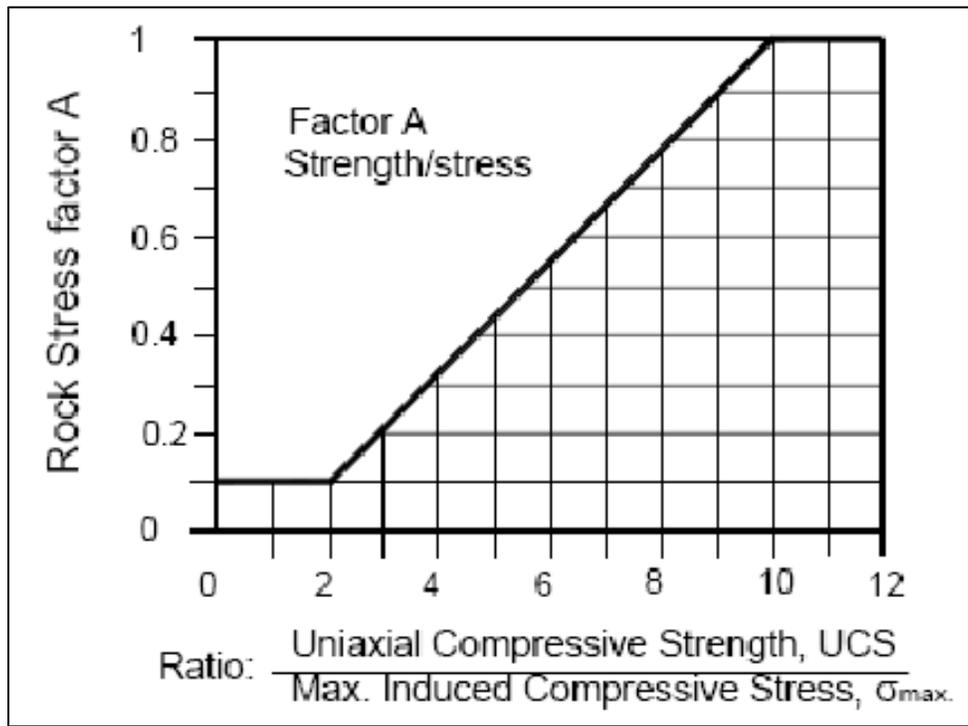


Figura 2. 18 Gráfico Factor A. Fuente: Mathews, 1980.

2.5.2.2 Factor B: Factor de Estructuras

El factor B contempla al ángulo resultante entre los planos del set estructural y el plano de la cara evaluada del caserón, siendo el set de estructura aquel de mayor influencia para la

estabilidad de la unidad de explotación en cada cara. En función de los datos de la imagen **Figura 2. 20** se interpolan el resto de valores generándose el grafico de la Figura 2. 19.

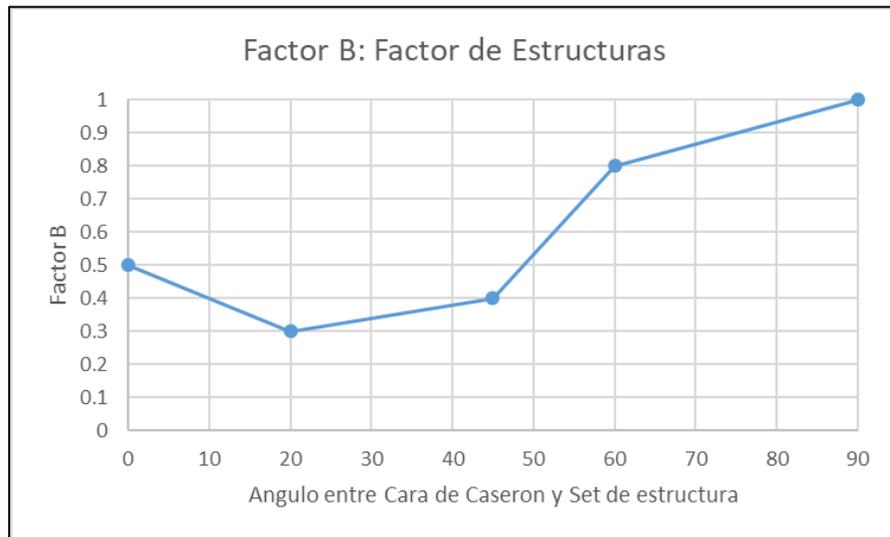


Figura 2. 19 Factor B, elaboración propia.

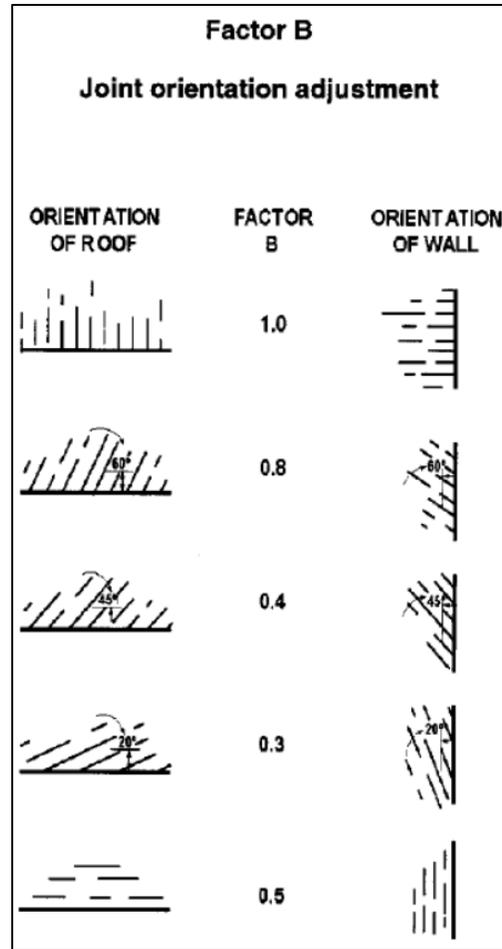


Figura 2. 20 Parámetros Factor B. Fuente: Mathews, 1980.

2.5.2.3 Factor C: Factor de ajuste por gravedad

El Factor C corresponde al factor que evalúa los efectos de la orientación e inclinación de los planos del caserón en la estabilidad de este mismo. Para determinar el valor de este factor se utiliza la siguiente ecuación:

$$C = 8 - 7 \times \cos(\alpha)$$

Ecuación 15. Factor C

Donde:

- α = ángulo formado entre el plano del caserón evaluado y la horizontal.

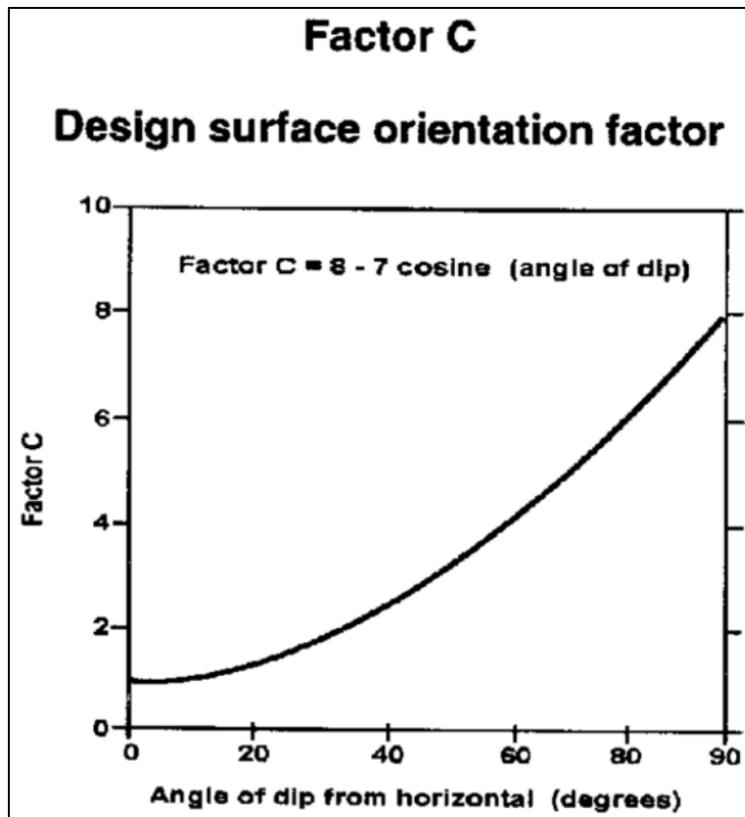


Figura 2. 21 Gráfico Factor C. Fuente: Mathews, 1980.

2.5.3 Métodos Gráficos de Estabilidad

La herramienta para determinar la estabilidad de la unidad de explotación en sistemas *Sublevel Stopping* corresponde al método gráfico desarrollado por Mathews (1980) cuyo trabajo continuó desarrollándose hasta principios del siglo XXI.

Al incorporar la regresión logística a los métodos gráficos de análisis se permite agregar la probabilidad de la estabilidad de una unidad de explotación y como esta se ve alterada por variaciones en parámetros como la calidad del macizo rocoso o esfuerzos inducidos. Por lo tanto, nos es posible definir estadísticamente el comportamiento del caserón.

Todos los distintos gráficos tienen como parámetros de entrada: el Número de estabilidad de Mathews y el Radio Hidráulico.

2.5.3.1 Mathews (1980)

Mathews introdujo una herramienta de diseño preliminar para caserones abiertos en el año 1980, la metodología propuesta se basa en la utilización de un gráfico que relaciona el número de estabilidad de Mathews (N) con el factor de forma o radio hidráulico (S). El gráfico

de estabilidad de Mathews es dividido en tres zonas: Estable, Potencialmente Inestable y Potencialmente *Caving*, el grafico se observa en la Figura 2. 22

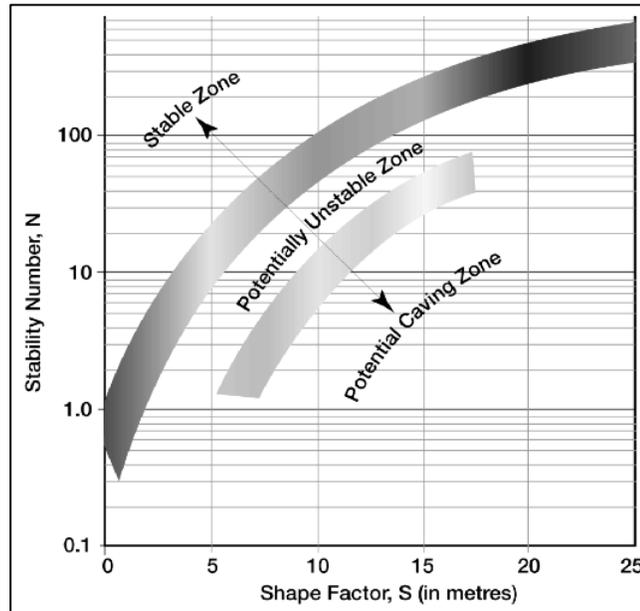


Figura 2. 22 Gráfico de estabilidad de Mathews (1980)

2.5.3.2 Potvin (1988)

Posteriormente, Potvin aumenta el registro de datos mediante la recopilación de información de otras minas y modifica el grafico establecido previamente por Mathews. Uno de los principales cambios es la definición de dos zonas: Estable y “Caved”. Por lo que la zona caved hace referencia a una zona inestable por sobre a una zona en estado de *caving*.

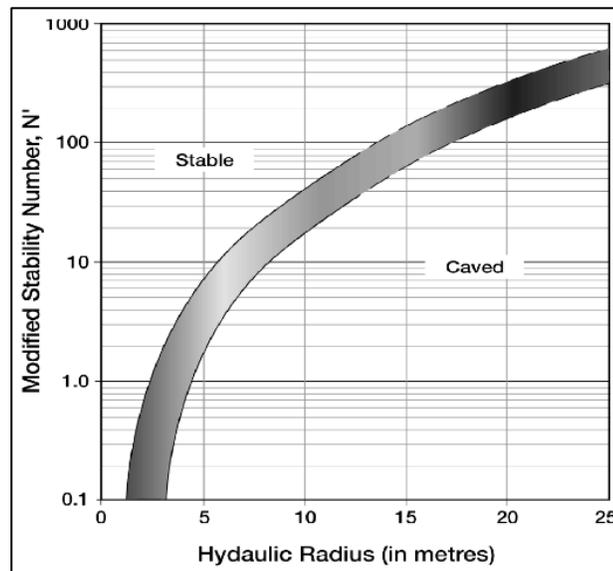


Figura 2. 23 Grafico de estabilidad modificado por Potvin (1988)

2.5.3.3 Stewart & Forsyth (1995)

Stewart & Forsyth en 1995 presentan una nueva versión del gráfico de estabilidad de Mathews y proponen 4 zonas distintas: Potencialmente Estable, Potencialmente Inestable, Potencial Falla Mayor y *Potencial Caving*. Esta versión tiene como origen el gráfico de hundibilidad de Laubscher por lo que se caracteriza de mejor manera la zona de hundimiento establecida por Mathews en sus primeros trabajos, pero no necesariamente la zona donde los caserones son estables.

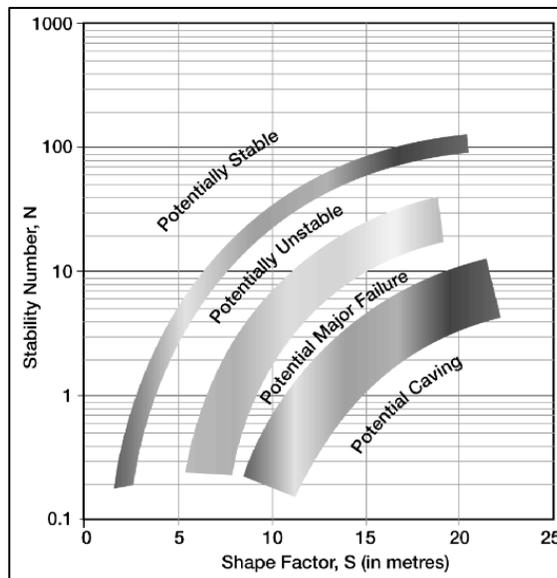


Figura 2. 24 Gráfico de estabilidad de Mathews modificado por Stewart & Forsyth (1995)

2.5.3.4 Mawdesley (2001/02)

Mawdesley realiza en su trabajo una regresión logarítmica a la información obtenida desde 400 datos relacionados a estabilidad de caserones evaluados mediante la metodología de Mathews, de esta manera logra delimitar mediante límites estadísticos las zonas de estabilidad, falla menor y falla mayor. Importante es mencionar que es el primer trabajo donde se entregan herramientas para cuantificar la incertidumbre en la aplicación del método de Mathews.

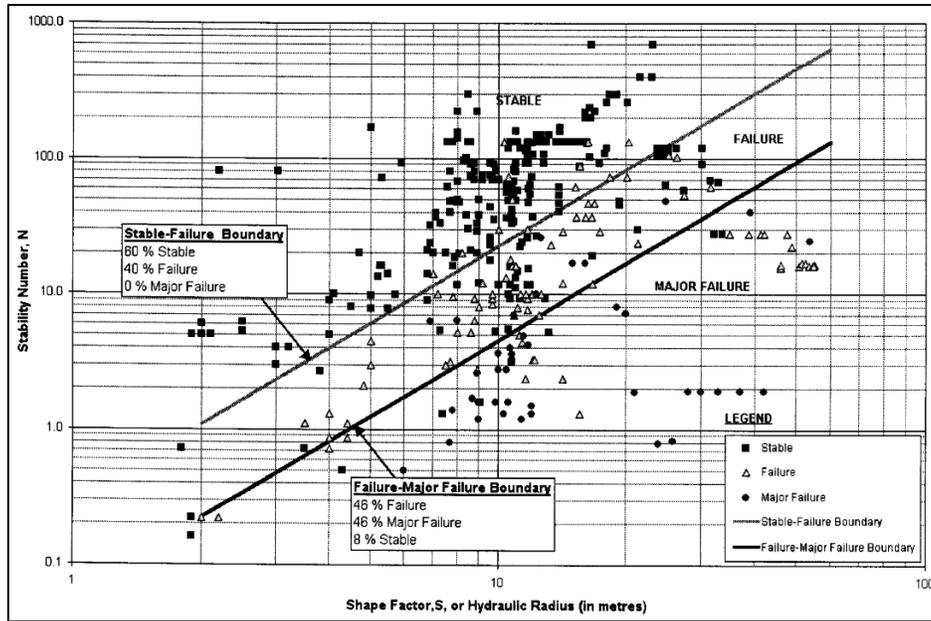


Figura 2. 25 Gráfico de Estabilidad de Mathews para regresión logarítmica (Mawdesley, Trueman & White, 2001)

Posteriormente en 2002 Mawdesley adecua la regresión logística a un modelo de probabilidad para generar valores predictivos (logit value) y así se determinan las zonas de Estabilidad, Falla, Falla Mayor, *Caving* como se muestra en la Figura 2. 26.

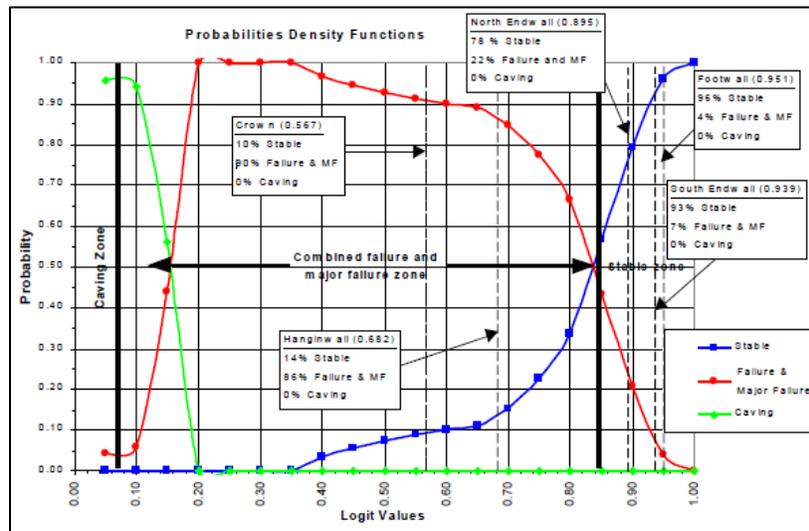


Figura 2. 26 Funciones de probabilidad para las zonas estables, falla mayor y *caving* (Mawdesley, 2002)

Mawdesley continuo su trabajo incorporando información sobre minas explotadas mediante métodos de hundimiento y extendió el análisis a fin de evaluar la hundibilidad. Finalmente, en función de toda la información recopilada es posible definir contornos de isoprobabilidad para la zona *Caving*.

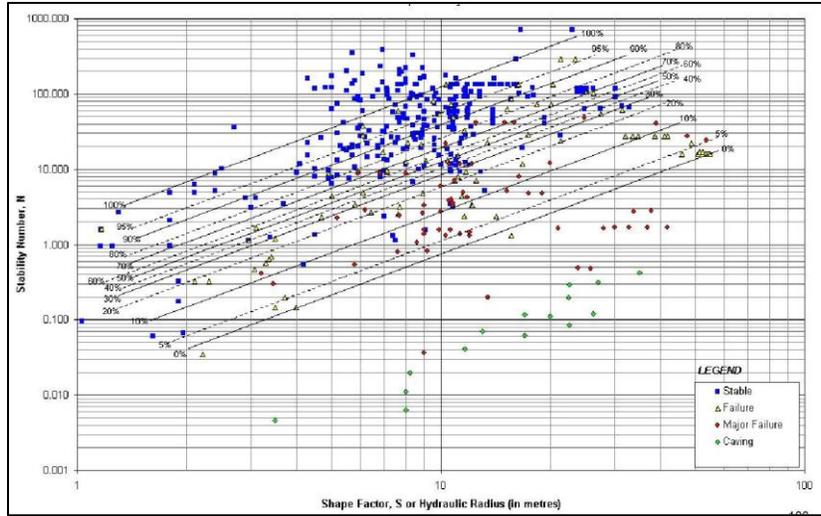


Figura 2. 27 Contornos de isoprobabilidad (Mawdesley, 2002)

Finalmente se determinan los límites que dividen las zonas de Estabilidad, Falla y Falla Mayor y *Caving*, el cual se muestra en la Figura 2. 28. Los valores que definen los límites se muestran en la **Error! Reference source not found.**

Tabla 2. 3 Valores predictivos para límites entre zonas

Zona	Valor Predictivo
<i>Caving</i>	< 0,16
Falla Mayor	0,16 - 0,36
Falla	0,36 - 0,84
Estable	> 0,84

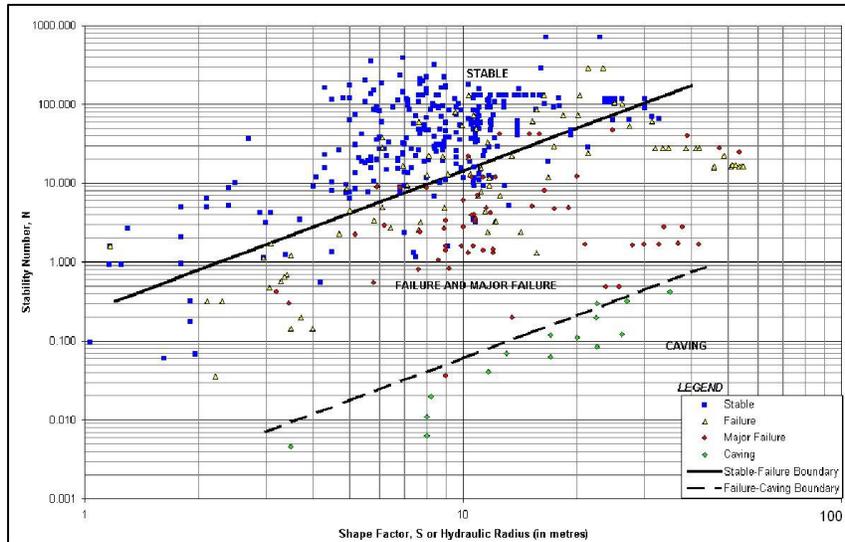


Figura 2. 28 Gráfico de estabilidad de Mathews para la regresión logística con zona de *caving* (Mawdesley, 2002)

2.6 Diseño Robusto

Genichi Taguchi (1950) propone que la calidad de un producto debe medirse a lo largo de toda su cadena de producción y hasta que cumple su vida útil. Sostiene que la clave para alcanzar una calidad competitiva, en términos económicos, es enfocarse en las etapas de diseño, tanto para los productos como para los procesos.

Según H. G. Pulido y R. de la Vara (2008) el diseño robusto permite generar productos y procesos insensibles ante la variabilidad de factores internos y/o externos (ruidos) no controlables y así, disminuir los costos de calidad asociados a la desviación de sus valores óptimos. En el caso de la minería subterránea, los caserones corresponden a envoltentes que definen cierto valor económico, calculado a partir de factores como precio y costos, y cuya estabilidad mecánica también es dependiente de parámetros que presentan incertidumbre que refleja variabilidad en los resultados del proceso de diseño de caserones.

Para aplicar el diseño robusto sobre un proceso, es necesario que exista como mínimo un factor de ruido, del cual se quiere controlar sus efectos en la variable resultado, para hacerla insensible. En ningún sentido se desea controlar la variable de ruido, lo que se busca es atenuar sus efectos en los resultados.

Para evaluar la robustez de un sistema, Taguchi propone el cociente señal/ruido. Este estadístico, basado en la media y desviación estándar de la distribución objetivo, mide la robustez de la respuesta de cada combinación de factores de control ante la variabilidad del factor de ruido. La intención es medir la variabilidad de los resultados y destacar aquel escenario que otorgue robustez al proceso de optimización de caserones.

Dado un tipo de característica de calidad, se define la razón señal/ruido de acuerdo con la imagen siguiente:

Tabla 2. 4 Señal ruido. Fuente: Diseño de Experimentos, 2013.

Tipo de Características	Razón Señal/Ruido
<i>Más pequeño es mejor</i>	$-10\log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i^2 \right]$
<i>Más grande es mejor</i>	$-10\log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_i^2} \right]$
<i>Valor nominal es mejor (tipo I)</i>	$10\log \left[\frac{\bar{Y}^2}{S^2} \right]$
<i>Valor nominal es mejor (tipo II)</i>	$-10\log[S^2]$

Donde Y_i corresponde a los valores de la variable de interés, n corresponde al número de observaciones de la variable, \bar{Y} es la media de la variable de interés y S es la desviación estándar de esta. Cabe destacar que el estadístico está construido de forma tal que siempre hay que maximizarlo.

Los problemas del tipo “más pequeño es mejor” consideran una característica de calidad continua y no negativa, donde el valor más deseado para el coeficiente es cero. Típicamente se emplea cuando se trabajan los costos de un proceso o producto. Problemas del tipo “lo más grande es mejor” también consideran una característica de calidad continua y no negativa, por lo que se desea maximizar su valor. Este último es útil cuando la característica de calidad se trata del valor alcanzable por un proyecto.

Con respecto a los estadísticos de tipo nominal, el de tipo I se emplea para respuestas no negativas que van de cero a infinito, con valor objetivo distinto de cero y con varianza cero cuando la respuesta también es cero. El de tipo II, es para respuestas que abarcan valores positivos y negativos, permitiendo que el valor nominal sea cero.

2.7 Softwares utilizados

En esta sección se presentarán los softwares principalmente utilizados en la construcción del modelo de simulación del diseño de caserones.

2.7.1 SIMULIA Isight

Isight corresponde a un programa que permite el encadenamiento y la automatización de distintas actividades. Para cumplir con lo anterior, Isight permite la integración con distintas aplicaciones o softwares, o componentes del flujo de trabajo, ya que las variables de salida de una componente pueden ser manejadas como las variables de entrada de la componente siguiente de manera rápida y segura debido a que se evitan la lentitud como posibles errores de carácter humano al manipular los parámetros y variables de manera manual.

La integración de aplicaciones y la habilidad de Isight de automatizar procesos acelera enormemente la evaluación de alternativas de diseño de un producto. Además, provee de herramientas que permiten una rápida evaluación de post procesamientos que permiten analizar distintos “trade-off” asociados al problema evaluado y relaciones entre parámetros y los resultados del proceso.

Dentro de las componentes relevantes disponibles en Isight encontramos el Simcode. Este corresponde a una componente que permite leer y modificar archivos de texto o comando y ejecutar aquellos archivos.

Como ya fue mencionado es a través de Isight que se generara un modelo de simulación de diseño de caserones por lo que a continuación se detallaran una serie de términos relevantes en la utilización de este software.

2.7.1.1 Diseño de experimento

Corresponde a un cambio en las condiciones de operación de un sistema o proceso, que se realizara con el objetivo de medir el efecto del cambio de una o varias propiedades del resultado del sistema. Además, permite aumentar el conocimiento acerca del sistema estudiado.

2.7.1.2 Factores de Estudio

Son las variables que se investigan en el experimento, particularmente se busca determinar cómo sus variaciones impactan en los resultados o variables de respuesta del proceso. Estos factores pueden ser controlables (también llamados variables de diseño) o no controlados.

2.7.1.3 Niveles y tratamientos

Los diferentes valores que se asignan a los distintos factores estudiados en un diseño experimental corresponden a los niveles. Cada uno de las diferentes combinaciones de los distintos niveles de los factores recibe el nombre de tratamiento.

2.7.1.4 Diseño Factorial

El objetivo del diseño factorial es estudiar el efecto de varios factores sobre una o varias respuestas. Para estudiar la manera en la que cada factor influye sobre la variable de respuesta, es necesario elegir al menos dos niveles de prueba para cada uno de ellos. Con el diseño factorial completo se ejecutan aleatoriamente todas las posibles combinaciones que pueden formarse con los niveles de los factores a investigar.

2.7.1.5 Matriz de diseño

La matriz de diseño corresponde al conjunto de puntos experimentales o tratamientos que pueden formarse considerando todas las posibles combinaciones de los distintos valores de los factores.

2.7.2 Python

Python es un lenguaje de programación de código abierto el cual permite realizar distintas actividades dentro de un archivo de comando. Está orientado a objetos y es considerado un lenguaje de rápido aprendizaje ya que posee una sintaxis fácil de leer.

Es importante destacar una serie de características de este programa:

- Posee una gran librería de funciones que permiten facilitar la programación a través de funciones predefinidas.
- El módulo interactivo permite rápidamente probar fragmentos de código del archivo de ordenes
- Es posible ejecutarlo en distintos sistemas operativos

2.7.3 GEOVIA Surpac

Surpac corresponde a un software de geología, planificación y diseño minero más utilizado en la industria, tienen aplicaciones tanto en operaciones mineras a rajo abierto como en proyectos de carácter subterráneos. El software es de fácil aprendizaje, capaz de manejar graficas en tres dimensiones y la posibilidad de incorporar flujos de trabajo automatizados utilizando códigos escritos en TCL (Tool Command Language).

Además la versión 2019 de este software incorpora dentro de su set de herramientas de diseño el *Stope Shape Optimaizer (SSO)* el cual fue descrito en el capítulo 2.2.1 *Stope Shape Optimizer (Slice Method)*.

Capítulo 3: Metodología

Para cumplir con el objetivo general del proyecto, el cual es generar una metodología que permita definir un diseño óptimo de caserones de carácter robusto frente a la incertidumbre de las variables no controladas, se realizará la siguiente guía metodológica la cual considera la creación de un modelo de simulación en Isight.

Para el desarrollo de este modelo la guía metodológica contempla los siguientes pasos:

a) Realización del procedimiento de diseños de caserones de forma manual, el cual debe mostrar la potencialidad de ser automatizado, considerando limitaciones de tiempo y costo computacional.

- Identificar las distintas variables involucradas en el proceso de diseño de caserones, ya sean no controladas; donde se le asigne una distribución de probabilidad a fin de incorporar la incertidumbre dentro del análisis; o bien variables de diseño; además de definir los outputs propios del flujo de trabajo.
-
- Construcción de los escenarios de diseño, definir los distintos niveles de estudios para las variables de diseño, a partir del cual se construirá la matriz de experimentos y se analizarán los distintos posibles escenarios para definir el escenario robusto.

Se debe determinar las dimensiones del caserón, las dimensiones de los distintos pilares (sill, rib y crown) y los valores de ley de corte utilizados para definir las envolventes económicas.

Además, se debe mencionar las distribuciones de los parámetros económicos, precio y costos, también de los parámetros referentes a la calidad del macizo rocoso.

- Finalmente se debe generar distintos indicadores que permitan evaluar y comparar los distintos sets de caserones resultantes de la optimización de caserones, además estos indicadores deben considerar los parámetros económicos y geomecánicos.

Es posible asignar diferentes prioridades al cumplimiento de los indicadores de acuerdo a los objetivos estratégicos definidos por las mineras. Por lo tanto, se tiene una solución flexible que se ajusta a los requerimientos de los clientes

b) Integración de los distintos procesos manuales, entradas y salidas de las distintas componentes, en un flujo de trabajo de Isight el cual contemple todas las variables del proceso y permita ingresar la variabilidad de aquellas que son fuente de incertidumbre.

En la siguiente figura se muestra un resumen esquemático del flujo de trabajo considerado para el procedimiento manual y el cual posteriormente debe ser automatizado. En los siguientes capítulos se describen tanto el escenario base como los valores de los distintos parámetros evaluados en este estudio junto al detalle de las salidas, los cuales sirven de KPI del proceso y servirán para identificar los mejores escenarios o escenarios robustos.

Además, se describe la metodología en detalle considerando la guía mencionada anteriormente.

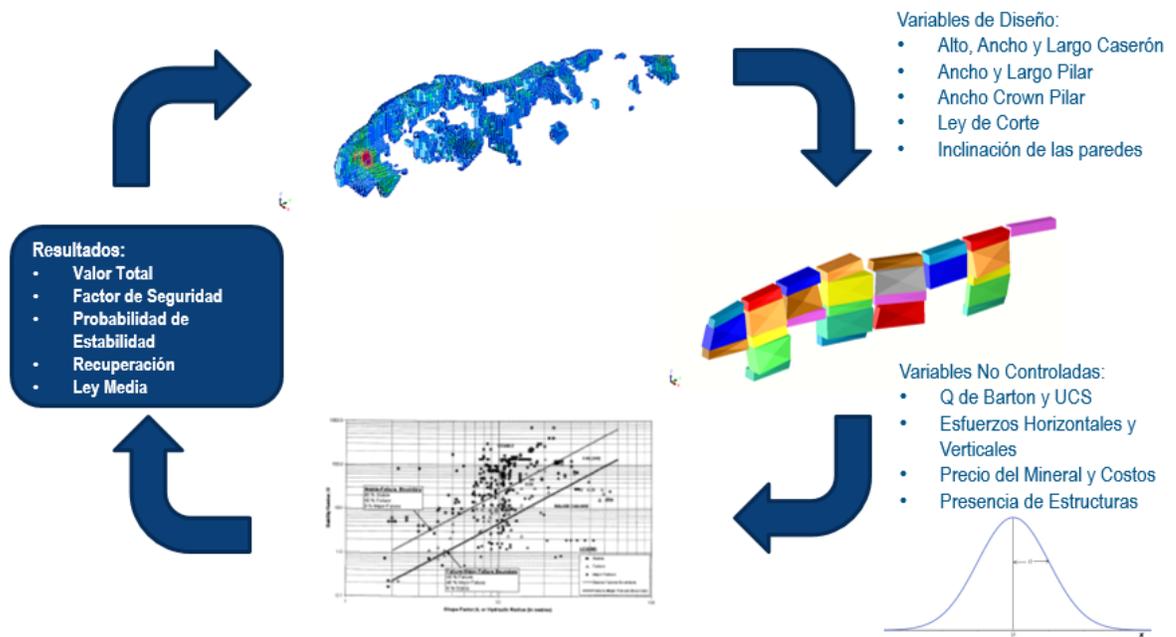


Figura 3. 1 Flujo de trabajo Diseño Robusto de Caserones, Elaboración propia

3.1 Identificación de componentes y variables del proceso

El primer paso para definir el modelo de simulación es la realización del flujo de manera manual, gracias a esto es posible identificar las distintas componentes y variables necesarias para definir el flujo de trabajo y generar los archivos de entrada y salida que participarán en el flujo de trabajo y serán utilizados en el modelo de simulación en SIMULIA Isight.

El primer paso corresponde al diseño de caserones, la cual se realiza con la herramienta *Stope Shape Optimizer (SSO)*. Los parámetros involucrados en esta componente corresponden a las variables de diseño, como ancho, alto y largo de caserón, ángulo *dip* o buzamiento de las paredes y ley de corte.

Los resultados de esta etapa consisten en 2 archivos (cuyas extensiones son dtm y str) los cuales corresponden a archivos de texto, estructurados mediante triángulos y los vértices que componen estos. Con los archivos mencionados, es posible conocer el perímetro y área de las distintas paredes que componen cada uno de los caserones en una configuración.

Conocida la geometría de los caserones es posible determinar, mediante la aplicación de un código computacional en Python, el radio hidráulico y el número de estabilidad de Mathews en función de variables no controladas como características de la roca, estado tensional y parámetros económicos. Con lo anterior es posible utilizar los métodos gráficos, en particular la metodología definida por Mawdesley (2001/02), para determinar la estabilidad de las distintas paredes de los caserones.

Finalmente cabe resaltar que la ejecución manual corresponde a un ejercicio de carácter determinista, donde se realiza una evaluación de un único diseño sometido a unas únicas condiciones geomecánicas y económicas.

Un resumen de las actividades antes mencionadas se observa en el siguiente esquema:

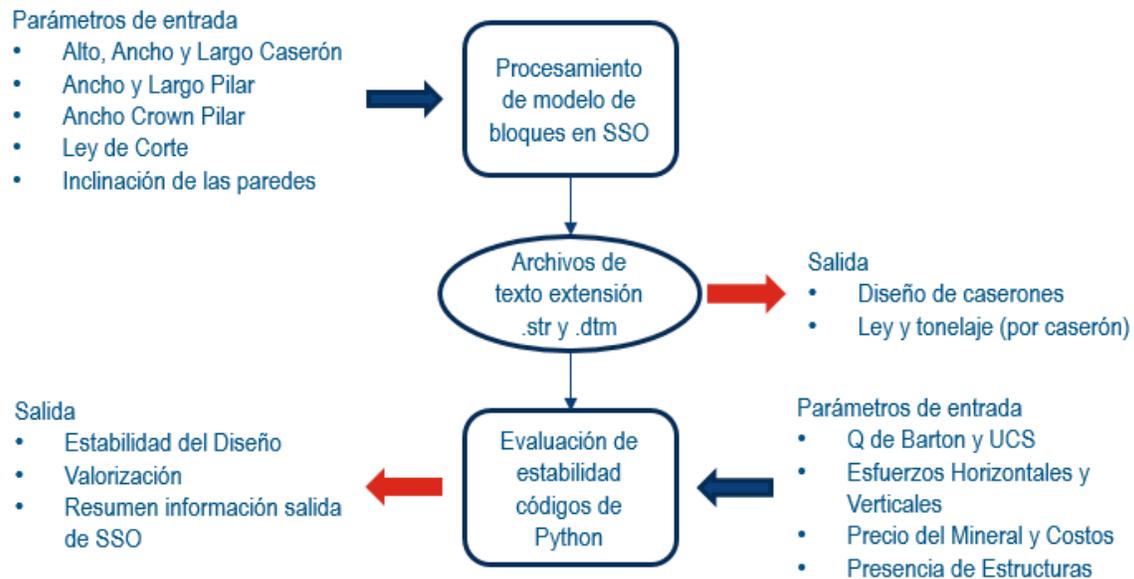


Figura 3. 2 Resumen actividades, entradas y salidas, Elaboración propia

3.2 Variables Involucradas

Es necesario identificar las distintas variables que participan dentro del proceso de diseño de caserones y que deben ser incorporadas en el modelo de simulación. A continuación, destacaremos las distintas variables asociadas al proceso de diseño de caserones. Estas variables se pueden clasificar en distintos grupos dada su naturaleza.

3.2.1 Variables de Diseño

Se definen como variables de diseño a toda variable perteneciente a un proceso sobre el usuario puede ejercer algún tipo de control o bien definir y fijar en un valor dado en el diseño experimental. Estos distintos niveles de las distintas variables de diseño definen un punto de diseño.

A modo de resumen, las variables de diseño asociadas al problema del diseño de caserones, abordado en este trabajo, son las siguiente:

- Ancho, alto y largo del caserón
- Ancho y largo del sill/rib pilar
- Ancho del crown pilar
- Angulo de inclinación de las paredes.
- Ley de corte
- Punto de origen de la grilla
- *Dip* de cortes

En las siguientes tablas se identifican las variables antes mencionadas, junto a rangos o valores determinados a partir de *benchmarking* de dos minas ubicadas en la tercera región de Chile las cuales emplean el Sublevel Stopping como método de explotación.

Tabla 3. 1 *Benchmarking* dimensiones caserón

Parámetros Caserón	mínimo	máximo
Ancho Caserón [m]	30	70
Alto Caserón [m]	20	40
Largo Caserón [m]	15	70
Inclinación paredes [°]	45	90

Tabla 3. 2 *Benchmarking* dimensiones pilar

Parámetros Pilar	mínimo	máximo
Ancho Pilar [m]	15	30
Largo Pilar [m]	15	30
Ancho Crown Pilar [m]	0	15

Respecto a las últimas dos variables, Punto de origen de la grilla y *Dip* de cortes, estas serán tratadas como un ejercicio posterior de sensibilidad de los datos

3.2.2 Variables No Controladas

Son aquellas variables o características del proceso que no se pueden controlar durante la operación normal del proceso corresponden además a la fuente de incertidumbre y ruido en las respuestas del flujo de trabajo.

Dentro de las variables de diseño asociadas al problema que aborda este trabajo encontramos las siguiente:

- Condición de esfuerzos, vertical y horizontal (σ_v y σ_h , respectivamente)
- Calidad del macizo rocoso, UCS y Q'
- Orientación de estructuras.
- Precio del mineral explotado y Costos asociados a la explotación.

Como parte del objetivo de este trabajo es generar una configuración de caserones que presente robustez de cara a la incertidumbre de estas variables.

Cabe destacar que las variables geotécnicas, para efectos prácticos de este trabajo, están simuladas mediante una distribución de probabilidad normal, lo cual es correcto siempre y cuando no exista más información para generar una nueva distribución de acuerdo con los estudios de McKinnon 2002 y Cai 2011. En tanto los parametros economicos estan simulados mediante una distribucion uniforme.

Los valores considerados para estas variables están expresadas en el siguiente capítulo.

3.3 Resultados de la metodología

Las distintas configuraciones de caserones resultantes de la metodología de este trabajo son evaluables en función de los siguientes resultados, los cuales funcionan como indicadores claves (KPI) de cada configuración:

- Valor total

Este indicador corresponde al flujo de caja proveniente de la explotación de los distintos caserones, se determina a partir del precio del metal evaluado y los costos tanto mina como planta. No considera el tiempo dentro del cálculo por lo tanto corresponde a un valor no descontado.

- Factor de seguridad

El factor de seguridad corresponde a los factores de seguridad tanto de los sill/rib pillars como de los crown pillars, cabe destacar que estos se determinan a partir de la metodología de Lunder & Pakalnis y de Tavakoli respectivamente. Cabe destacar que estas metodologías son consistentes cuando se tienen un dominio de los esfuerzos en la estabilidad distinto al caso de dominio estructural.

- Probabilidad de estabilidad

Esta respuesta corresponde a un promedio de los valores predictivos de las distintas paredes que reflejan la condición de estabilidad según la metodología de Mawdesley.

- Tonelaje y Ley Media

Es posible determinar tanto el tonelaje como la ley media asociada a cada una de las distintas configuraciones.

Para cada una de las distintas respuestas la metodología es capaz de determinar tanto la media como la desviación estándar. Y a partir de estos, calcular un coeficiente de variabilidad definido como el cociente de estos dos parámetros.

En función de lo anterior el usuario es capaz de definir prioridades en cuanto al cumplimiento de cada una de las respuestas antes mencionadas respecto a los valores objetivos y restricciones asociadas al proceso de diseño y establecer el escenario robusto (de acuerdo a lo establecido en el trabajo de Taguchi) como aquel que además de cumplir con los valores objetivos minimiza el ruido fruto de la incertidumbre de los parámetros no controlados, reflejado como el coeficiente de variabilidad.

3.4 Descripción del Caso de estudio

3.4.1 Mina 1

Para la realización de este trabajo se utilizó un sector de un modelo de bloques provisto por parte de una minera ubicada en Tierra Amarilla. La decisión de selección de aquel sector fue la presencia de altas leyes y la existencia de un conjunto de caserones con los cuales los resultados de la metodología propuesta en este trabajo pueden ser contrastados.

El yacimiento corresponde a un depósito de cobre en forma de vetas y vetillas con rangos de potencias e inclinación variada. Junto al modelo de bloques se obtuvo el diseño de caserones definidos mediante la metodología tradicional (construcción mediante perfiles).

Tabla 3. 3 Dimensiones modelo de bloque Mina 1

	X	Y	Z
Mínimo [m]	373.660	6.959.870	-200
Máximo [m]	374.100	6.960.290	450
Extensión [m]	440	420	650
Tamaño bloque [m]	5	5	2,5
Numero de bloques	1.921.920		

Mina 1 establece una ley media de 0,55% para definir el mineral, de esta manera el modelo de bloques tiene las siguientes características:

Tabla 3. 4 Cubicación Mina 1

	Tonelaje (Mt)	Ley Media (%)	Fino (t)
Total (CuT > 0)	89,858	0.216	193.823
Bloques CuT>0.55	8,984	1,004	90.168
Contenido en Caserones cliente	4,354	0,991	43.142

A continuación, se pueden observar las imágenes que detallan tanto el modelo de bloques filtrado según la ley de corte 0,55% como los caserones definidos por Mina 1.

Finalmente, cabe destacar que la información real y los parámetros estratégicos entregados por el dueño del proyecto son de carácter confidenciales, sin perjuicio de lo anterior, para la realización del presente estudio se aplicaron valores para los parámetros técnico-económicos dentro de los rangos aceptables.

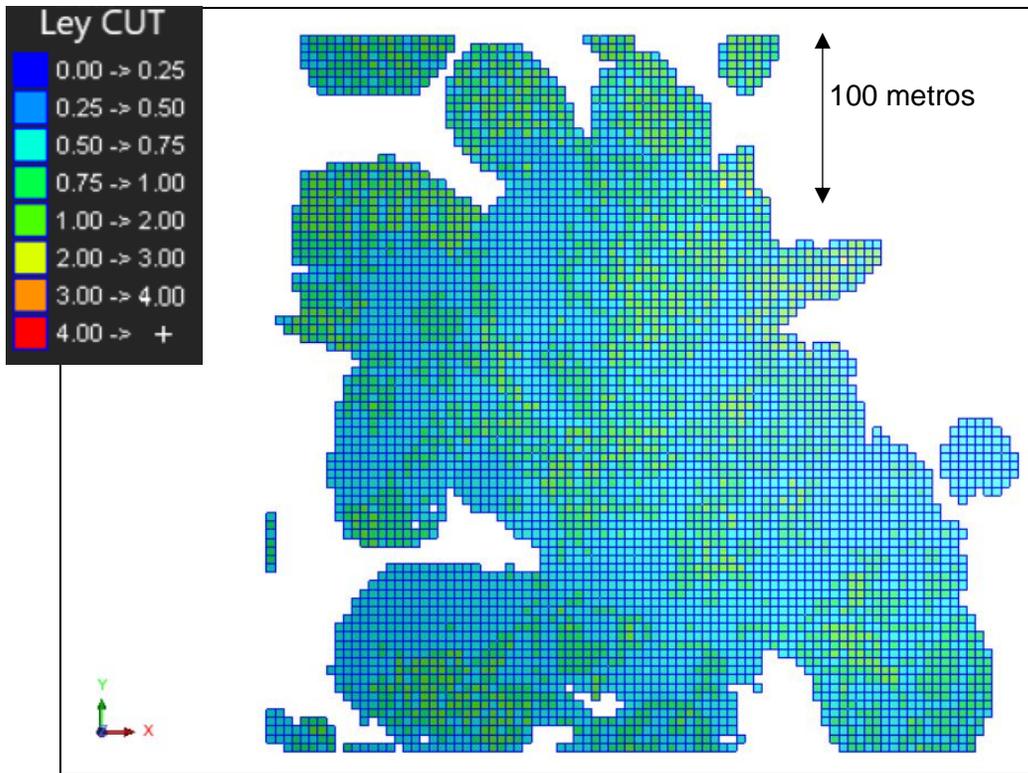


Figura 3. 3 Modelo de bloques, vista planta

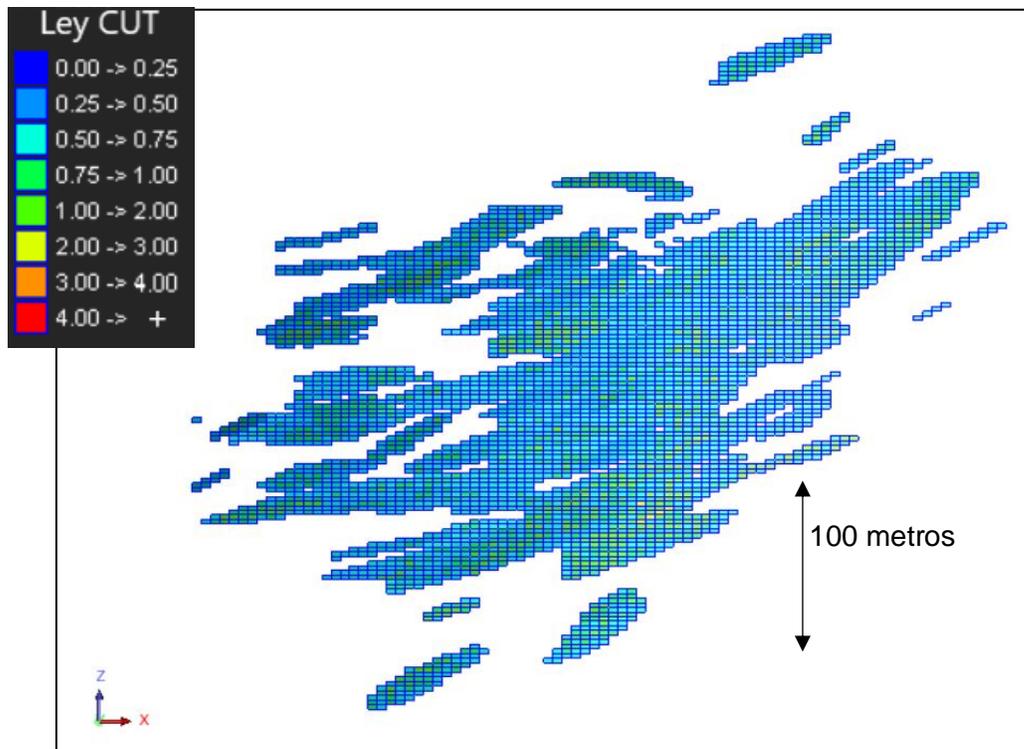


Figura 3. 4 Modelo de bloques, vista XZ

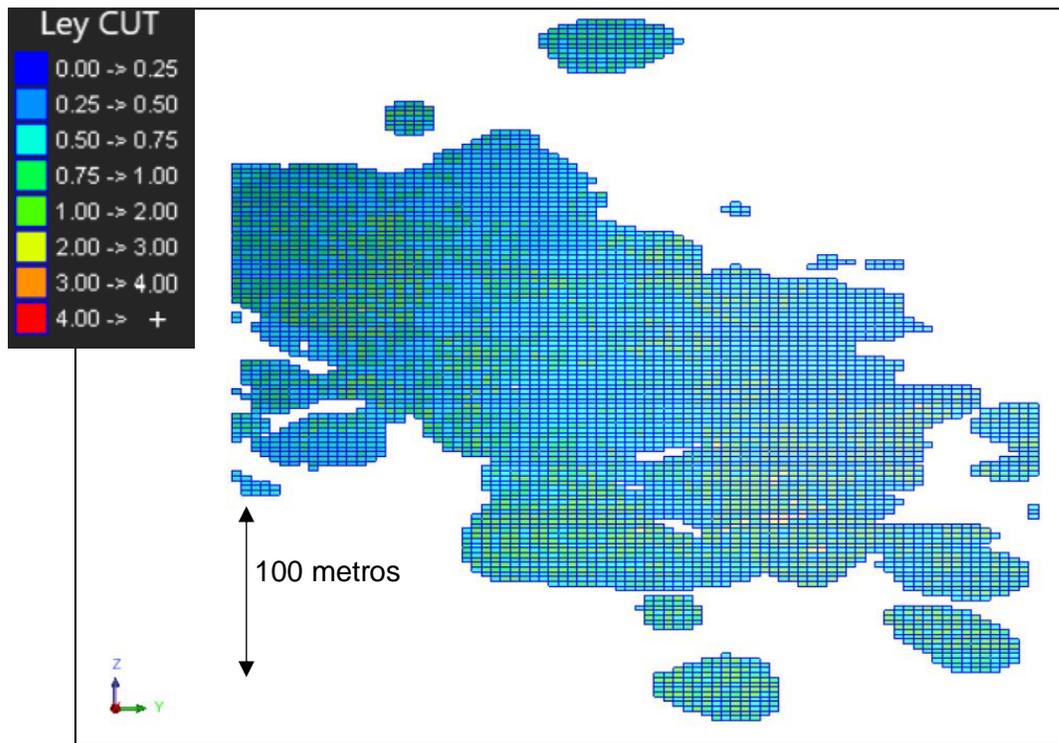


Figura 3. 5 Modelo de bloques, vista YZ

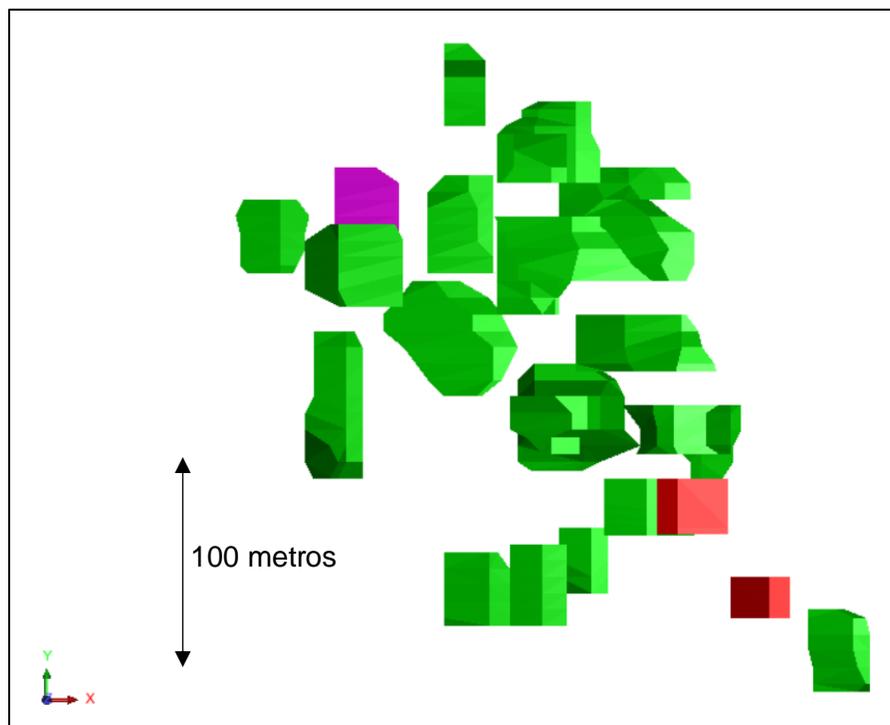


Figura 3. 6 Caserones obtenidos mediante metodología tradicional, vista en planta

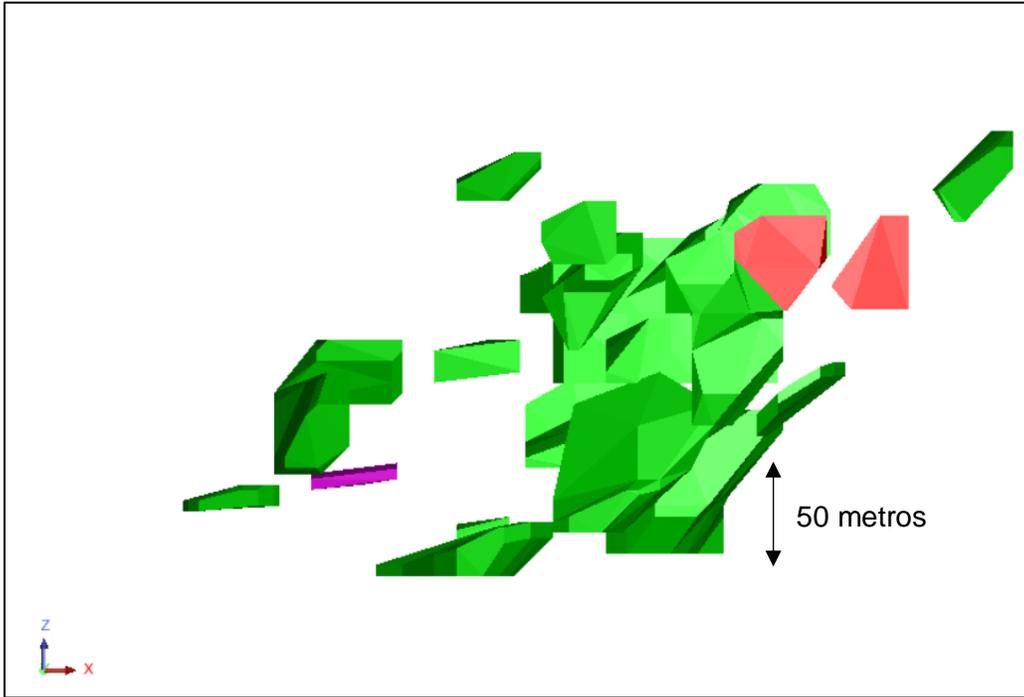


Figura 3. 7 Caserones obtenidos mediante metodología tradicional, vista XZ

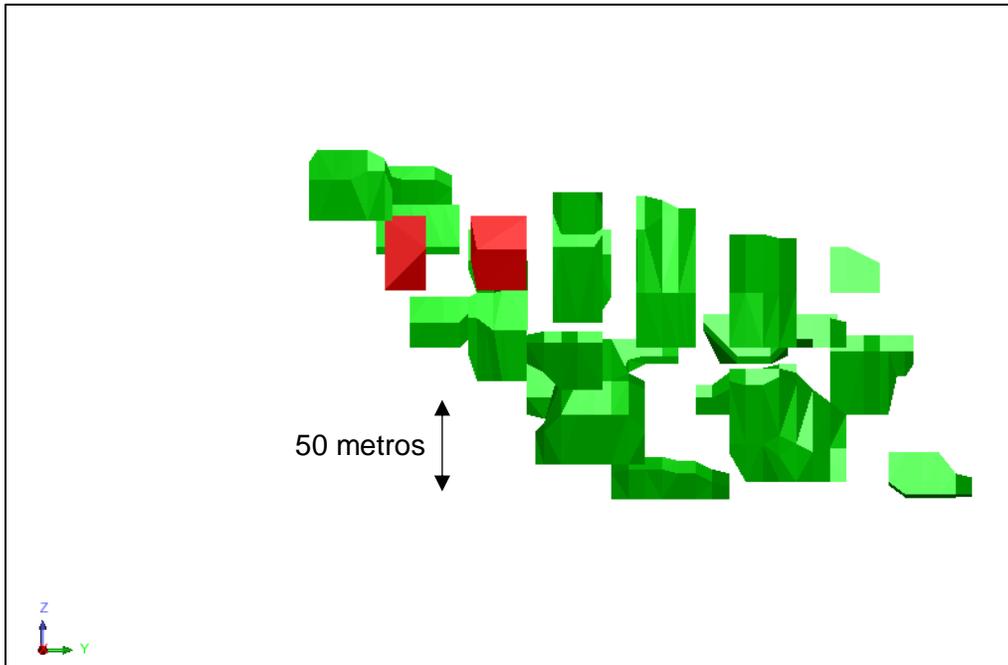


Figura 3. 8 Caserones obtenidos mediante metodología tradicional, vista YZ

3.4.2 Mina 2

Un segundo caso de estudio fue utilizado para el desarrollo de esta solución, se trata de un sector de una mina ubicada en Copiapó. En este caso la selección del sector se debió a que correspondía a una zona donde la minera había definido envolventes en aquel sector y ella misma ejecutaría una validación cruzada en términos de tonelaje.

El yacimiento, corresponden a un depósito de cobre en forma de vetas y vetillas. Lo anterior es concordante con la información recibida de Mina 1 ya que ambos depósitos están ubicados cercanos entre sí en la localidad de Tierra Amarilla.

Tabla 3. 5 Dimensiones modelo de bloque Mina 2

	X	Y	Z
Mínimo [m]	377.324	6.956.712	-126
Máximo [m]	378.185	6.957.900	411
Extensión [m]	861	1.188	537
Tamaño bloque [m]	3	3	3
Numero de bloques	1.053.451		

Mina 2 establece una ley media de 0,5% para definir el mineral, de esta manera el modelo de bloques tiene las siguientes características:

Tabla 3. 6 Cubicación Mina 2

	Tonelaje (Mt)	Ley Media (%)	Fino (t)
Total (CuT > 0)	27.541	0.64	176.265
Bloques CuT>0.55	14.012	0.93	130.311

Además del modelo de bloques Mina 2 define una serie de desarrollos que están asociado a los caserones presentes, esta infraestructura sirvió para definir la rotación de la malla de optimización para generar caserones que fueran consecuentes con los diseños establecidos.

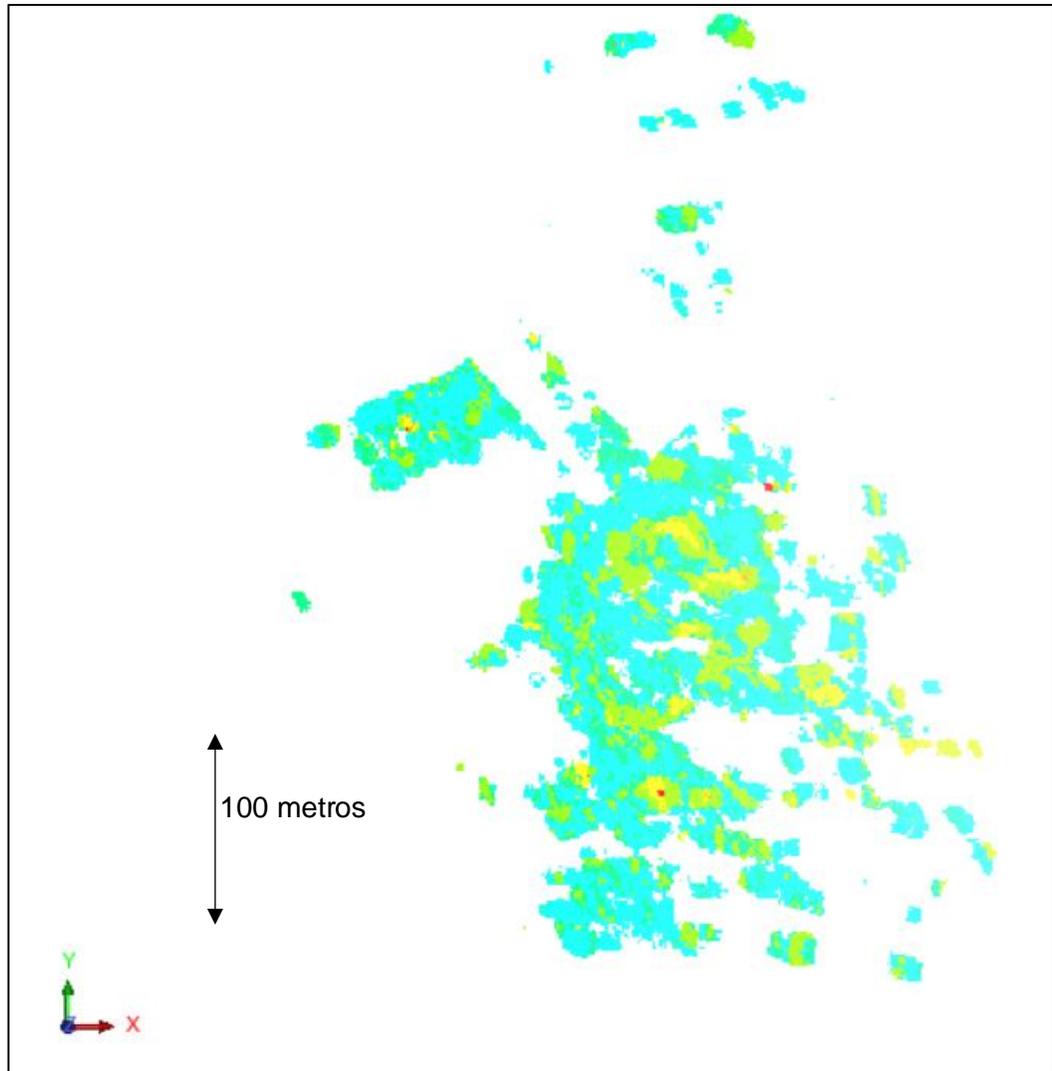


Figura 3. 9 Modelo de bloques, vista planta

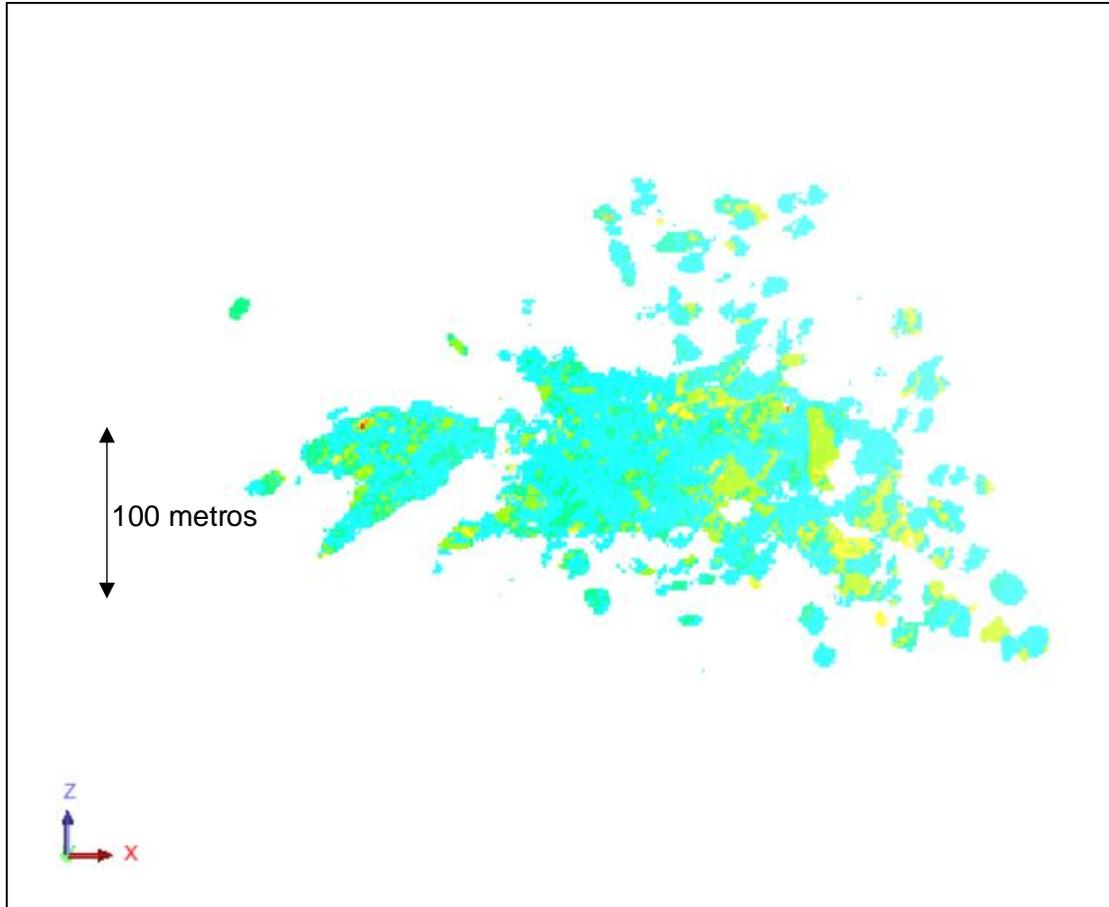


Figura 3. 10 Modelo de bloques Mina 2, vista XZ

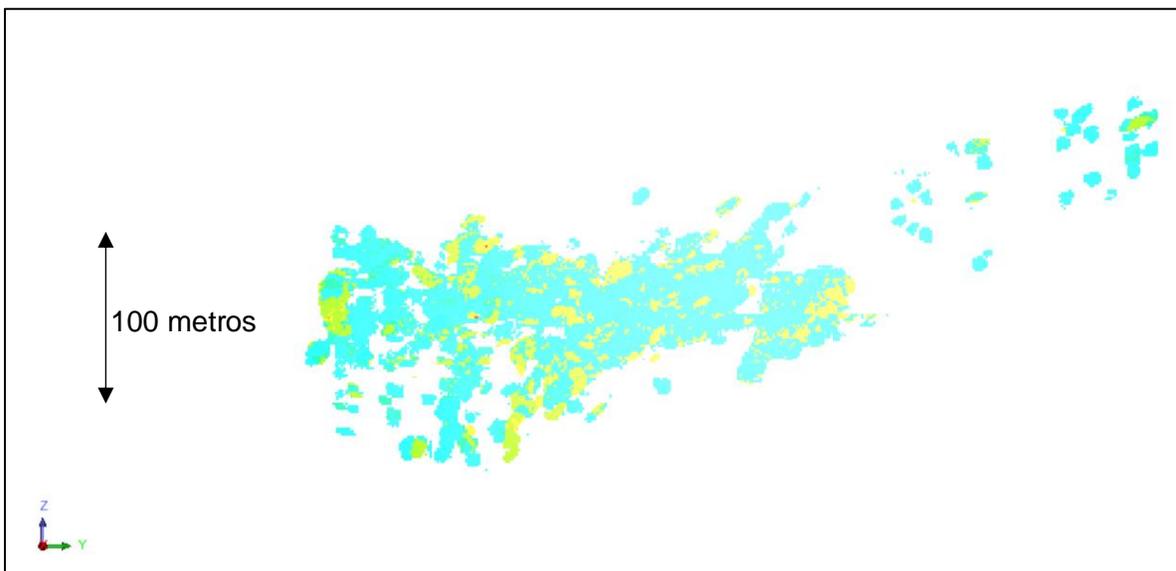


Figura 3. 11 Modelo de bloques Mina 2, vista YZ

Los sólidos antes mencionados, caserones y desarrollos se muestran en las siguientes imágenes:

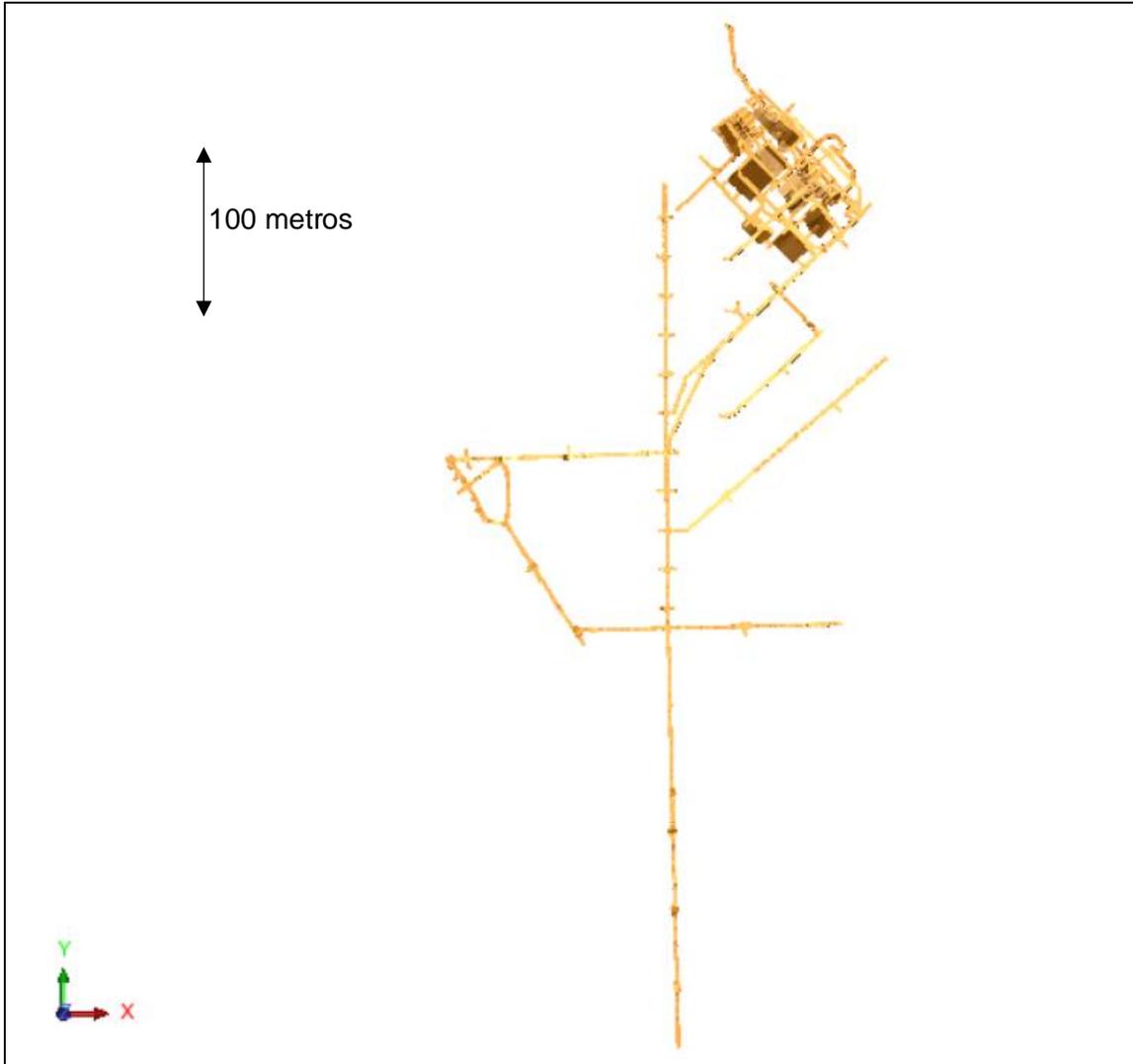


Figura 3. 12 Desarrollos y caserones, vista planta

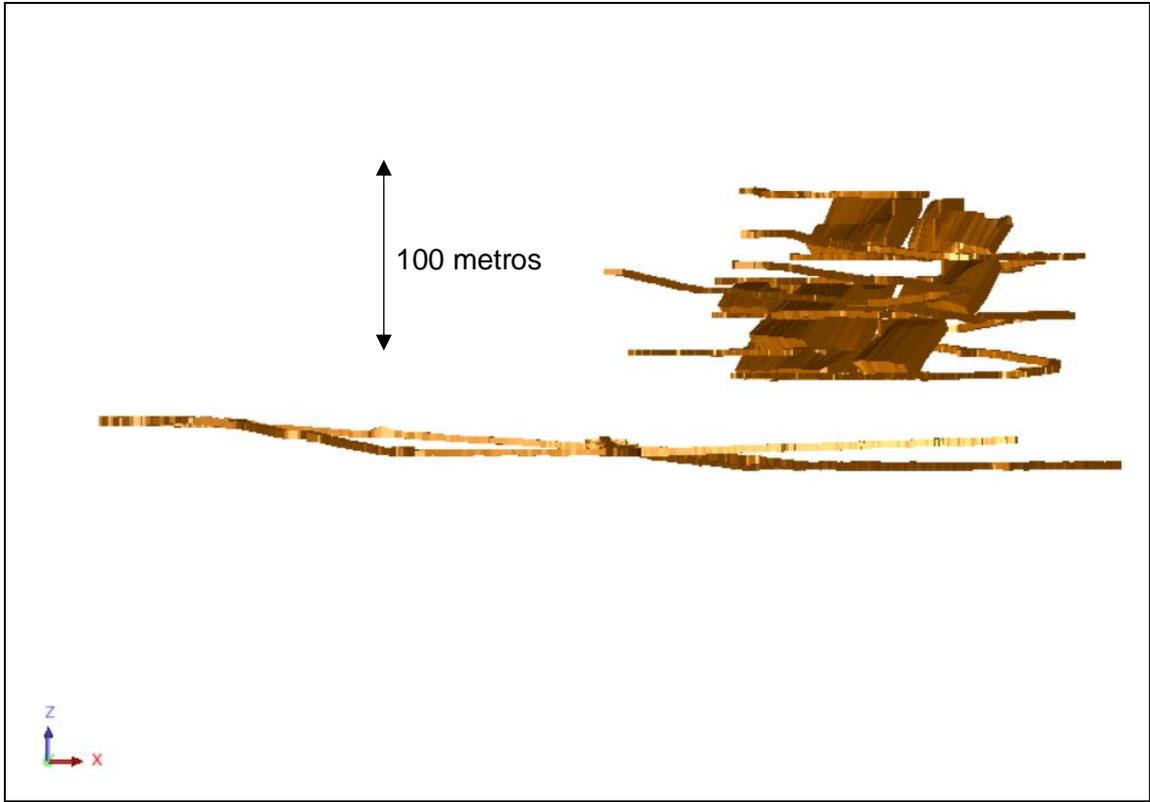


Figura 3. 13 Desarrollos y caserones, vista XZ

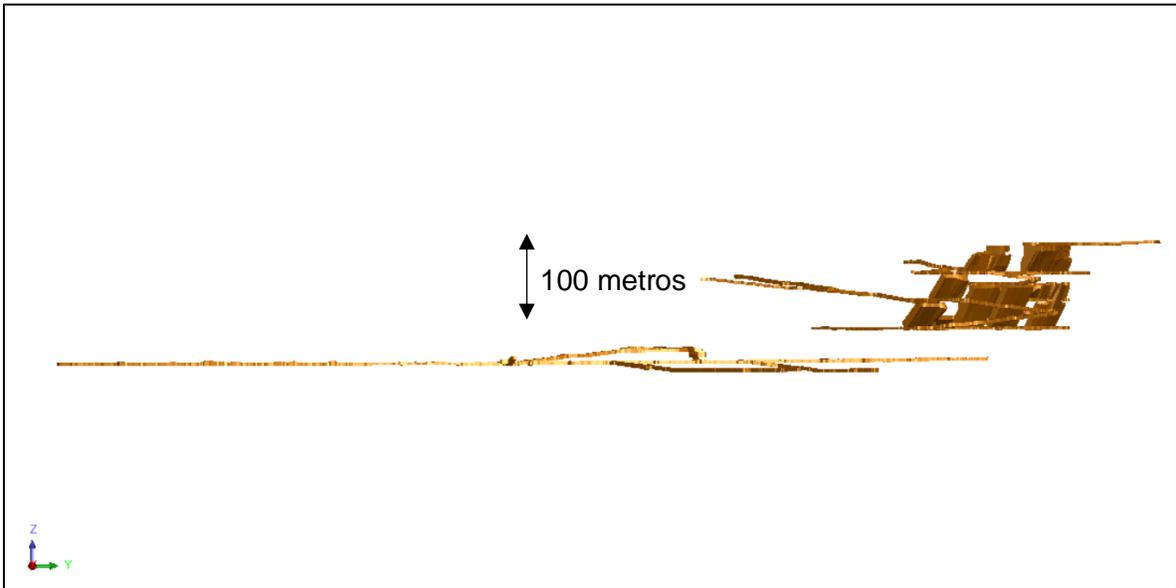


Figura 3. 14 Desarrollos y caserones, vista YZ

3.5 Automatización del proceso y selección escenario robusto

La automatización del flujo de trabajo consiste en la integración de todas las componentes detectadas en el capítulo 3.1 dentro de un flujo de trabajo de SIMULIA Isight. Los diseños evaluados serán el resultado de la combinación de las distintas dimensiones especificadas en el *benchmarking* realizado tanto en la Mina 1 como Mina 2. Esta combinación de variables de diseño definirá la matriz de diseño de los experimentos realizados.

En particular, el experimento del presente trabajo estará centrado en entregar robustez al proceso de diseño de caserones. Cada una de las configuraciones de caserones son evaluados con las variables no controladas según una distribución de probabilidad que representa la incertidumbre propia de estas variables. Se establecerán por experimento 2 resultados, escenario óptimo, el cual no considera la variabilidad y escenario robusto el cual considera la incertidumbre de las variables no controladas.

Las selecciones de los escenarios óptimos estarán definidas por optimizar el objetivo estratégico; los cuales pueden ser valor económico, ley media, tonelaje de reservas; con la condición de representatividad dentro del conjunto de resultados de aquella variable.

En tanto el escenario robusto será aquel cuyos resultados respecto al objetivo estratégico viven en una vecindad cercana al escenario óptimo, pero cuya dispersión sea menor, es decir, frente a la variabilidad e incertidumbre el efecto las respuestas es menor que el escenario óptimo.

Para medir la robustez de un escenario se reportan tanto la media como la desviación estándar y se utiliza el criterio de Taguchi, valor nominal tipo I, para la selección.

En la figura 3.16 se observa el modelo propuesto como un flujo de trabajo de Isight. A continuación, se realizará una breve descripción de cada nodo de aquella ilustración.

1. Variables de Diseño: En esta componente se explicita la matriz experimental que define las distintas posibilidades de diseño, están consideradas todas aquellas variables descritas en la sección 3.2.1.
2. Reescritura archivo xml: La función de esta componente es modificar el archivo de parámetros relacionado con la matriz de diseño y que se ejecutará en la componente posterior.
3. Ejecutar SSO: En este paso del flujo de trabajo se ejecuta el optimizador de caserones de acuerdo a los parámetros determinados en el proceso anterior, las salidas de esta componente corresponden a un reporte detallado de cada

caserón presente en aquella configuración de caserones y archivos de los sólidos generados (string y dtm).

4. Captura de Datos: Tal como su nombre lo indica en esta componente es posible obtener la información contenida en los archivos dtm y string para poder definir áreas, perímetros y radio hidráulicos de las distintas paredes de los distintos caserones de la configuración.

5. Variables no Controladas: Finalmente se debe analizar la respuesta de la estabilidad mecánica, así como también la variabilidad en el valor del proyecto producto de la incertidumbre proveniente de las variables detalladas en la sección 3.1.1.2. Es en esta componente donde se asigna una distribución a estas distintas variables.
 - a. Estabilidad y Valorización: Se contrastan los resultados de la ejecución del SSO con una serie de escenarios que simulan la incertidumbre de los parámetros geomecánicos y económicos, es en esta etapa donde se determinan los factores A, B y C, los números de estabilidad y los valores predictivos de acuerdo a la metodología de Mathews junto a una valorización del caserón.

 - b. Cálculos auxiliares: Se utiliza esta componente para definir estadísticos que permitan posteriormente compara las distintas configuraciones de caserones a fin de determinar el escenario robusto.

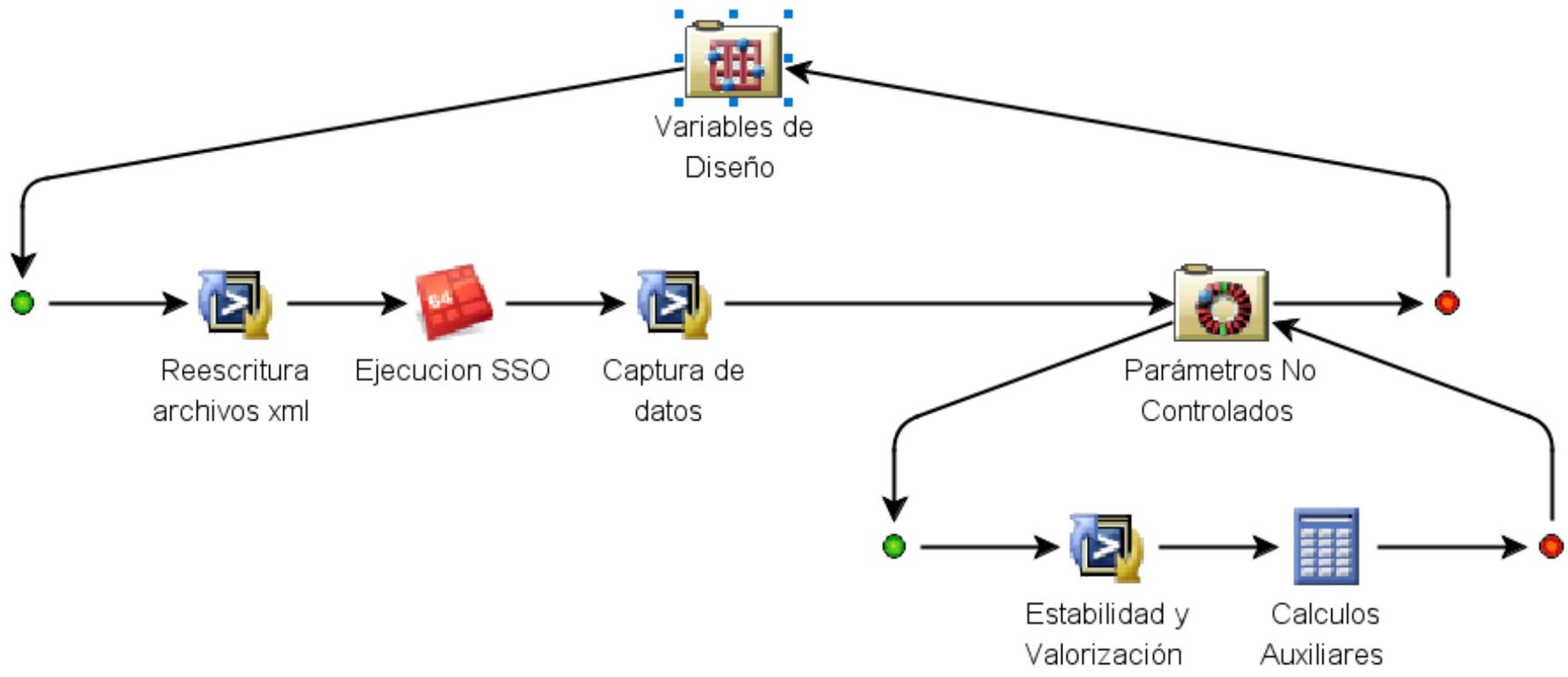


Figura 3. 15 Flujo de trabajo Isight

3.6 Validación de la metodología

3.6.1 Validación de resultados

Como primer ejercicio se buscará respetar los criterios de aceptabilidad del diseño de caserones definidos tanto por la Mina 1 como Mina 2. Las mineras establecen como mineral aquellos elementos cuya ley de cobre sea mayor a 0,55% y 0,5%, respectivamente, la configuración de caserones debe cumplir con una ley media de 0.85% y tanto el tonelaje total como el fino total deben ser maximizados.

- 1) El primer escenario por evaluar contempla una serie de simulaciones para lograr replicar o mejorar los resultados obtenidos por la metodología actual. Para lograr con lo anterior se utilizarán los rangos de valores para los parámetros de diseño definidos por el cliente. El criterio de decisión estará asociado a los objetivos de maximizar el fino total, el tonelaje total, y la ley media, en ese orden de relevancia.
- 2) A fin de determinar el escenario robusto, el resultado óptimo del punto anterior será comparado y evaluado respecto a los objetivos de maximizar la media del valor de la configuración (flujo de caja no descontado) y minimizar la desviación estándar de esta misma variable, es decir maximizar el cociente de estos dos parámetros que sirven de medida de robustez según Taguchi.

Respecto a esta última actividad cabe destacar que para comparar los distintos escenarios respecto a la estabilidad mecánica de sus paredes se determinó un estadístico que resumiera la información de un escenario.

A continuación, se describe un ejemplo:

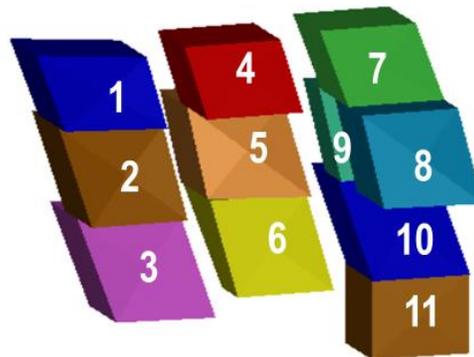


Figura 3. 16 Ejemplo calculo estadístico de estabilidad, Elaboración propia

Dado un conjunto de caserones, en la imagen hay 11 unidades de explotación, se determina el valor predictivo de las distintas caras de acuerdo a la metodología de Mawdesley.

Si se analiza el *Hanging Wall* por ejemplo el estadístico que resume ese escenario corresponde a la media de los distintos valores predictivos de cada *Hanging Wall* de los caserones presentes en la configuración.

Esto se resume en la siguiente expresión:

Ecuación 16 Estadístico probabilidad de estabilidad

$$\text{Probabilidad pared } i_{\text{configuración } j} = \frac{\sum p_j}{\text{numero caserones}_j}$$

3.6.2 Análisis de sensibilidad de los datos

Finalmente, dentro de los parámetros existen 2 que generan variaciones en los resultados, para determinar y cuantificar los efectos de estas se realizará una serie de ejecuciones que consideren distintos valores para las siguientes variables:

- a) Punto de origen de la grilla
- b) *Dip* de cortes

Se analizarán los cambios en las respuestas a través de un gráfico de Pareto y de significancia, de esta manera se podrá cuantificar cual es el efecto de esta variable respecto a los resultados obtenidos.

Capítulo 4: Aplicación y Resultados

Respecto a la metodología actual, el cual consiste en un ejercicio repetitivo donde se evalúan distintas opciones de forma manual a fin de determinar un óptimo, la realización de este trabajo representa un avance significativo ya que la automatización significa una reducción en los tiempos de ejecución y en los tiempos de análisis posteriores.

A continuación, se observan los principales resultados obtenidos de la aplicación de la metodología mencionada en el capítulo anterior.

4.1 Definición de Objetivos estratégicos

Para efectos del estudio realizado se debe entregar prioridades en los indicadores de desempeño utilizados al comparar los distintos escenarios evaluados. De esta manera se logra entregar un alineamiento entre los indicadores que son más afines con ciertos objetivos estratégicos.

Si el interés está asociado a la captura de valor como objetivo estratégico el principal indicador de selección debiera ser el flujo de caja no descontado, o valor total, dada la configuración de caserones.

Por otra parte, si se quiere asegurar la continuidad operacional en el largo plazo se recomienda priorizar el maximizar el fino contenido y el tonelaje que representan las distintas configuraciones.

Además, pueden seleccionarse otros indicadores de carácter más técnico los cuales son la ley media o la probabilidad de que cada una de las paredes de los distintos caserones de la configuración cumplan con el mínimo valor predictivo de estabilidad de acuerdo con la metodología de Mawdesley.

Finalmente cabe destacar que la selección de una configuración de caserones puede verse complementada con determinar los escenarios que generan una menor variación en las respuestas producto de la variabilidad de las fuentes de incertidumbre. De esta manera la prioridad estará enfocada ya no solo en cumplir con cierto *target* o maximizar valor de las respuestas antes mencionada, sino que además estará asociada a la disminución de la desviación estándar de aquellos indicadores dada la incertidumbre tanto de los parámetros económicos como geomecánicos.

4.2 Validación de la metodología

4.2.1 Mina 1

Para validar la metodología propuesta en este trabajo se realizó una serie de pruebas con el objetivo de replicar los resultados obtenidos mediante la metodología tradicional, caserones definidos por Mina 1 a través de la metodología tradicional, en términos cualitativos, se definen distintos niveles (valores) para los siguientes parámetros.

- Alto del caserón
- Largo del caserón
- Delta Y

En la siguiente tabla se puede ver en detalle la matriz de diseño de este ejercicio, donde se puede observar el número de niveles definidos para las distintas variables y los valores de aquellos niveles:

Tabla 4. 1 Matriz de diseño Minera Mina 1

Parámetro	Número de niveles	Valores
Alto del caserón	3	20 30 40
Largo del caserón	5	30 40 50 60 70
Delta y	3	0 10 20

Las combinaciones de los distintos niveles antes mencionados definen las distintas configuraciones de caserones que serán evaluados. En particular se trata de 75 distintos escenarios los cuales se ejecutarán dentro del flujo de trabajo de Isight.

Cabe recordar que los objetivos de este ejercicio son en una primera instancia igualar o mejorar la recuperación a través del tonelaje total como el fino contenido en los distintos caserones a fin de validar los caserones resultantes de la metodología.

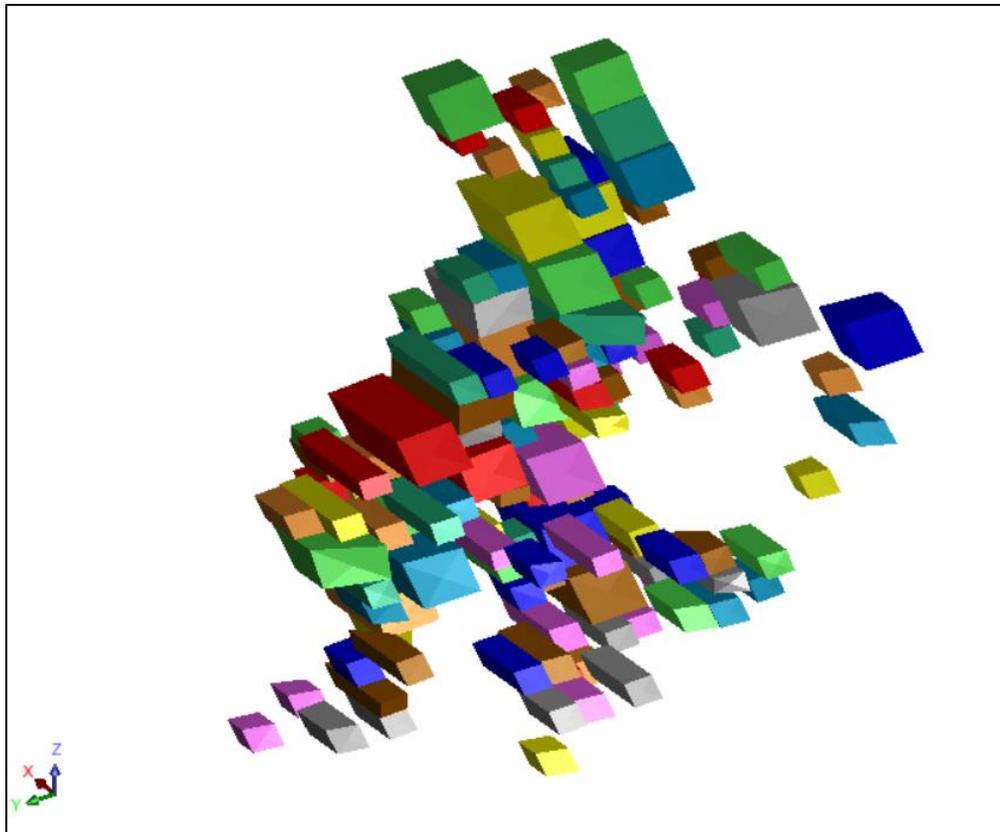


Figura 4. 1 Caserones resultantes Mina 1, vista isometrica.

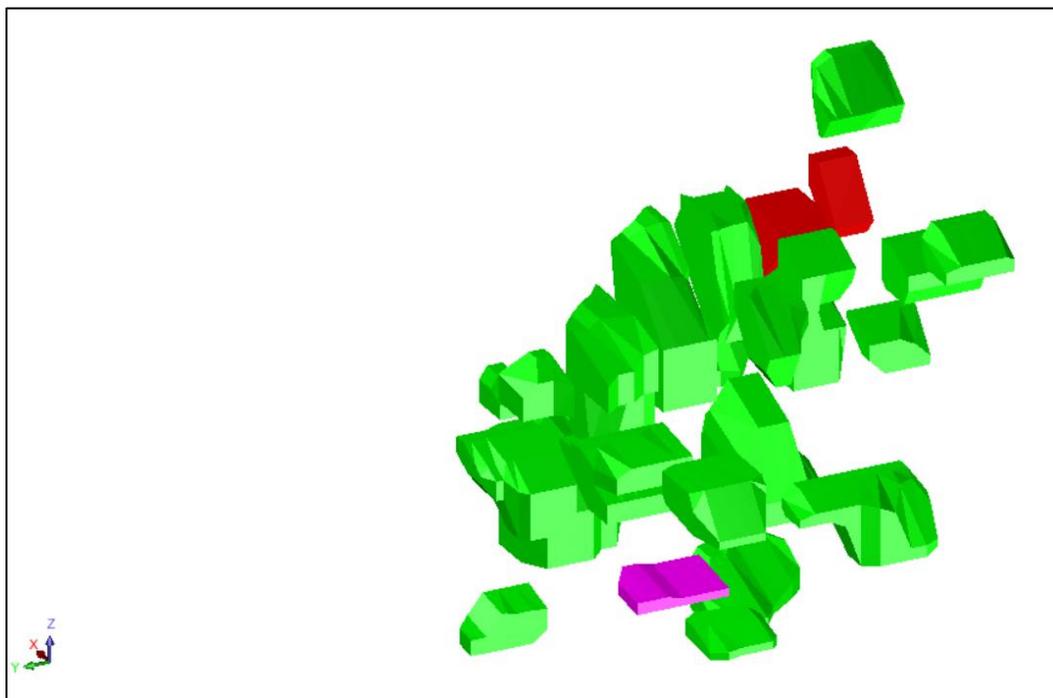


Figura 4. 2 Caserones metodología tradicional Mina 1, vista isométrica.

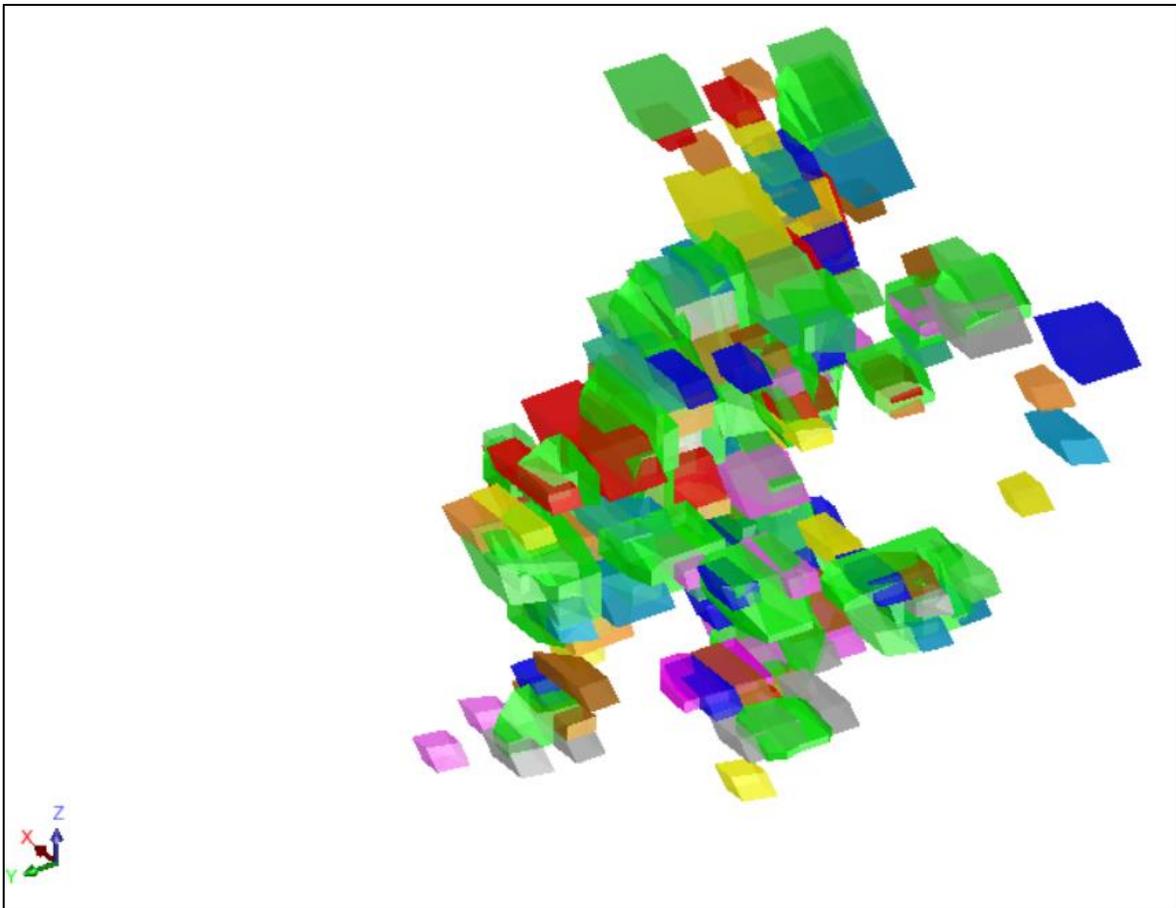


Figura 4. 3 Comparativa caserones SSO y caserones metodología tradicional, vista isométrica.

La distribución de todas las dimensiones de los caserones son los siguientes:

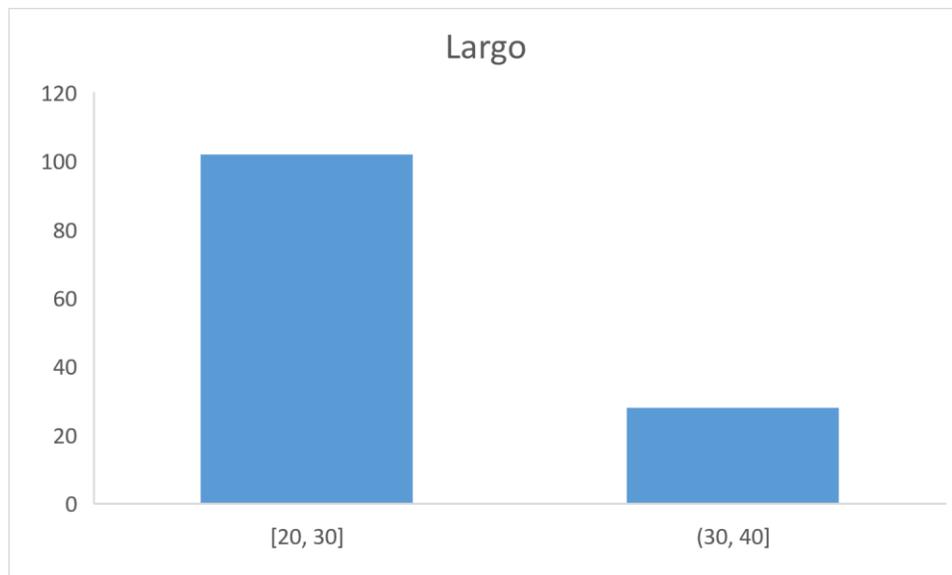


Figura 4. 4 Distribución largo de caserones.

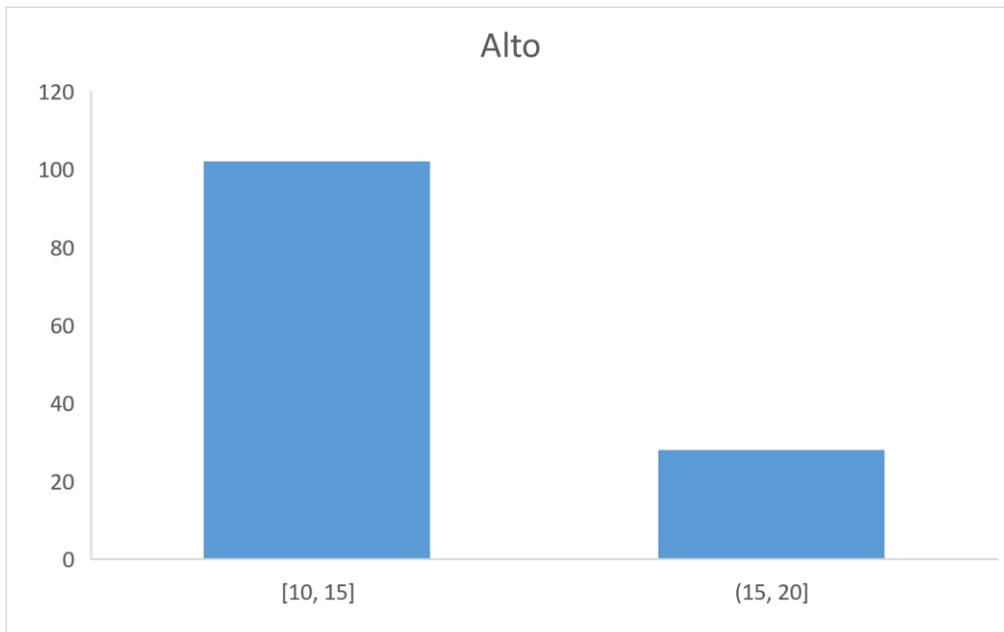


Figura 4. 5 Distribución de alto de caserones.

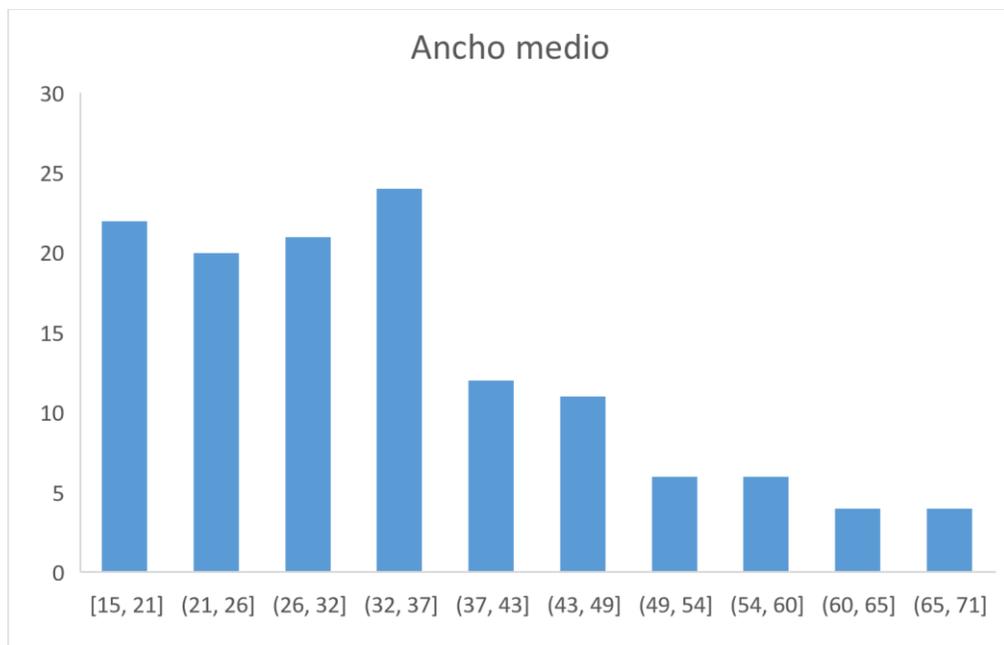


Figura 4. 6 Distribución de ancho medio de caserones.

En la siguiente tabla se puede observar el resumen comparativo tanto de los diseños obtenidos.

Tabla 4. 2 Tabla comparativa caserones minera, obtenidos mediante la nueva metodología Mina 1.

Configuración de caserones	Número de caserones	Tonelaje (t)	Ley Media (%)	Fino (t)	Diferencia Tonelaje	Cumplimiento Ley Media*
Reservas Minerales	-	4,354,299	0.97	42,237	-	-
SSO Stopes (con substopes, pilar 15m*)	130	4,649,107	0.99	45,998	7%	

Ejecutar la totalidad de los 75 escenarios tomo 35 horas. Las dimensiones de los caserones optimizados son alto entre 10 y 20 metros, ancho entre 10 y 70 metros y largo entre 20 y 40 metros.

4.2.2 Mina 2

A partir de los archivos entregados por Mina 2 es posible definir una rotación del *wireframe* que es donde se define tanto el largo como el alto de los caserones. Esta rotación corresponde a 45° en torno al eje Z.

Para la replicar los resultados obtenidos mediante la metodología tradicional, es decir los caserones definidos por el cliente, se definen distintos niveles (valores) para los siguientes parámetros.

- Alto del caserón
- Largo del caserón
- Ancho del Caserón

En la siguiente tabla se puede ver en detalle la matriz de diseño del ejercicio:

Tabla 4. 3 Matriz de diseño, Mina 2.

Parámetro	Número de niveles	Valores (metros)
Alto del caserón	5	20 25 30 35 40
Largo del caserón	5	30 35 40 45 50
Ancho del caserón	4	18 20 22 24

Las combinaciones de los distintos niveles antes mencionados definen las distintas configuraciones de caserones que serán evaluados. En particular se trata en total de 100 distintos escenarios los cuales se ejecutarán dentro del flujo de trabajo de Isight.

El ejercicio tomo en total 10 horas.

Tabla 4. 4 Tabla resultados caserones obtenidos a través de la nueva metodología Mina 2

Configuración de caserones	Número de caserones	Tonelaje (t)	Ley Media (%)	Fino (t)	Escenarios evaluados
<i>SSO Slice Method</i>	57	2,468,490	0.97%	23,958	100

La selección del escenario óptimo está basada principalmente en la selección del máximo tonelaje, de acuerdo a la metodología implementada en la mina actualmente. La totalidad de los resultados se pueden observar en los siguientes gráficos a modo de resumen, solo se muestran las superficies considerando el ancho máximo de caserón de 24 metros, el resto de los resultados se encuentran en la sección 8.2 de Anexos:

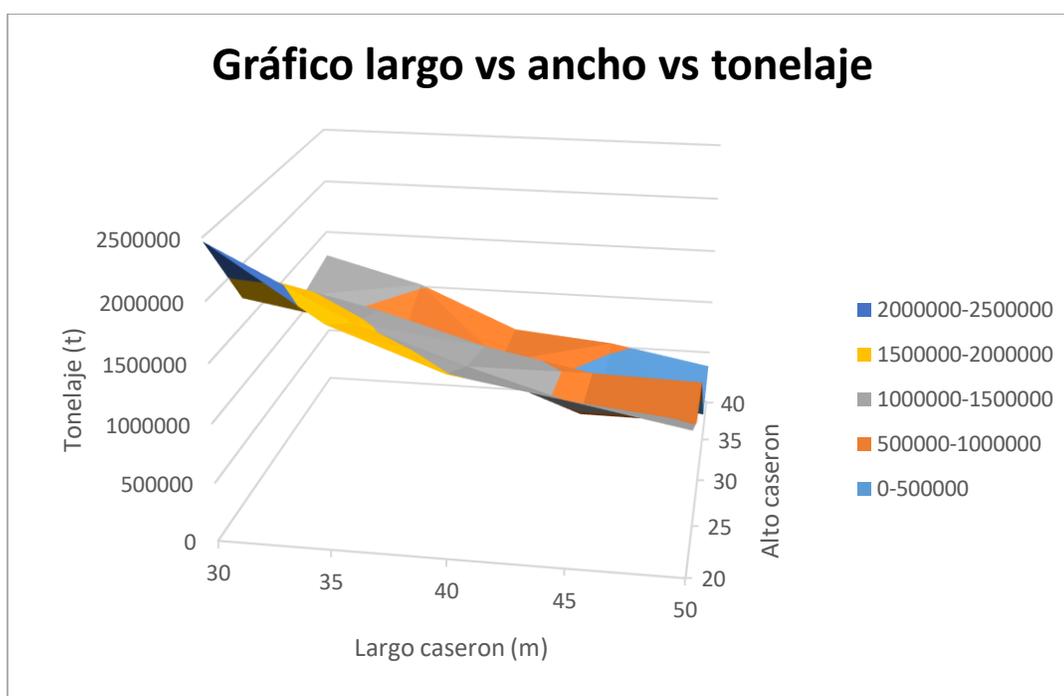


Figura 4. 7 Gráfico largo vs alto vs tonelaje, ancho 24 metros.

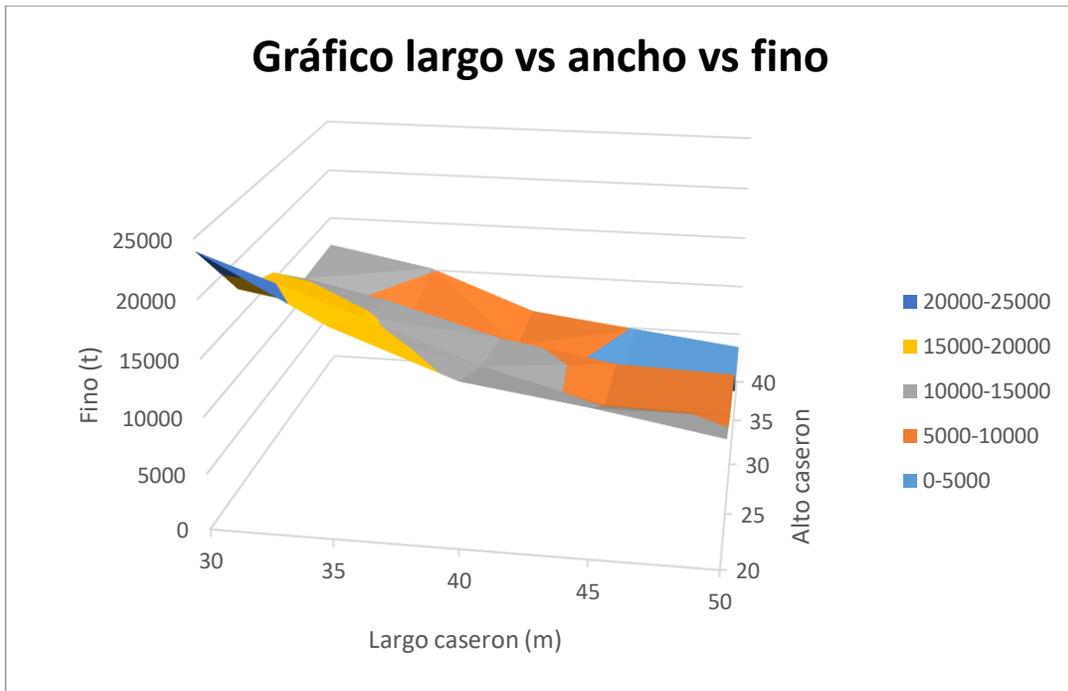


Figura 4. 8 Gráfico largo vs alto vs fino, ancho 24 metros.

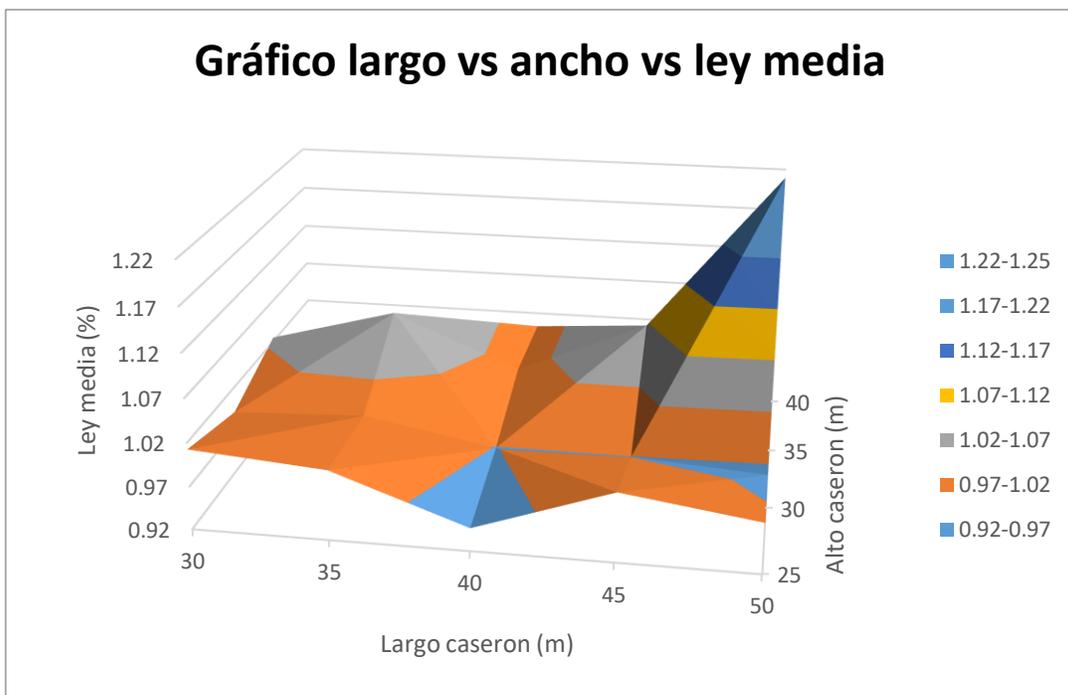


Figura 4. 9 Gráfico largo vs alto vs ley media, ancho 24 metros.

Las dimensiones de los caserones optimizados son alto 20 metros, largo 30 metros y anchos entre 15 y 24 metros.

Respecto a la decisión de los escenarios óptimos cabe volver a mencionar que, en ambos casos de estudio, tanto en Mina 1 como Mina 2, el escenario óptimo es determinado bajo el criterio actual de las mineras, maximizar el tonelaje, el metal contenido y en menor medida la ley media, esto a fin de generar resultados comparables entre la metodología actual y la propuesta en este trabajo.

4.3 Escenario Robusto

Cabe destacar que el análisis de robustez fue realizado solo para el escenario planteado por Mina 2.

A diferencia del caso de estudio definido en el punto anterior, donde el objetivo de la optimización fue maximizar el tonelaje, el metal contenido y la ley; esto de acuerdo a los criterios de selección con los cuales trabajan las minas previas; para determinar el escenario robusto se añaden otros dos objetivos:

- Maximizar el estadístico utilizado para medir la robustez, cociente entre media y desviación estándar del valor total.
- Maximizar el estadístico utilizado para medir la robustez, cociente entre media y desviación estándar de la probabilidad de estabilidad.

El escenario robusto corresponderá a un resultado de aquella colección de escenarios, que además de existir en una vecindad del óptimo, resultado de la sección anterior, maximiza los estadísticos. Por lo tanto, ambos resultados serán comparados, escenario robusto y escenario óptimo.

Se plantean 2 escenarios robustos, el primero debido a incertidumbre en variables económicas y el segundo enfocado a la incertidumbre de variables geomecánicas.

4.3.1 Escenario robusto variables económicas

Respecto a la definición del escenario más robusto en el caso de Mina 2 cabe destacar que se consideraron los siguientes parámetros.

Tabla 4. 5 Distribución de probabilidades, variables económicas

Parámetro	Distribución	Media [USD/t]	Desviación Estándar [USD/t]	Mínimo [USD/t]	Máximo [USD/t]
Precio Cobre	Normal	2,75	0,2	2,55	2,95
Costo Mina	Uniforme	18	-	16	20
Costo Planta	Uniforme	11	-	10	12

Existe una correlación entre los datos, con valor igual a 1 entre el precio del metal y los distintos costos asociados a la operación, lo anterior se ajusta al comportamiento visible entre ambos parámetros frente a cambios en el mercado. Se analizaron 100 escenarios de valores distintos, regidos por la distribución detalladas en la tabla anterior.

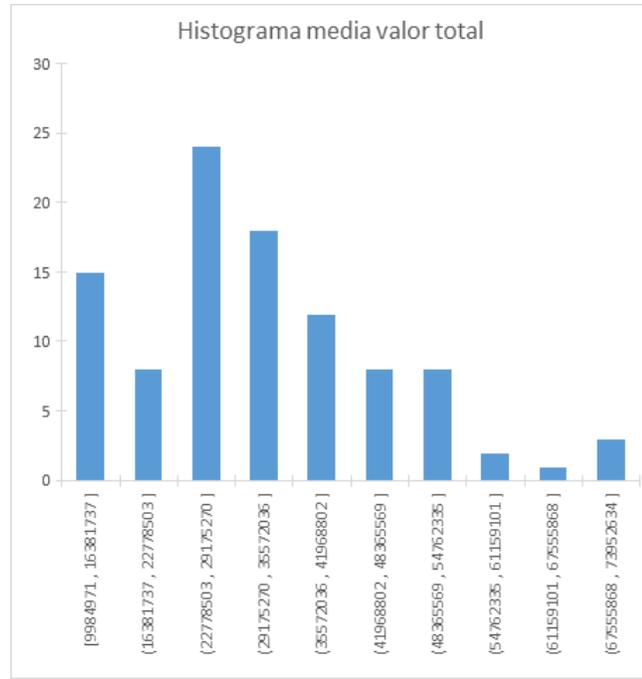


Figura 4. 10 Histograma resultados media valor total.

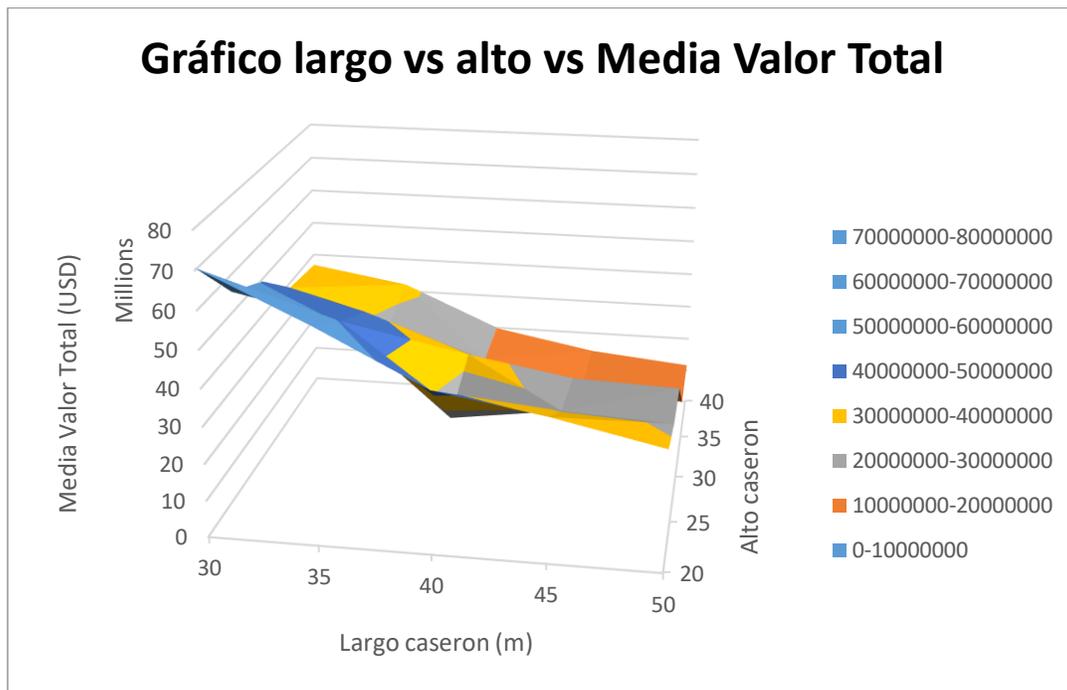


Figura 4. 11 Gráfico largo vs alto vs media valor total, ancho 24 metros.

Tabla 4. 6 Comparativa escenario base versus caso robusto dada incertidumbre en variables económica

Configuración de caserones	Numero de Caserones	Tonelaje (t)	Ley Media (%)	Media Valor Total [MUSD]	Desv. Estándar Valor Total [MUSD]	Estadístico Media/Desv. Std
Escenario Optimo (máx. ton, fino, ley)	57	2,468,490	0.97%	73.40	7,24	10.13
Escenario Robusto incertidumbre económica	57	2,340,945	0.98%	71,44	6.20	11.52

Las dimensiones de los caserones optimizados son alto 20 metros, largo de 30 y ancho entre 15 y 22 metros.

A continuación, se puede visualizar la distribución de ambos escenarios y un gráfico tipo Boxplot de ambas colecciones de datos.

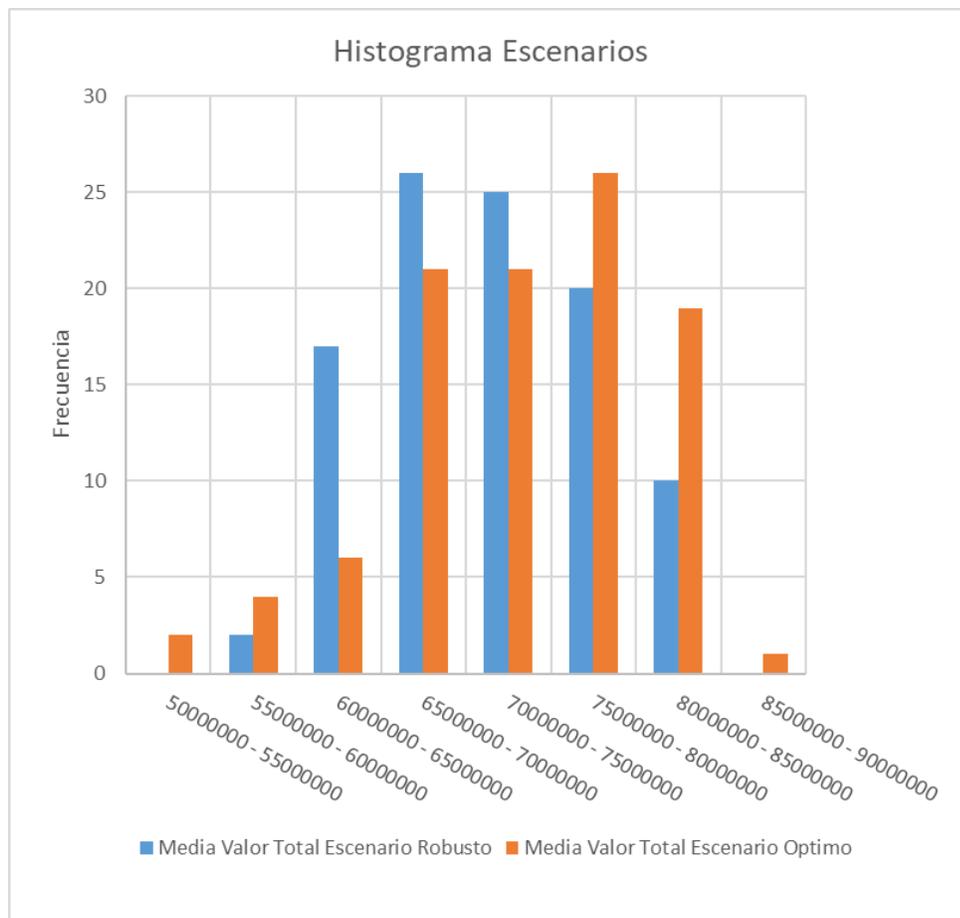


Figura 4. 12 Histograma escenario optimo vs escenario robusto, parámetros económicos.

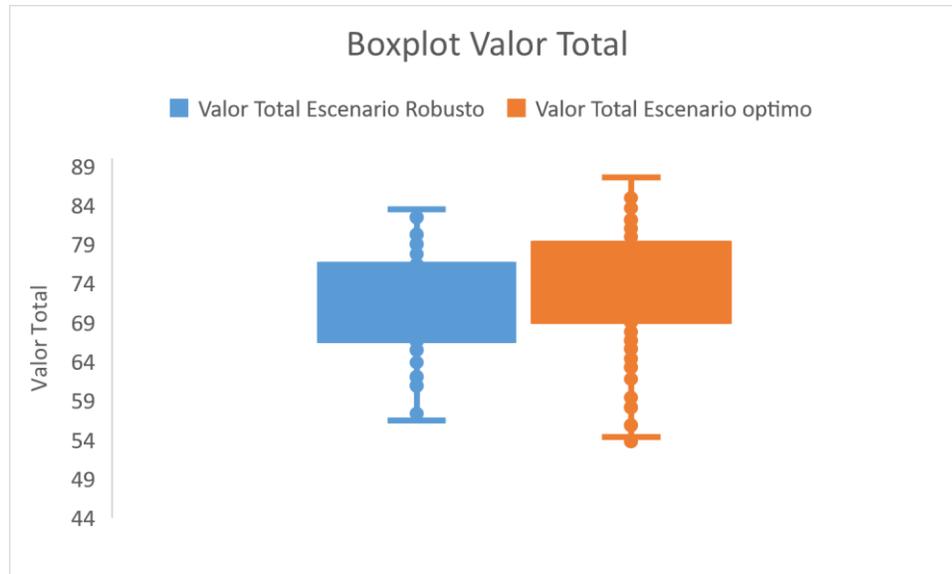


Figura 4. 13 Boxplot escenario optimo vs escenario robusto, parámetros económicos..

4.3.2 Escenario robusto variables geomecánicas

Respecto a la definición del escenario más robusto en el caso de Mina 2 cabe destacar que se consideraron los siguientes parámetros. Para realizar estas pruebas se consideraron 100 valores distintos los cuales sirvieron para contrastar las salidas del flujo una vez incorporado la incertidumbre en el análisis.

Tabla 4. 7 Distribución de probabilidades, variables geomecánicas

Parámetro	Distribución	Media	Desviación Estándar	Mínimo	Máximo
Q de Barton	Normal	26,6	2,66	22	32
UCS [MPa]	Normal	200	20	170	230
Sigma vertical [MPa]	Normal	24,3	2,43	20	29
Sigma horizontal e-w [MPa]	Normal	28,4	2,84	25	32
Sigma horizontal n-s [MPa]	Normal	15,6	1,56	13	18

El primer punto interesante por mencionar es que en todas las simulaciones obtenidas del caso base, ver punto anterior, el valor predictivo de las paredes *Hangingwall*, *Footwall*, *End/Side Wall* están por sobre los criterios de aceptabilidad según la metodología de Mawdesley aun cuando se considera la incertidumbre, lo cual es posible observar en la siguiente tabla.

Tabla 4. 8 Resultados probabilidad de estabilidad caso base

Parámetro	Media	Desviación Estándar
Probabilidad de Estabilidad <i>Side Wall</i>	0,972	0,002
Probabilidad de Estabilidad <i>Hanging Wall</i>	0,959	0,003
Probabilidad de Estabilidad <i>Footwall</i>	0,971	0,002
Probabilidad de Estabilidad Techo	0,842	0,019

Por lo tanto, el escenario robusto estará relacionado con maximizar la probabilidad de estabilidad del techo. En función de lo anterior el diseño óptimo de caserones, dada esta prioridad por la maximizar la media y minimizar la desviación estándar de la probabilidad de estabilidad techo, es la siguiente:

Tabla 4. 9 Comparativa escenario base versus caso robusto dada incertidumbre en variables geomecánica

Configuración de caserones	Número de Caserones	Tonelaje (t)	Ley Media (%)	Media Valor Total [MUSD]	Desv. Estándar Valor Total [MUSD]
Escenario Optimo (máx. ton, fino, ley)	57	2,468,490	0.97%	73.40	7,24
Escenario Robusto incertidumbre geomecánica	59	2,219,933	0,98%	68,34	5.91

Tabla 4. 10 Comparativa escenario base versus caso robusto dada probabilidad de estabilidad

Configuración de caserones	Número de Caserones	Probabilidad Estabilidad techo (media)	Probabilidad Estabilidad techo (Desv. Estándar)	Estadístico Media/Desv. Std
Escenario Optimo (máx. ton, fino, ley)	57	0.819	0.135	6.08
Escenario Robusto incertidumbre geomecánica	59	0,865	0,104	8.26

Las dimensiones de estas unidades de explotación son alto 20 metros, largo 30 metros y anchos entre 15 y 20 metros. La distribución de ambos escenarios y un gráfico tipo Boxplot de ambas colecciones de datos se observan a continuación.

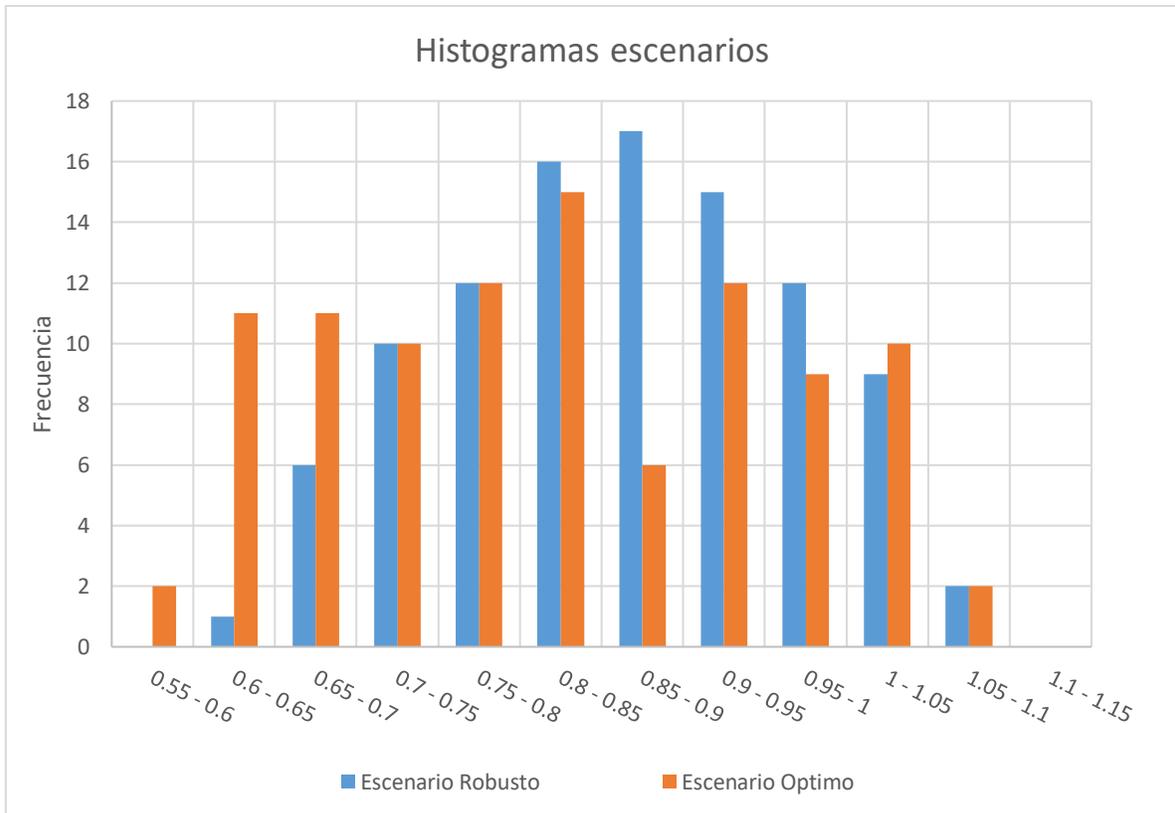


Figura 4. 14 Histograma escenario optimo vs escenario robusto, parámetros geomecánicos.

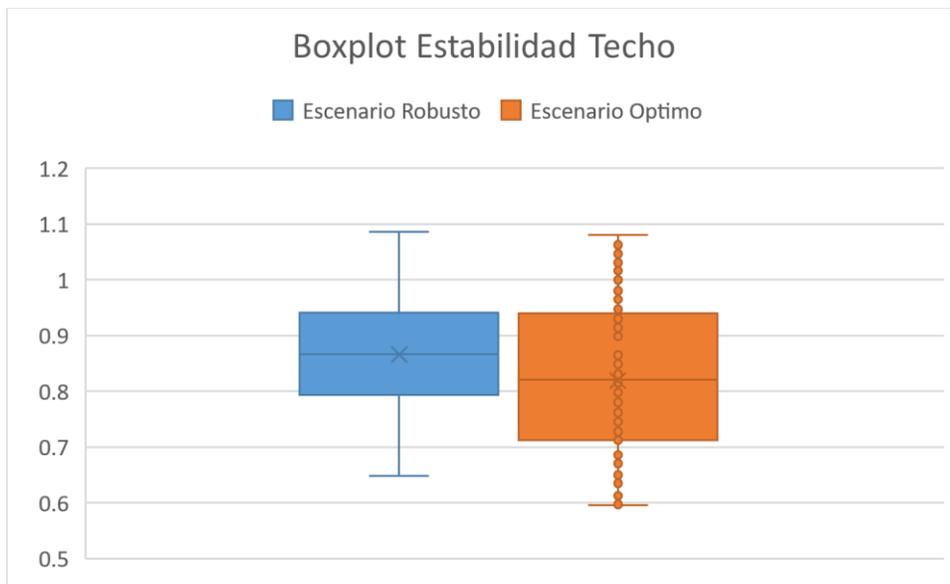


Figura 4. 15 Boxplot escenario optimo vs escenario robusto, parámetros geomecánicos.

4.4 Análisis de Sensibilidad de los datos

Existen variables propias de la metodología del optimizador de caserones, pero que para efectos propios de este trabajo no son utilizados como variable de diseño. En esta sección se muestran los resultados obtenidos al variar estos parámetros y de esta manera cuantificar el efecto de estos en los resultados.

Las variables mencionadas son:

- *Dip Cortes*
- Punto origen grilla

Dado los resultados obtenidos en la totalidad de simulaciones es posible generar un gráfico de Pareto los cuales se muestran a continuación:

En azul se muestran los efectos positivos sobre las respuestas mientras que en rojo se puede observar los efectos negativos.

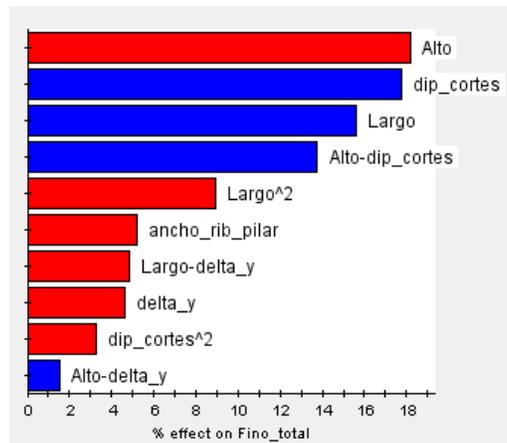


Figura 4. 16 Gráfico Pareto Fino total

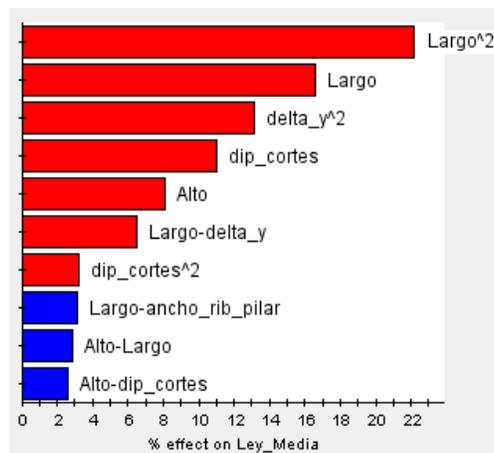


Figura 4. 17 Gráfico Pareto ley media

Uno de los factores de mayor peso en los resultados del fino o metal contenido tiene relación con la inclinación de los cortes realizados en la optimización (*Dip* cortes), por lo tanto, es un parámetro sobre el cual se deben tener alta consideración y control.

Para entender los efectos de este parámetro en los resultados se presenta el siguiente gráfico donde se observa que a menor *Dip* cortes el tonelaje es menor, pero hay una mayor ponderación en la selección de la ley media de la configuración.

Por el contrario, a mayor *Dip* cortes menor es la ley media y mayor es el tonelaje de los caserones resultantes.

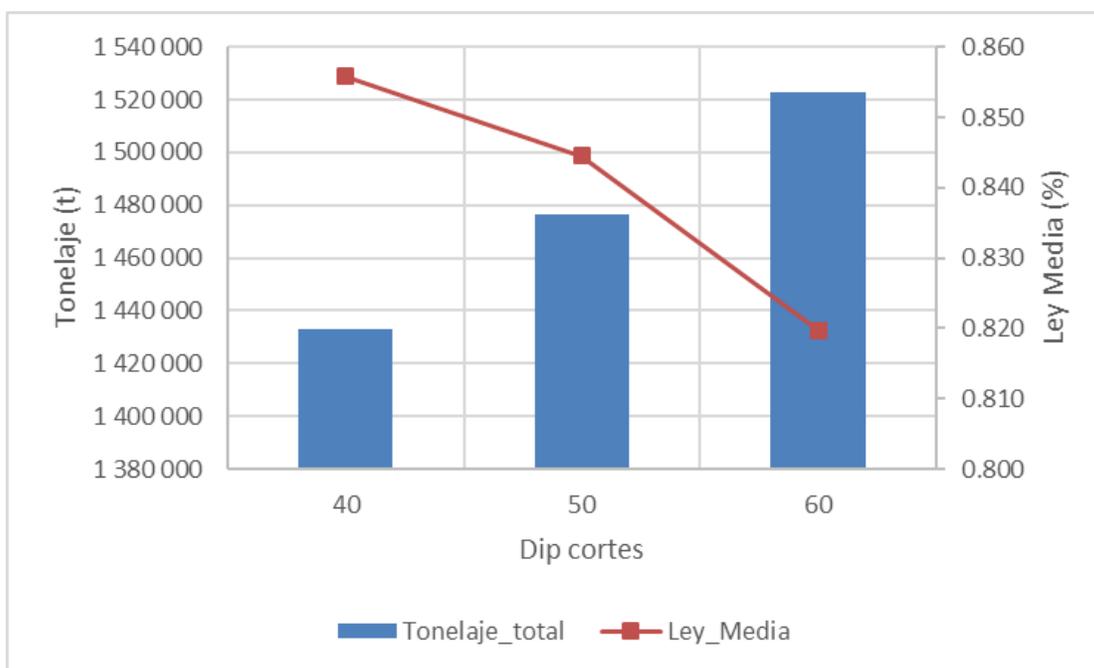
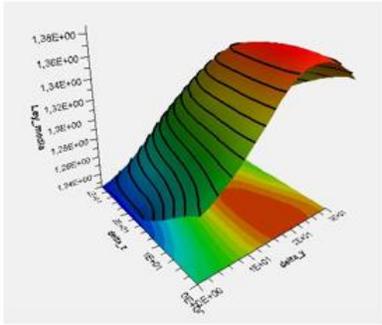
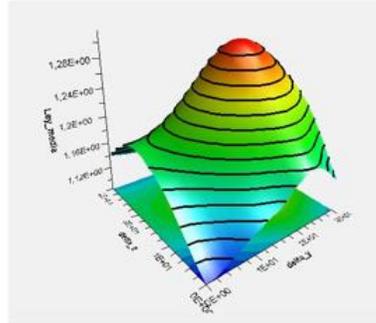


Figura 4. 18 Gráfico efectos *Dip* cortes

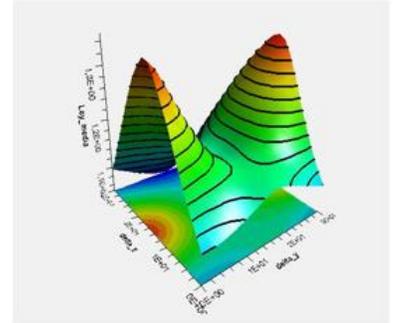
Respecto a las variaciones del punto de origen de la grilla, resumiendo los resultados en un gráfico que compare los outputs de la metodología versus el punto de origen es posible observar que el máximo valor dado un tamaño fijo de caserones no se encuentra necesariamente en el mismo punto de inicio que para otro tamaño de caserones.



Stope 30X10

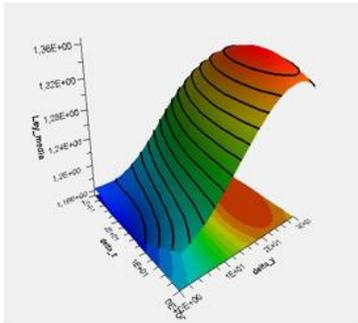


Stope 30X30

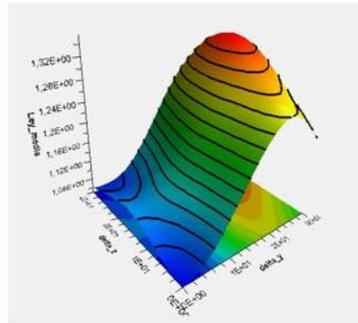


Stope 30X50

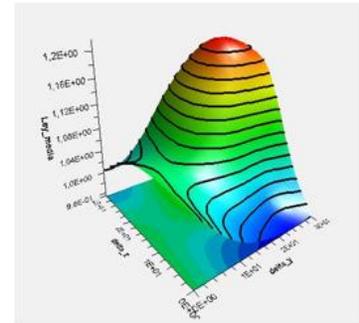
Figura 4. 19 Puntos de inicio vs Ley media, caserones ancho 30 metros fijo



Stope 40X10



Stope 40X30



Stope 40X50

Figura 4. 20 Puntos de inicio vs Ley media, caserones ancho 40 metros fijo

Este problema, denominado “problema de la grilla” se explica en el siguiente esquema:

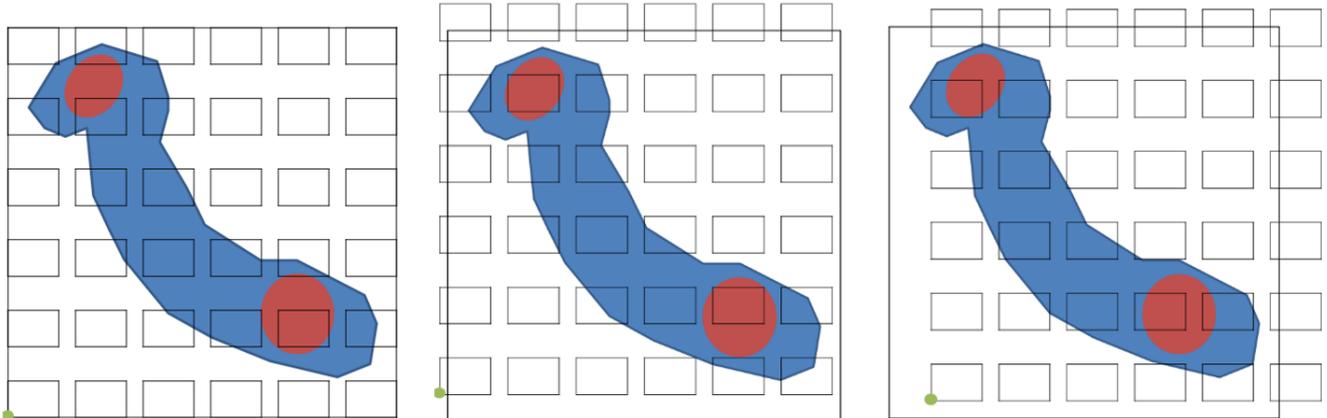


Figura 4. 21 Problema de la grilla, elaboración propia

Los siguientes gráficos, son resultados a partir de una interpolación de los valores obtenidos en las distintas simulaciones del primer caso, Mina 1, antes mencionado. Es posible visualizar el valor total de las distintas configuraciones. Mientras que en los gráficos siguientes es posible observar los gráficos de la ley media y del tonelaje total contenido dentro de los caserones que componen cada configuración

Es posible observar que existe una correlación entre los escenarios de mayor valor total y aquellos que maximizan el tonelaje total contenido debido a una mayor simetría entre aquellos gráficos.

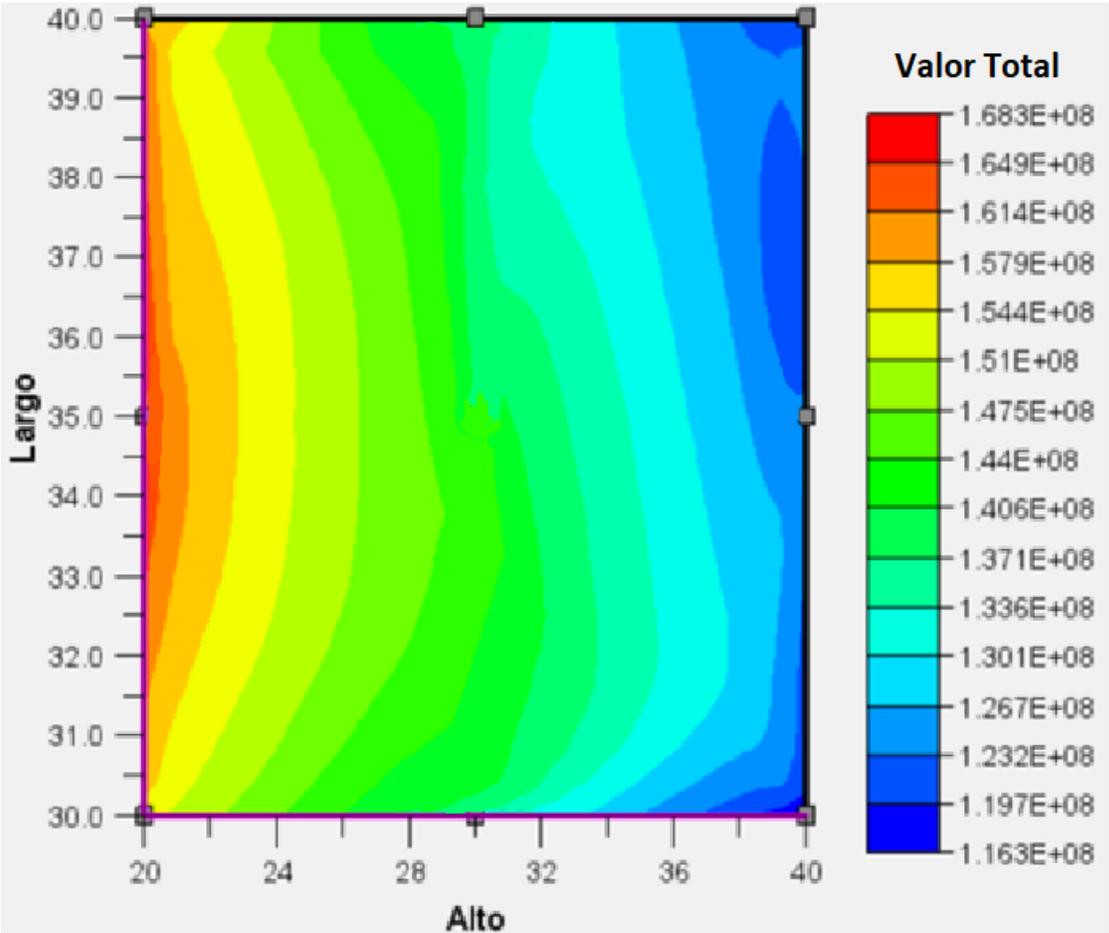


Figura 4. 22 Grafico Largo [m] vs Alto [m] vs Valor total [USD]

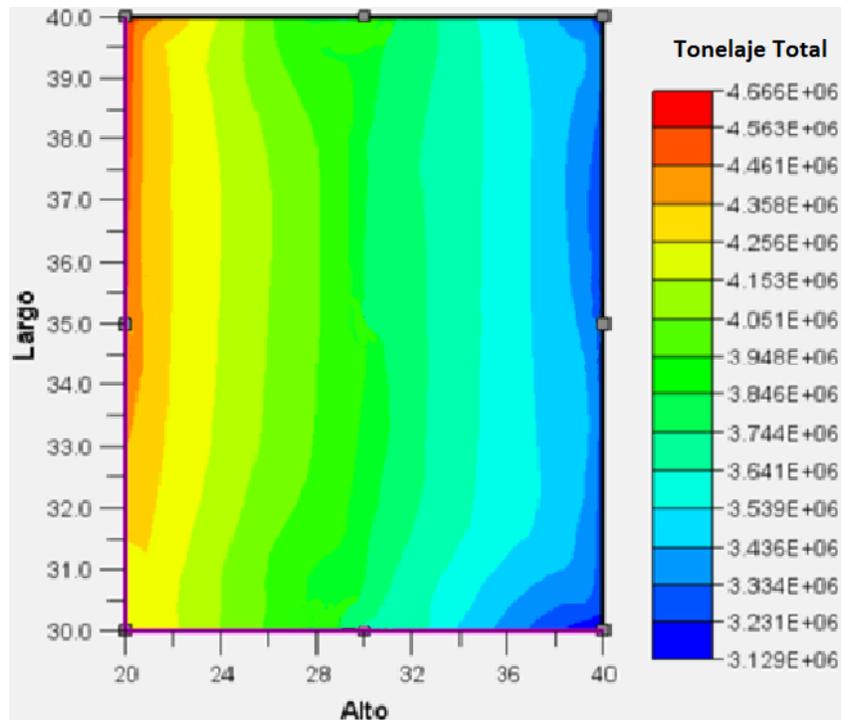


Figura 4. 23 Grafico Largo [m] vs Alto [m] vs Tonelaje [t]

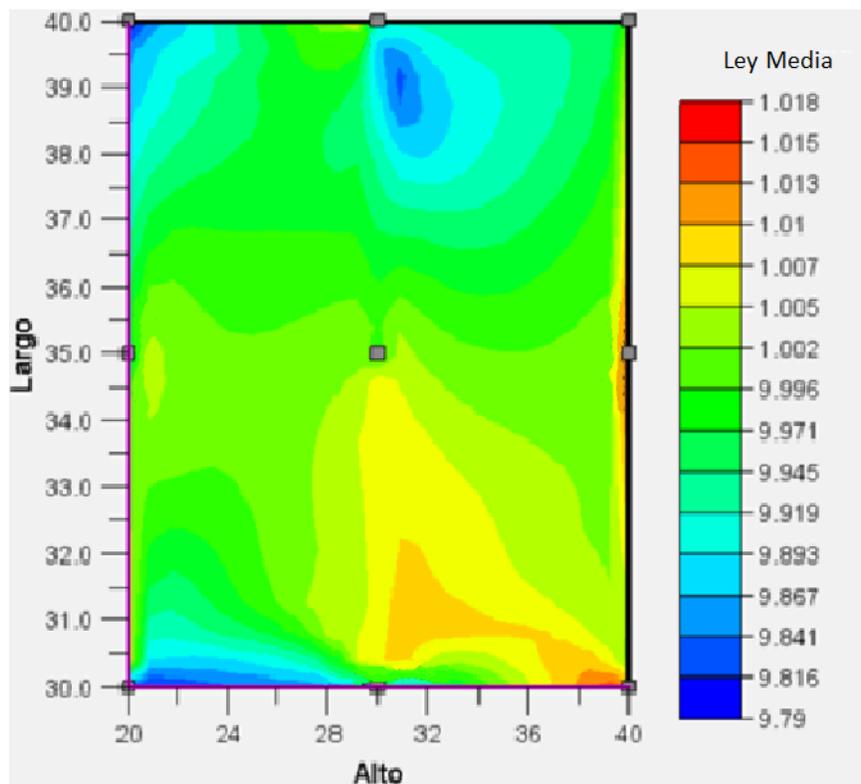


Figura 4. 24 Grafico Largo [m] vs Alto [m] vs Ley Media [%]

Capítulo 5: Discusión

Es relevante mencionar que la definición del caserón óptimo, con la cuales se validó la metodología, es obtenido a partir de las sugerencias de las empresas mineras, por lo que el criterio de selección utilizado para la realización de estas pruebas es de carácter subjetivo y particular de cada operación minera y no tiene por qué representar un común para el resto de las operaciones de *Sublevel Stopping*. De igual manera, la utilización de un estadístico que hace uso de la media y distribución estándar, la elección de la vecindad de resultados a partir del cual se seleccionará el escenario robusto también corresponde a decisiones propias del autor. Por lo tanto, la implementación de la metodología propuesta en este trabajo debe ser personalizado a cada operación.

Las selecciones de los escenarios robusto siguen teniendo un rasgo subjetivo debido a que terminan siendo *trade off* (definido por la asignación de prioridades) entre el riesgo al cual se está dispuesto a asumir respecto a la incertidumbre y otras salidas como pueden ser la recuperación de fino o el valor de la configuración con la cual se quiere cumplir. Por lo tanto, estos criterios deben ser definidos a partir de las distintas necesidades de las distintas mineras. De igual manera esto último es una ventaja de la metodología propuesta en este trabajo ya que los criterios empleados pueden ser relajados o modificados a gusto del planificador, permitiendo apegarse de mejor manera a los objetivos estratégicos que rigen la operación.

Similar al apartado anterior, los diferentes escenarios planteados y evaluados, diferentes tamaños de caserones e inclinación de sus paredes, en los capítulos anteriores son reflejo de un estudio de *benchmarking* de distintas operaciones mineras que utilizan el método. Por lo que es necesario realizar la labor de definir previamente cuales son los tamaños mínimos de los caserones y pilares para construir una matriz de diseño acorde a los criterios evaluados.

En el caso base de Mina 1, los resultados obtenidos mediante la metodología propuesta en este trabajo tienen una similitud total con los resultados obtenidos a través de la metodología tradicional, donde las envolventes cumplen con las restricciones de una ley media mayor a 0,85% y cumple con los objetivos de maximizar el tonelaje y el fino contenido. La validación de este caso base fue realizada por el autor a través de la comparación de las envolventes.

La validación de los caserones en el caso de Mina 2 fue realizada por la propia empresa donde establecieron una precisión cercana al 95%, de igual manera los caserones cumplían con las restricciones definidas por la minera, máximo porcentaje de estéril 20%, y la intención de maximizar tanto el tonelaje como el fino contenido.

Los gráficos que resumen las ejecuciones muestran que a medida que aumenta el tamaño del caserón el tonelaje de la configuración total disminuye ya que, al ser

caserones de mayor tamaño se disminuye el número de caserones que componen aquella configuración. Por otro lado, los caserones al ser de mayor tamaño también permiten en su interior una mayor cantidad de estéril lo cual diluye la ley de cada caserón y razón por lo cual la ley media disminuye.

Respecto a los escenarios robustos, determinados a través de incorporar la incertidumbre en la selección de objetivos, cabe destacar que se utilizaron distribuciones normales o uniformes en función de sugerencias de las mineras con las cuales se desarrollaron las pruebas de concepto, es importante mencionar que en el caso de que se tenga información respecto a cómo distribuyen las variables lo correcto es desarrollar todas estas pruebas con aquella información.

Respecto a los resultados obtenidos mediante la comparación de variables económicas se observa que si bien hay una disminución en la media del valor total de 2.6% existe además una disminución de la variabilidad del valor total representado en un descenso de la desviación estándar respecto a las medias. Por lo tanto, el escenario robusto corresponde a un escenario mucho menos sensible frente a variaciones en parámetros económicos. Algo observable en la distribución de los resultados del escenario óptimo y escenario robusto.

Los resultados obtenidos mediante la comparación de variables geomecánicas muestran una disminución en el valor total lo cual se debe a una disminución del tonelaje que representa aquel escenario. Sin embargo, la realización de este ejercicio, optimizar considerando la estabilidad de la variable techo, puede llevar a que existan caserones cuyo tamaño no son operativos, es decir existen unidades que “flocean” la mina por lo tanto se debe ser cuidadoso al trabajar con estos indicadores. Efectivamente se logra disminuir la variabilidad del techo de los caserones y llevarlos a valores que permitan establecer un escenario estable.

Cabe destacar que el análisis del escenario robusto se diferenció debido a las distintas naturalezas de las variables analizadas, pero pueden ser incorporadas todas dentro de un mismo flujo de optimización

Es importante destacar que tanto el *Dip* de los cortes como el punto de origen son elementos relevantes dentro de la optimización a través de esta metodología.

El problema de la grilla puede ser solucionado gracias a la incorporación de Isight, ya que permite evaluar los distintos escenarios respecto a distintos puntos de inicio. Lo anterior es que el optimizador de caserones incorporado en el software Surpac está enfocado en la metodología de *Sublevel Stopping* y la utilización de relleno.

La variable *Dip* Cortes causa los siguientes efectos, a mayor ángulo mayor es el tonelaje y menor es la ley media y viceversa. Es decir, para efectos del diseño y planificación debiera ser muchísimo más relevante maximizar el tonelaje ya que este

criterio es el que tiene un mayor peso sobre valor de la configuración versus la posibilidad de maximizar la ley media de la configuración.

Los gráficos obtenidos a partir de interpolaciones y la colección de resultados obtenidos para Mina 2 nos permiten observar que se permiten obtener mayores valores de las configuraciones en escenarios donde se maximiza el tonelaje que en aquellos casos donde se suele guiar por las zonas de mayor ley, por lo tanto, una práctica habitual en la metodología tradicional es utilizar ley del mineral como elemento para definir unidades de explotación lo cual se opone a los resultados mostrados en este ejercicio.

La metodología tradicional, la cual consiste en realizar perfiles o cortes perpendiculares al yacimiento y posteriormente dibujar el contorno de los caserones, requiere de mucho tiempo de ejecución, realizar las mismas labores que se realizaron en este trabajo toma *“alrededor a un mes y medio”* de acuerdo con lo conversado con los ingenieros de planificación de las minas mencionadas. Por lo tanto, la solución propuesta en este trabajo tiene como fortalezas la reducción de los tiempos de ejecución y la posibilidad de analizar múltiples escenarios en tiempos reducidos

Finalmente, cabe destacar que los sólidos generados a través de esta metodología corresponden a unidades que son utilizadas en la planificación a largo plazo por lo que es inevitable la labor de refinar el diseño de manera manual para establecer las unidades que serán utilizadas en tanto a nivel táctico como operacional.

Capítulo 6: Conclusiones

La capacidad de maximizar el beneficio económico a raíz de la explotación de un recurso mineral se logra mediante una buena planificación. El negocio minero tradicional busca lograr la mayor obtención de valor posible asociado al yacimiento, pero suele pecar al no considerar la variabilidad proveniente de aquellos factores externos involucrados en el proceso de selección de caserones.

La realización de este trabajo permite definir una metodología donde el diseño de caserones es automatizado y los tiempos de trabajo y de ejecución son reducidos, comparativamente realizar un diseño de la manera tradicional toma alrededor de 1 mes a un mes y medio mientras que la metodología mostrada en este trabajo es capaz de replicar y mejorar aquellos resultados en un periodo de horas, el cual además entrega como resultado una gama de posibilidades de configuraciones optimas de caserones que cumplan con los objetivos establecidos por el cliente y que además incorporan la incertidumbre de diferentes variables no controladas.

Respecto a los resultados obtenidos en el caso de estudio se puede observar que el escenario seleccionado cumple con todos los objetivos solicitados, e incluso, representa un aumento en las reservas respecto a los caserones obtenidos mediante la forma tradicional.

Respecto a posibles mejoras a realizar es que el valor calculado como un simple flujo de caja corresponde a un indicador solo de referencia puesto que la distribución de los caserones en el espacio estará asociado a un tiempo de desarrollo y construcción el cual no estará siendo evaluado, por lo tanto, la configuración definida como robusta podría no serlo al incorporar el tiempo como un factor involucrado en el proceso de diseño.

Afirmar que las distintas unidades de explotación presentes en la configuración de caserones cumplen con los criterios de estabilidad requiere no solamente de la validación gráfica, para ser concluyentes respecto a este aspecto es necesario realizar un modelo de elementos finitos de las distintas unidades de explotación.

La metodología implementada para validar la estabilidad de cada caserón es particular para cada operación, esto significa que las curvas de estabilidad de cada una de las operaciones pueden ser parametrizadas y utilizadas para la evaluación. De acuerdo con lo conversado con las compañías mineras en donde se aplicó esta solución, existen distintas alternativas para evaluar la estabilidad tanto de los caserones como también de los pilares, por lo tanto, la metodología implementada en la solución SSO debe ser flexible para poder determinar las para determinar el factor de seguridad

Capítulo 7: Bibliografía

- Tavakoli, M. "Undergrown Metal 3Mine Crown Pillar Stability Analysis". Doctor of Philosophy Thesis. Department of Civil and Mining Engineering. University of Wollongong. 1994.
- W. Hustrulid and R. Bullock, "General planning of the noncoal underground mine," in *Underground mining methods*, Littleton, Colorado, 2000, p. 17.
- Potvin, Y & Hudyma, M. "Open Stope Mining in Canada". *MassMin Proceedings*. Brisbane, Australia, 2000.
- Mawdesley, C, Trueman, R & Whiten, W.J. "Extending the Mathews Stability Graph for Open-Stope Design". *The Institution of Mining and Metallurgy*. 2001.
- Mawdesley, C. "Predicting Cave Initiation and Propagation in Block Caving Mines". Doctor of Philosophy Thesis. University of Queensland, Brisbane. 2002.
- Hamrin, H. "Underground Mining Methods and Applications", Chapter 1. *Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies*. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. 2011.
- Pakalnis, R.C & Hughes, P.B. "Sublevel Stopping", Chapter 13.4. *SME Mining Engineering Handbook*. 2011.
- Sens, J. "Stope mine design optimisation using various algorithms for the randgold kibali project". Msc. Thesis Delft University of Technology. 2011
- Bullock, R.L. "Comparison of Underground Mining Methods", Chapter 6.5. *SME Mining Engineering Handbook*. 2011.
- H. Gutierrez, Román de la Vara, "Análisis y Diseño de Experimentos", segunda edición, 2012.
- Villaescusa, E. Geotechnical. "Design for Sublevel Open Stopping". *CRC Press Taylor & Francis Group*. 2014
- M. L. Bloss. "An operational perspective of mine backfill," in *Mine Fill 2014 Proceedings of the 11th international Symposium on Mining with Backfill*, Nedlands, Australian Centre for Geomechanics, 2014, pp. 15-30.
- Sandanayake, D., Topal, E., & Asad, M. "Designing an optimal stope layout for underground mining based on a heuristic algorithm". *International Journal of Mining Science and Technology*, 767-772. 2015

- Sandanayake, D., Topal, E., & Asad, M. “A heuristic approach to optimal design of an underground mine stope layout”. *Applied Soft Computing*, 595- 603. 2015

Capítulo 8: Anexos

8.1 Ejemplos funcionamiento algoritmo de optimización “Slice Method”

En las siguientes imágenes se pretende ilustrar el funcionamiento del algoritmo implementado en Slice Method implementado en Surpac.

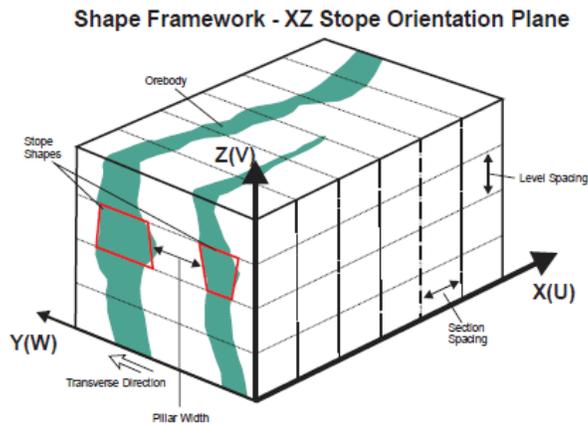


Figura 8. 1 Esquema uso SSO, yacimiento orientación XZ. Fuente: *Stope Shape Optimizer* Versión 3.1.0 Reference Manual

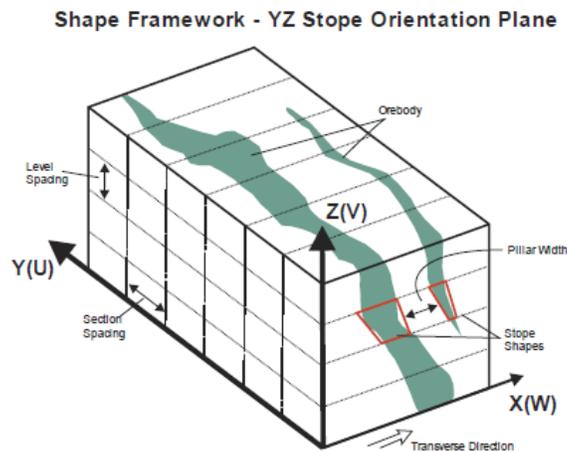


Figura 8. 2 Esquema uso SSO, yacimiento orientación YZ. Fuente: *Stope Shape Optimizer* Versión 3.1.0 Reference Manual

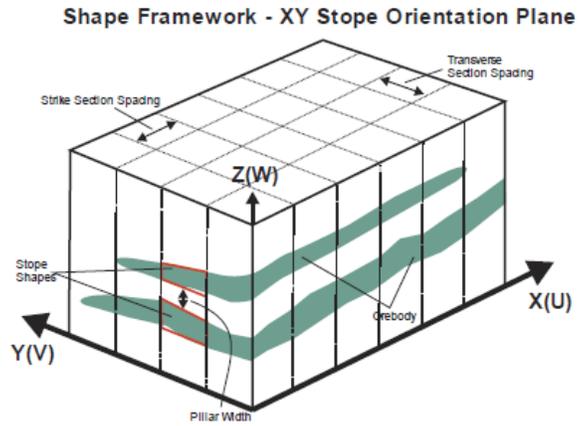


Figura 8. 3 Esquema uso SSO, yacimiento orientación XY. Fuente: *Stope Shape Optimizer* Versión 3.1.0 Reference Manual

8.2 Resumen resultados Mina 2

En los siguientes gráficos se observan los resultados de Mina 2 para los anchos 18, 20 y 22 metros

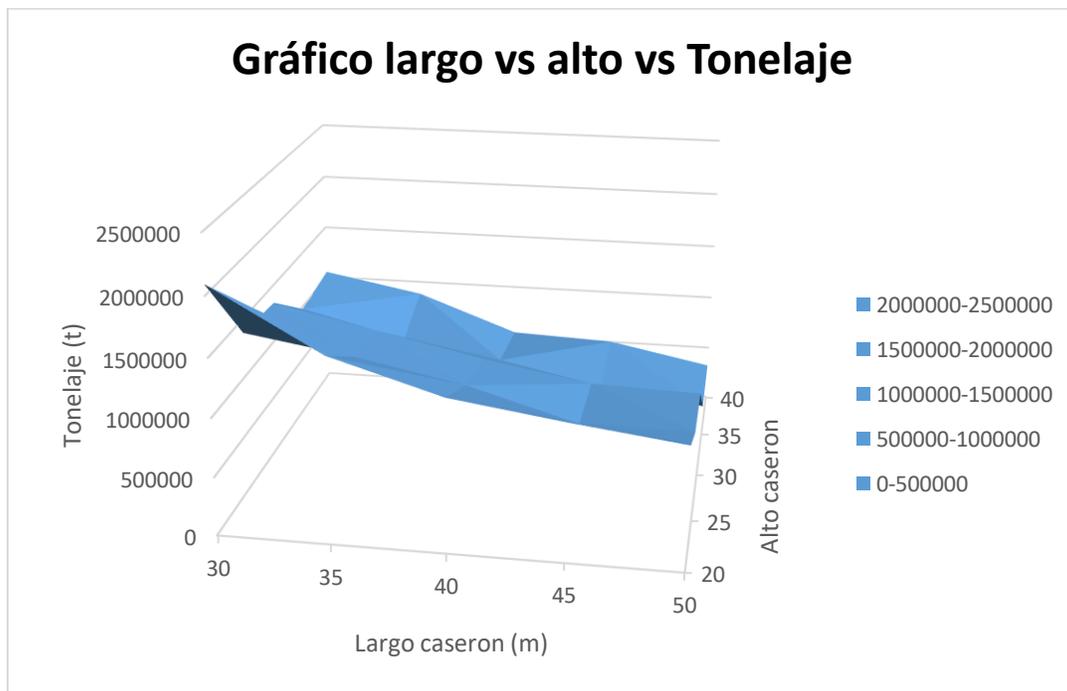


Figura 8. 4 Gráfico largo vs alto vs tonelaje, ancho 18 metros

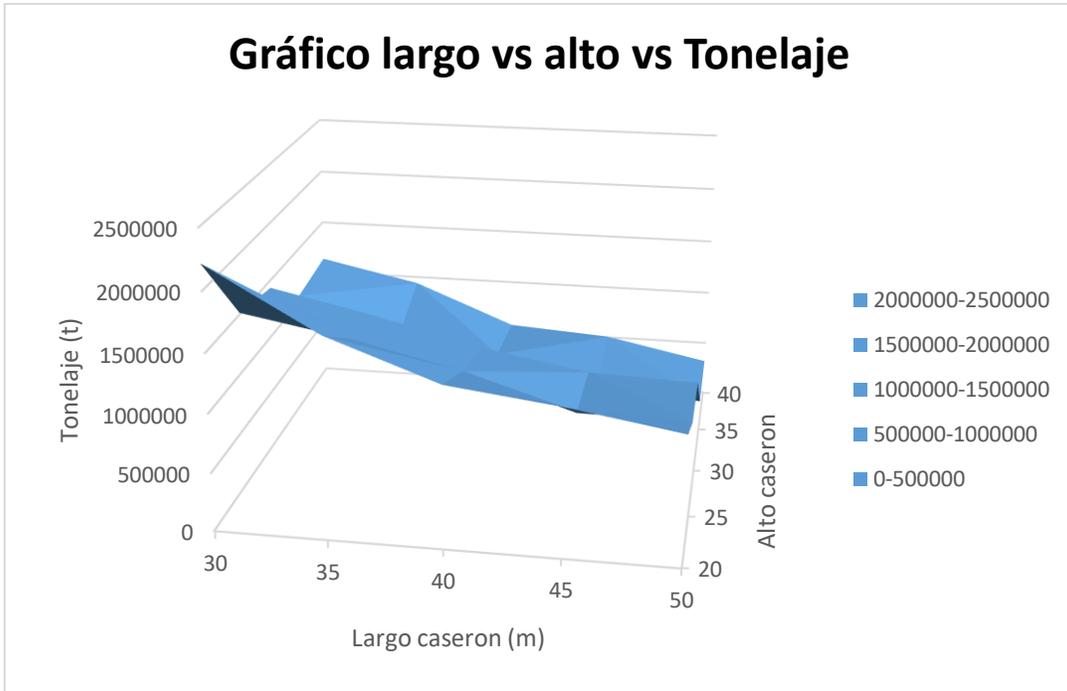


Figura 8. 5 Gráfico largo vs alto vs tonelaje, ancho 20 metros

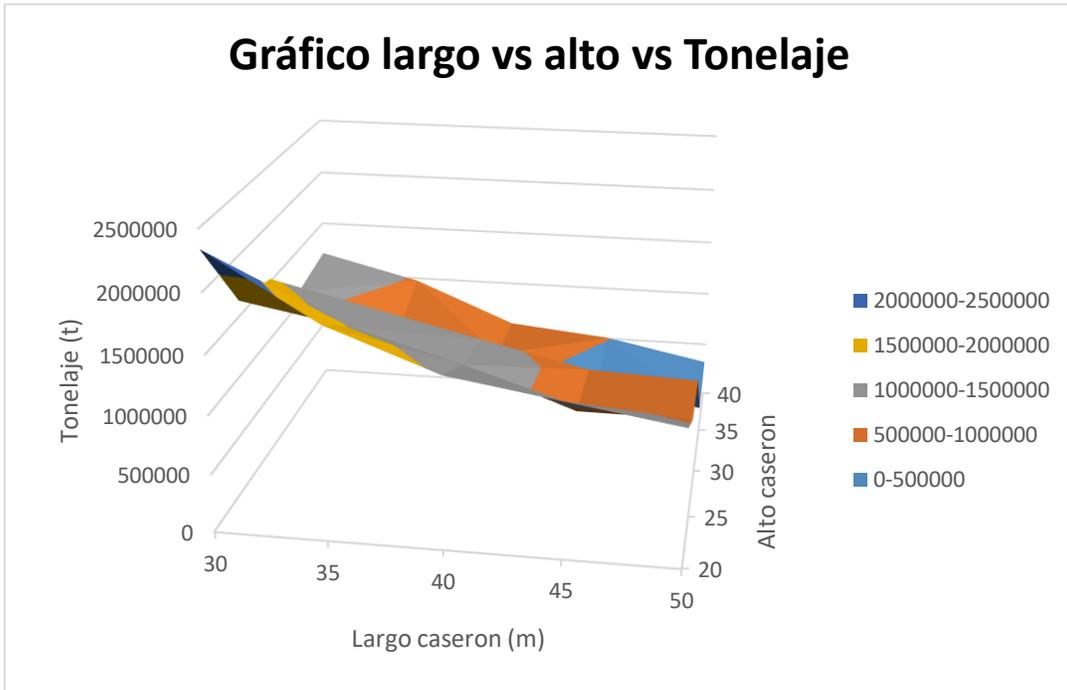


Figura 8. 6 Gráfico largo vs alto vs tonelaje, ancho 22 metros

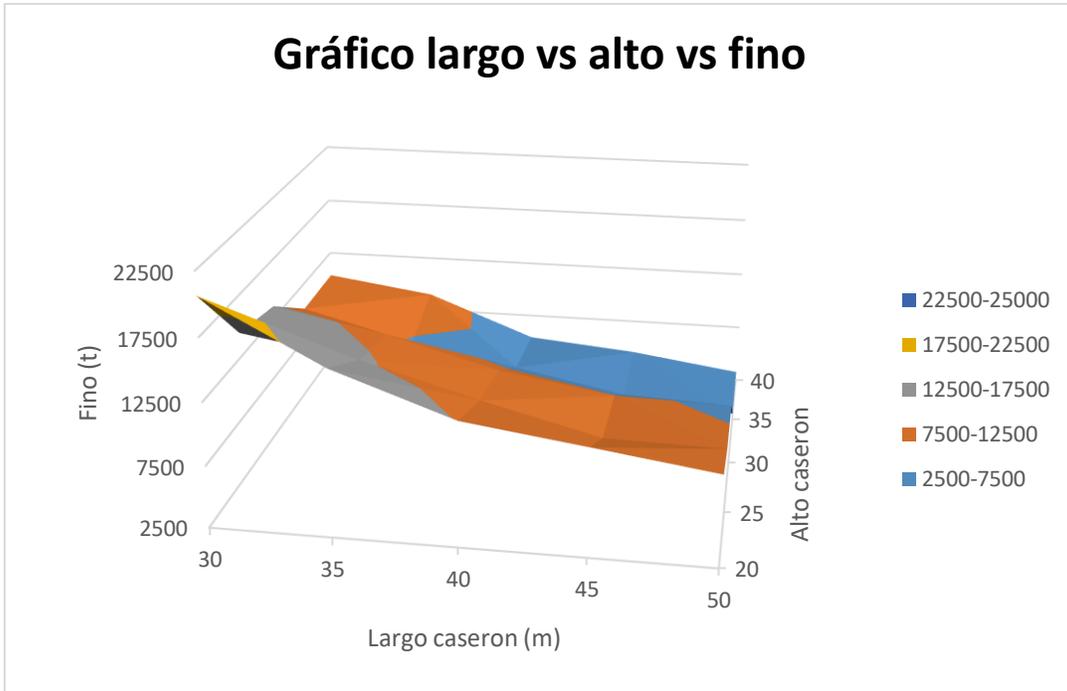


Figura 8. 7 Gráfico largo vs alto vs fino, ancho 18 metros

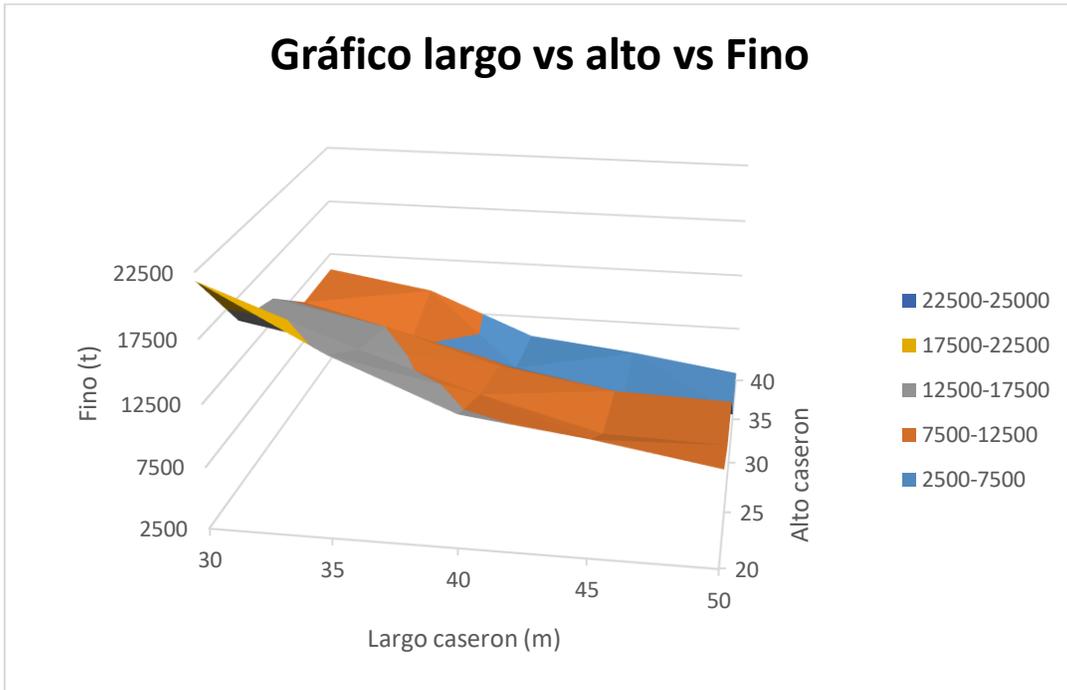


Figura 8. 8 Gráfico largo vs alto vs fino, ancho 20 metros

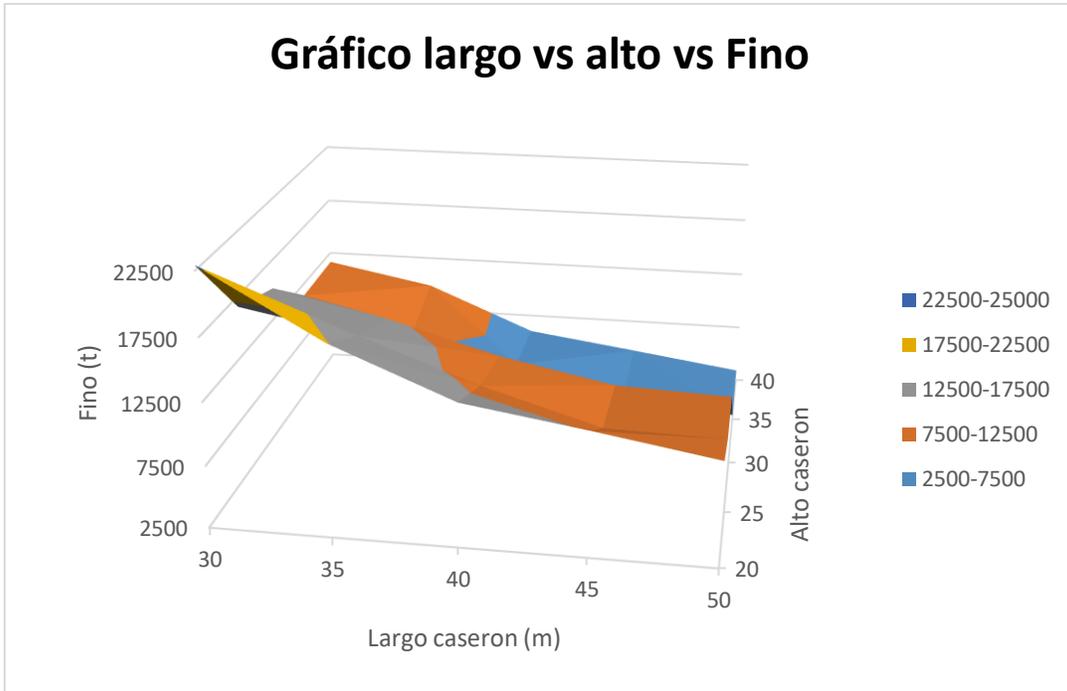


Figura 8. 9 Gráfico largo vs alto vs fino, ancho 22 metros

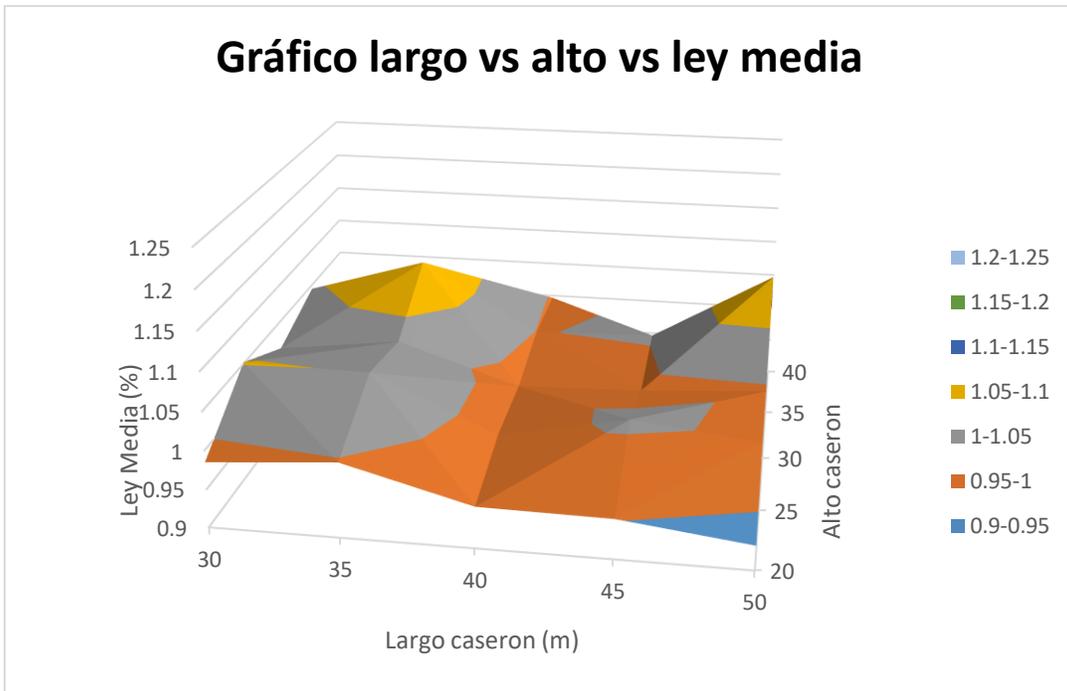


Figura 8. 10 Gráfico largo vs alto vs ley media, ancho 18 metros

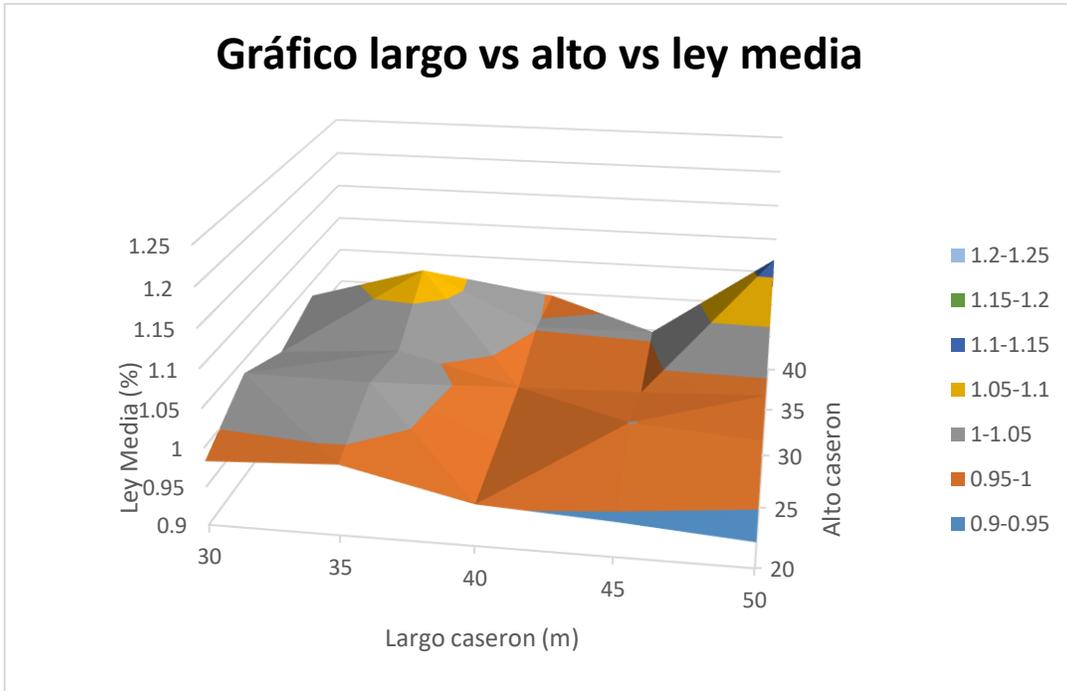


Figura 8. 11 Gráfico largo vs alto vs ley media, ancho 20 metros

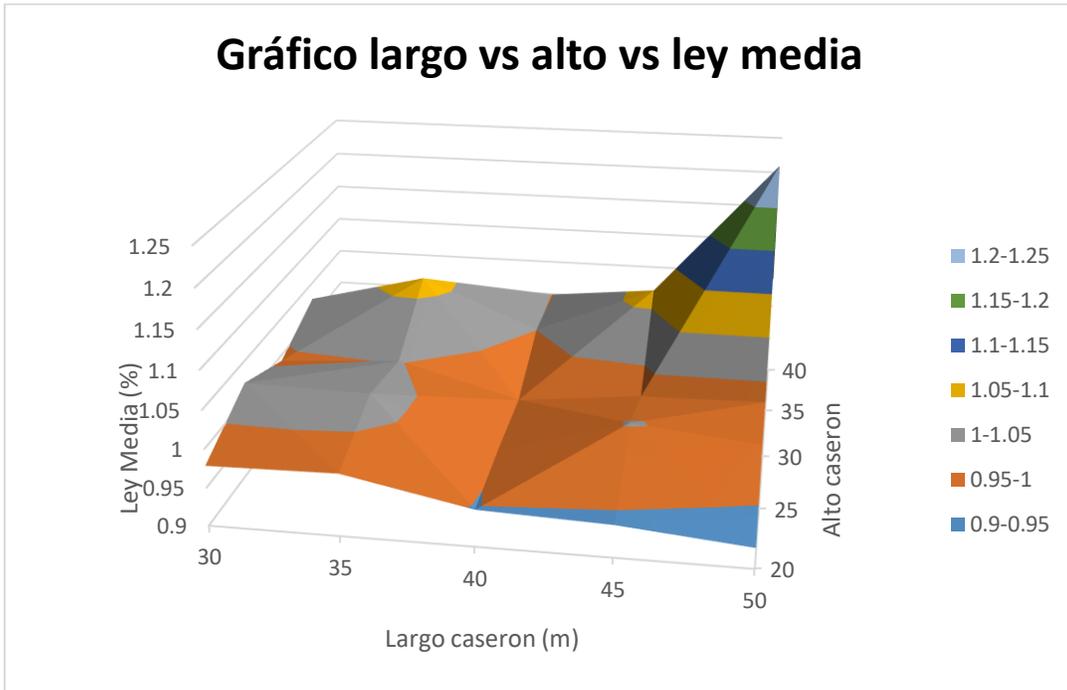


Figura 8. 12 Gráfico largo vs alto vs ley media, ancho 22 metros

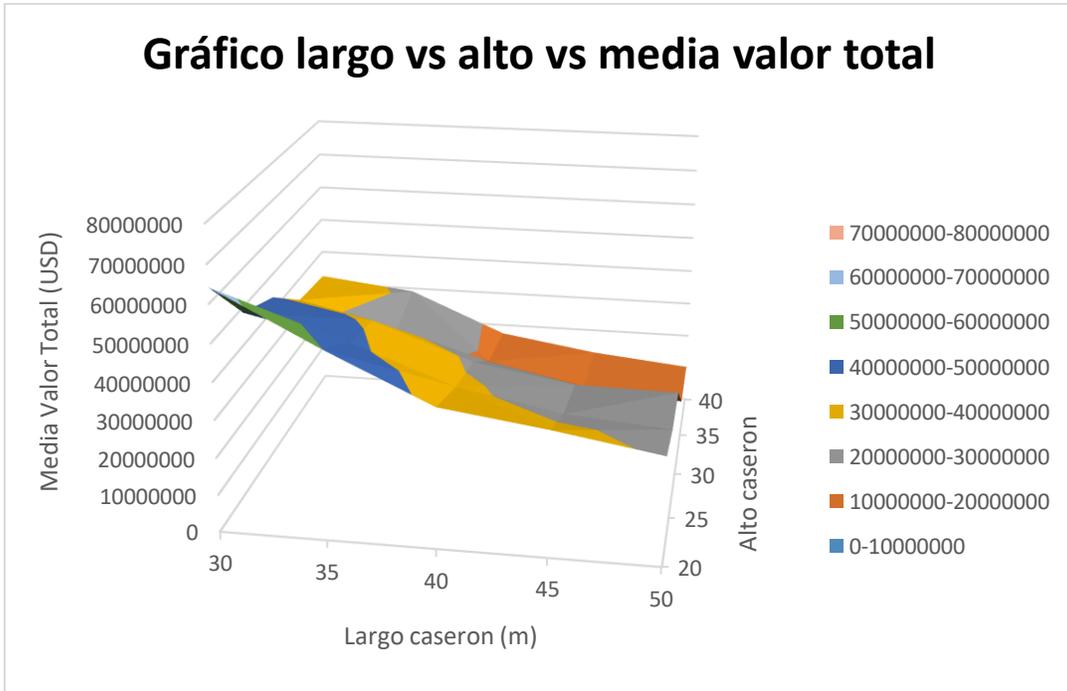


Figura 8. 13 Gráfico largo vs alto vs valor total, ancho 18 metros

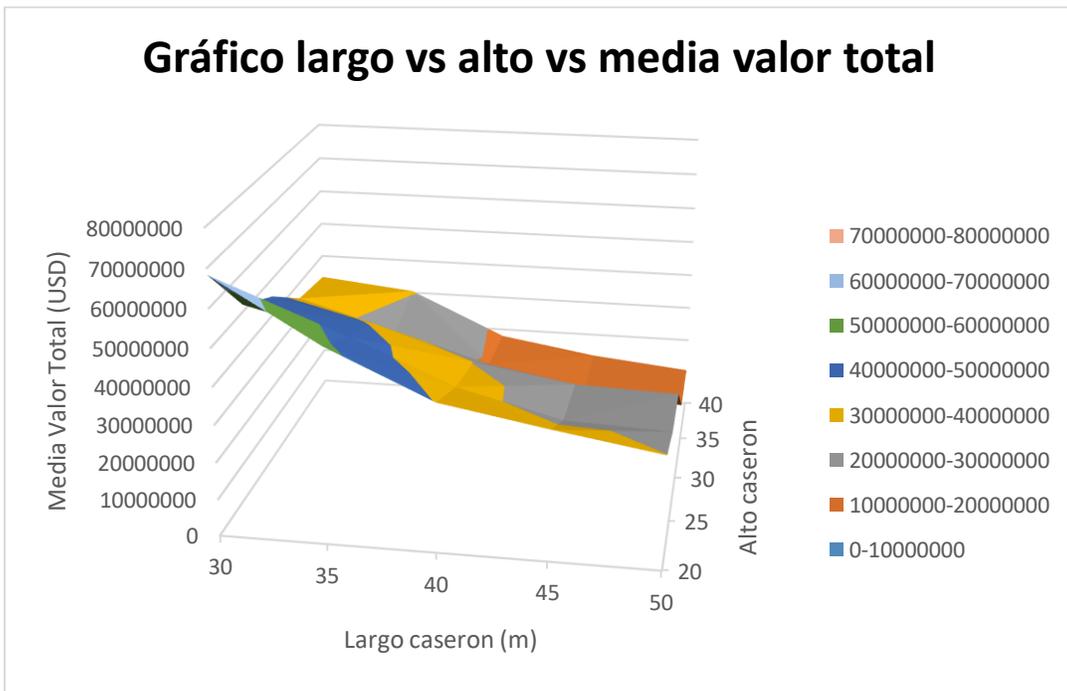


Figura 8. 14 Gráfico largo vs alto vs valor total, ancho 20 metros

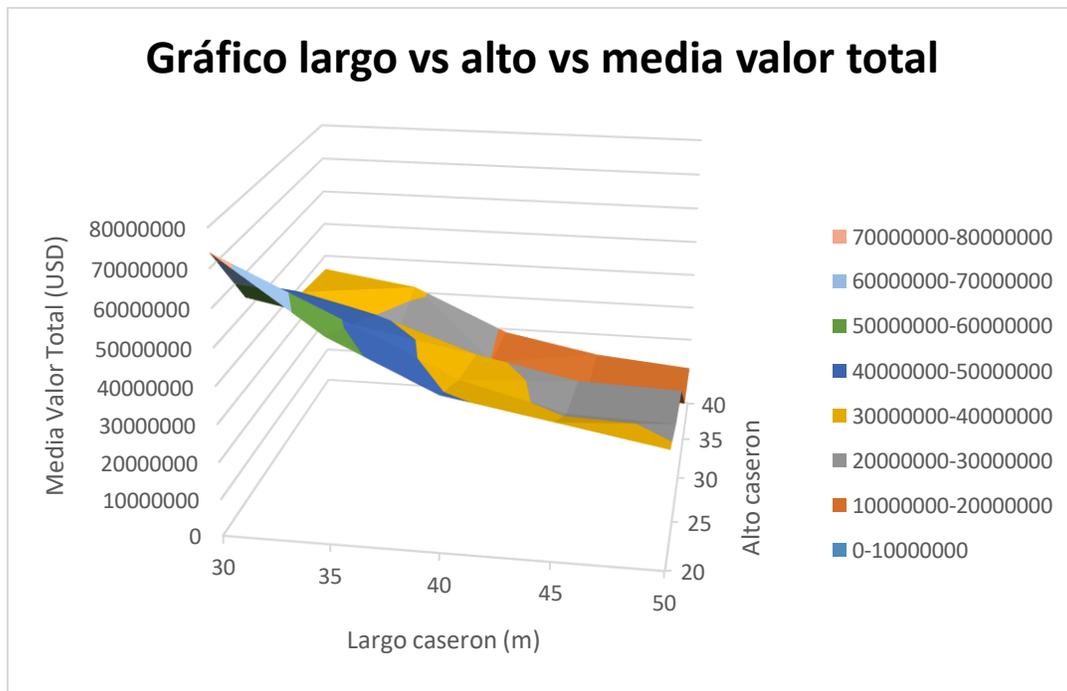


Figura 8. 15 Gráfico largo vs alto vs valor total, ancho 22 metros