



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS

INCLUSIÓN DE INTERFERENCIAS OPERACIONALES DE ORIGEN GEOTÉCNICO EN PLANIFICACIÓN MINERA DE PANEL CAVING

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN MINERÍA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

CARLO HUMBERTO LOBIANO CORREA

PROFESOR GUÍA:

JAVIER VALLEJOS MASSA

PROFESOR CO-GUÍA:

NELSON MORALES VARELA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

JAVIER CORNEJO GONZÁLEZ

MARCELO VARGAS VERGARA

SANTIAGO DE CHILE

MAYO 2016

RESUMEN

El proceso de planificación minera es un etapa clave con miras a la obtención del mejor valor del negocio, no obstante, existen ciertas incertezas en el proceso asociadas a interferencias de distinta naturaleza. En este trabajo se busca desarrollar una metodología que permita incorporar en forma dinámica interferencias del tipo operacional con origen geotécnico. Es común observar en etapas previas de ingeniería que dichas interferencias sean consideradas y cuantificadas con el objetivo de establecer su impacto en el proyecto.

La Mina El Teniente de CODELCO, cuya producción representa aproximadamente el 8% del cobre fino a nivel nacional, se encuentra constantemente en crecimiento desarrollando la ingeniería de cada uno de los nuevos sectores productivos e identificando los riesgos críticos a la materialización del proyecto como lo es la existencia de estallidos de rocas producto de la geotecnia y profundidad donde se desarrolle el nuevo proyecto.

El siguiente trabajo propone una metodología para incorporar la probabilidad de ocurrencia de un evento sísmico de magnitud determinada en base a variables geotécnicas, mineras y operacionales. La metodología se compone principalmente por dos modelos; El primero busca estimar el peligro sísmico en base a características geotécnicas y operacionales, el cual fue definido en el informe Peligro Sísmico para el Plan Exploratorio (PSPEX) [1]. El segundo es un modelo de optimización que alimenta el software de planificación minera Universal Delphos Sequencer and Scheduler (UDESS) [2]. Integrando ambos modelos mediante bloques de iteración y evaluación secuencial de los resultados, se genera un plan de producción e incorporación de área que permita establecer la mínima probabilidad de peligro sísmico inherente al cumplimiento del plan definido para las zonas de análisis.

Se definen tres casos en los cuales se busca controlar el peligro sísmico en un caso “pasado” o PSPEX; replicando la extracción e incorporación por periodos, uno “presente” o PND; el cual permite producir o incorporar sin replicar temporalidad y finalmente uno “futuro”; que permita estudiar el impacto de cada una de las variables geotécnicas involucradas. Se generaron planes de producción acordes a lineamiento de planificación entregados por la División El Teniente. En todos y cada uno de estos casos, se logró disminuir la probabilidad de peligro sísmico por zona, en algunos de ellos cumpliendo el Peligro Sísmico Límite (PS_Límite) establecido y en otros casos su disminución considerable debido a las restricciones exigidas para el cumplimiento del plan no lo permitían. Se desprende una evaluación del valor presente neto por iteración asociada a la variación de la probabilidad, lo cual puede definir criterios evaluación al momento determinar el valor del proyecto afecto a riesgo.

La metodología logra incorporar el peligro sísmico para una zona de análisis dados sus parámetros geotécnicos y operacionales en forma dinámica. Dada su flexibilidad, es posible que fueran incorporadas otras interferencias operacionales definidas por modelos cuyas variables puedan ser controladas en el modelo de optimización, como el propuesto en este trabajo de tesis.

Se recomienda continuar con la profundización del modelo de Peligro Sísmico, el cual permita una calibración automática y/o extrapolación de este, para su aplicación en otros sectores o minas. De este modo podría ser considerado el Peligro Sísmico en forma dinámica en el desarrollo de la Planificación Minera de nuevos sectores productivos.

*“La gota de agua rompe la piedra, no
por su fuerza sino por su constancia”
(Ovidio)*

AGRADECIMIENTOS

La vida me ha demostrado que la familia es el regalo más grande que tendremos nunca y agradezco cada segundo que he compartido y amado a todos los que he considerado mi familia.

Agradecer a mi Padre, Carlos Nagib Lobiano Yaber y mi Madre Ada María Soledad Correa Márquez. Sin el apoyo, sabiduría y rigor con el que me educaron nada de esto habría sucedido. A mis Hermanos Soledad y Juan Pablo, son infinitos los momentos compartidos sin ustedes la vida habría sido muy distintas, gracias por permitirme equivocarme y aprender juntos. A mis tíos Jorge Lobiano y Paula Barria, por el apoyo brindado y haber abierto su casa y formar parte de su familia por uno años. A los Lobiano, Campillay y Barria, Gracias a todos.

Agradecer a Andrea Soto De La Plaza, mi compañera de vida, amiga y amante incondicional, por su tolerancia, comprensión e infinito amor durante este último periodo, espero sigamos recorriendo juntos este camino que ya hemos comenzado.

A mis amigos de la vida, Pablo Rodríguez, José Ferrer, Roberto Chadid y Lucas Hourton por vuestra incondicional amistad, conversaciones de madrugada e infinitas historias vividas a lo largo de estos años.

A mis amigos y compañeros de la Universidad y Carrera; Gonzalo Pizarro, Pablo Tello, Mauricio Garrido, Francisco Miranda, Cristian Ramos, María José Benario, Diego Araya, Giovanni Pamparana, Cristian Reyes, Nicolás Guarda, Julio Ossandon, Christian Silva, Felipe Robles, Isaac Navia, Javier Iriarte, José Zolezzi, Ignacio Moscoso.

A mis compañeros del Laboratorio en la oficina 201, por el recibimiento, apoyo y amenizar el día a día de nuestros trabajos. En particular a Cristian Gary y Rodrigo Estay, por los conocimientos entregados en el inicio y a lo largo de mi trabajo.

A mis compañeros del Laboratorio Delphos, por la camaradería y trabajo en equipo, disfrute cada una de las reuniones, viajes y salidas que compartimos. En particular a Consuelo Moreno, Gonzalo Nelis, Enrique Jelvez, Gerson Morales, Héctor Toro y Emilio Vargas por gratas discusiones de minería, optimización y dudas de mi trabajo. Espero volver a trabajar con ustedes algún día.

Al Profesor Javier Vallejos, por darme la gran oportunidad de desarrollar mi magister en el Centro Avanzado de Tecnología en Minería, por el rigor y conocimientos entregados en cada uno de los trabajos y revisiones realizadas.

Al Profesor Nelson Morales, por recibir nuestra propuesta de trabajo y apoyarnos en la implementación junto a su equipo. Gracias por recibirme en su equipo y hacerme participe de cada una de las actividades del laboratorio, estas siempre me dieron impulso para poner más empeño y lograr las metas establecidas.

A Javier Cornejo, por tu cercanía, apoyo y motivación a lo largo de mi trabajo, por no dar por terminado el trabajo hasta haber obtenido lo suficiente, muchas gracias. Agradezco

cada uno tus consejos en la vida y laboral en esta nueva etapa que emprendo como colegas.

A Marcelo Vargas, por el tiempo y disposición a formar parte de la comisión evaluadora de este trabajo

A destacados profesionales de la industria minera por su confianza puesta en mí y darme la oportunidad de tener un acercamiento a la vida profesional; Rene Le-Feaux, Rodrigo Montaña, José Luis Campillay, Ernesto Arancibia y Jorge Baraqui.

A docentes de la escuela de ingeniería que con su entusiasmo por la docencia y pasión en su área de especialización marcaron mi paso por la universidad; Andrea Rodríguez; Fernando Ordoñez, Víctor Bucarey; Carlos Duarte, Julián Ortiz y Gonzalo Montes

A diablos de ingeniería, por recibirme en el club y formar parte de este durante los primeros años de mi formación; Cristian López, Diego Olivares, Carlos Hölck, Pablo Olivares, Juan Ramos, Tomas Gómez

Al Centro Avanzado de Tecnología en Minería (AMTC) por financiar parcialmente mi trabajo de tesis.

Al Departamento de Minería de la Universidad de Chile por financiar parcialmente mi trabajo de tesis. A sus trabajadores; Juanita, Nicole, Barbara, Luchito y Carlos

Tabla de contenido

CAPITULO 1	Introducción.....	1
1.1	Introducción.....	1
1.2	Motivación	2
1.2.1	Objetivo General.....	5
1.2.2	Objetivos Específicos	5
1.3	Alcances.....	6
1.3.1	Modelo de Peligro Sísmico:	6
1.3.2	Modelo de Planificación:.....	6
1.4	Metodología	6
CAPITULO 2	Antecedentes	8
2.1	Minería Subterránea.....	8
2.1.1	Método Panel Caving	9
2.1.2	Variantede hundimiento del Método Panel Caving	12
2.2	Riesgos en minería	15
2.3	Interferencias Operacionales de origen Geotécnico	18
2.4	Planificación	22
2.4.1	Planificación en Minería Subterránea en Métodos Block/Panel Caving	24
2.5	Investigación de Operaciones	27
2.5.1	Investigación de operaciones en minería	28
2.5.2	Investigación de operaciones en minería subterránea	29
2.6	Inclusión de Interferencias Operacionales de Origen Geotécnico en Minería Subterránea	32
2.7	Resumen y Conclusiones revisión bibliográfica	34

CAPITULO 3	Modelos.....	35
3.1	Modelo de Peligro Sísmico.....	35
3.1.1	Alcances	35
3.1.2	Definición de variables.....	36
3.1.3	Generalidades	37
3.2	Modelo de planificación – UDESS	37
3.2.1	Estructura del Software	38
3.2.2	Base resolutive	40
3.2.3	Casos de utilización de UDESS.....	41
3.2.4	Plataforma del Software	42
3.3	Conclusiones Modelos	47
CAPITULO 4	Metodología	48
4.1	Obtención base de datos	49
4.1.1	Modelo de recursos	49
4.1.2	Parámetros geomecánicos:	50
4.1.3	Parámetros operativos.....	50
4.1.4	Parámetros técnico- económicos	51
4.1.5	Adquisición de datos.....	51
4.2	Planteamiento del problema de optimización.....	52
4.2.1	Definición de actividades	52
4.2.2	Definición de restricciones de precedencias.....	54
4.2.3	Definición de restricciones globales.....	54
4.2.4	Resolución.....	55
4.3	Evaluación Peligro Sísmico e Iteraciones	55
4.3.1	Peligro Sísmico.....	56

4.3.2	Condición de iteración	57
4.3.3	Modelo de ajuste	57
CAPITULO 5 Estudio de casos.....		59
5.1	Mina RENO	59
5.1.1	Criterios de Planificación	62
5.2	Consideraciones generales.....	62
5.2.1	Definición de Zonas	62
5.2.2	Puntos contenidos en Zonas	64
5.2.3	Altura Equivalente.....	64
5.2.4	Estimación P10.....	65
5.2.5	Condición Inicial.....	66
5.2.6	Parámetros Económicos.....	66
5.3	Caso A: “PSPEX”	67
5.3.1	Antecedentes del problema	67
5.3.2	Variables y restricciones del Problema.....	70
5.4	Caso B: “PND 2014-2018”	71
5.4.1	Antecedentes del problema	72
5.4.2	Variables y restricciones del Problema.....	74
5.5	Caso C: “MB_RENO”	76
5.5.1	Antecedentes del problema	76
5.5.2	Variables y restricciones del Problema.....	78
5.5.3	Distintas Alturas.....	79
5.5.4	Distinto P10	79
5.6	Conclusiones casos de estudio.....	80

CAPITULO 6	Resultados y análisis	81
6.1	Caso A - PSPEX	81
6.1.1	Caso A1: “PSPEX 2009-2013”	81
6.1.2	Caso A2: “PSPEX 2006-2013”	86
6.1.3	Conclusiones Caso A -PSPEX	89
6.2	Caso B – PND	89
6.2.1	PND 2014-2018	89
6.2.2	Conclusiones Caso B- PND	94
6.3	Caso C - MB RENO	95
6.3.1	Distintas Alturas	95
6.3.2	Distinto P10	99
6.3.3	Conclusiones mb_reno	102
CAPITULO 7	Conclusiones y Recomendaciones	104
7.1	Interferencias Operacionales	104
7.2	Metodología	104
7.3	Casos de estudio	105
7.4	Resultados y análisis	106
7.4.1	Caso A o PSPEX:	106
7.4.2	Caso B o PND 2014-2018:	107
7.4.3	Caso C o MB_RENO	107
7.4.4	Generales a la resolución	108
7.5	Trabajos futuros	109
CAPITULO 8	Bibliografía	110

CAPITULO 9	Anexos	113
9.1	Script python	113
9.2	Información de casos	115
9.2.1	CASO A: PSPEX 2006-2013	115
9.2.2	CASO A: PSPEX 2009-2013	117
9.2.3	CASO B: PND 2014-2018	119
9.2.4	CASO C: MB_RENO	121
9.3	Tiempos de resolución	125
9.3.1	Caso A PSPEX 2009-2013	125
9.3.2	Caso A PSPEX 2006-2013	128
9.3.3	Caso B PND 2014-2018	128

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1:	Parámetros productivos iniciales a partir del plan PND 2014-2018 SP-DET....	66
Tabla 2:	Parámetros Económicos Casos A, B y C	67
Tabla 3:	Ancho del frente de incorporación en metros por zona y año - Caso A.....	69
Tabla 4:	Parámetros Técnicos Caso A	70
Tabla 5:	Parámetros de Planificación Caso A	70
Tabla 6:	Parámetros Técnicos Caso A.....	70
Tabla 7:	Parámetros de Planificación Caso A	71
Tabla 8:	Ancho de frente de incorporación por zona Caso B	74
Tabla 9:	Parámetros Técnicos Caso A.....	74
Tabla 10:	Parámetros de Planificación Caso A	75
Tabla 11:	Anchos promedio frente de incorporación por zona	78
Tabla 12:	Parámetros Técnicos Caso C.....	78
Tabla 13:	Parámetros de Planificación Caso C	78

Tabla 14: Asignación de alturas por zona	79
Tabla 15: Asignación de P10 por zona.....	79
Tabla 16: Velocidad de extracción media por zona –PND 2014-2018	94

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Estallidos de Roca vs producción 1982 a 2013, División El Teniente, CODELCO.....	3
Ilustración 2: Clasificación Vulnerabilidad / Peligro para Vulnerabilidades Geomecánicas sector Reno	4
Ilustración 3: Representación de la clasificación en nivel de producción del Sector Reno	4
Ilustración 4: Comportamiento de los esfuerzos en distintas zonas según los frentes del método Panel Caving	12
Ilustración 5: Variante del Método Panel Caving Hundimiento Convencional	13
Ilustración 6: Variante del Método Panel Caving Hundimiento Convencional - Vista Isométrica.....	13
Ilustración 7: Variante del Método Panel Caving Hundimiento Previo.....	14
Ilustración 8: Variante del Método Panel Caving Hundimiento previo - Vista Isométrica.....	14
Ilustración 9: Variante del Método Panel Caving Hundimiento Avanzado	15
Ilustración 10: Variante del Método Panel Caving Hundimiento Avanzado - Vista Isométrica.....	15
Ilustración 11: Clasificación de Riesgos en Minería [5]	16
Ilustración 12: Costo de incidente v/s Probabilidad de ocurrencia [11]	17
Ilustración 13: Distribución de tiempos Índices Operacionales ASARCO	18
Ilustración 14: Sección de Nivel de Producción afectado por estallido de roca [17].....	21
Ilustración 15: Energía liberada v/s Estallidos de roca [18]	22
Ilustración 16: Representación gráfica restricciones de precedencia tipo "O" [34].....	39
Ilustración 17: Curvas resolución Gurobi y GAP [38]	40
Ilustración 18: Representación metodología Heurística de Ventanas	41
Ilustración 19: Selección de archivo actividades - UDESS.....	43
Ilustración 20: Selección de atributos por columna - UDESS.....	43

Ilustración 21: Definición de tamaño de periodo en base mensual - UDESS	44
Ilustración 22: Seleccionar o cargar archivo de precedencias entre actividades- UDESS	44
Ilustración 23: Creación de las distintas restricciones pre definidas.....	45
Ilustración 24: Seleccionar modelo de resolución - UDESS.....	45
Ilustración 25: Visualización de resultados en porcentaje por y periodo - UDESS.....	46
Ilustración 26: Metodología Incorporación del Peligro Sísmico a la Planificación Minera	48
Ilustración 27: Ejemplo adquisición de datos	51
Ilustración 28: Mapa geológico del Yacimiento El Teniente	60
Ilustración 29: Vista en planta superpuesta a una misma cota de los sectores productivos de la Mina El Teniente.....	60
Ilustración 30: Vista en planta de los subsectores que conforman la mina RENO	61
Ilustración 31: (a) se identifican las cinco zonas de análisis para la mina RENO [1]; (b) Se identifica la superposición de las zonas definidas por el GMT versus aquellas definidas por SGM-DET.....	63
Ilustración 32: Vista en planta de la delimitación zonas utilizadas (a) 5 Zonas; (b) 14 Zonas	64
Ilustración 33: Vistas en planta e isométricas de la representación del procedimiento para calcular la distancia entre un punto de extracción y superficie.....	65
Ilustración 34: Puntos disponibles a incorporar PSPEX	68
Ilustración 35: Gráfico de puntos de extracción incorporados por año en el caso PSPEX	69
Ilustración 36: Puntos a incorporar Caso B	73
Ilustración 37: Puntos a incorporar por zona Caso B	73
Ilustración 38: Puntos a incorporar por zona Caso B	77
Ilustración 39: Puntos a incorporar por zona Caso C	77
Ilustración 40: Gráfico probabilidad promedio por sector Caso A1-PSPEX 2009-2013 .	82
Ilustración 41: Zonas de mayor probabilidad Caso A1 -PSPEX 2009-2013.....	83
Ilustración 42: Gráfico Plan de Incorporación PSPEX 2009-2013.....	84
Ilustración 43: Gráfico Plan de Producción PSPEX 2009-2013	84

Ilustración 44: Gráfico VPN-Probabilidad Peligro Sísmico Promedio PSPEX 2009-2013	85
Ilustración 45: Gráfico probabilidad promedio por sector Caso A2-PSPEX 2006-2013	86
Ilustración 46: Gráfico Plan de Incorporación PSPEX 2006-2013.....	87
Ilustración 47: Gráfico Plan de Producción PSPEX 2006-2013	88
Ilustración 48: Gráfico probabilidad promedio por zona PND 2014-2018.....	90
Ilustración 49: Gráfico Plan de Incorporación PND 2014-2018	91
Ilustración 50: Gráfico Plan de Producción PND 2014-2018.....	92
Ilustración 51: Gráfico VPN-Probabilidad Peligro Sísmico Promedio PND 2014-2018 ..	93
Ilustración 52: Gráfico probabilidad promedio por zona variación de alturas con FH.....	96
Ilustración 53: Gráfico probabilidad promedio por zona variación de alturas sin FH	97
Ilustración 54: Gráfico tendencias globales en casos de variación de altura con y sin FH	98
Ilustración 55: Gráfico probabilidad promedio por zona variación de P10 con FH	99
Ilustración 56: Gráfico probabilidad promedio por zona, variación de P10 sin FH	100
Ilustración 57: Gráfico tendencias globales en casos de variación de altura con y sin FH	102

CAPITULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

La industria minera ha sido un importante aporte a la economía de nuestro país en los últimos años, sin embargo pocos conocen la complejidad y diversidad de las disciplinas que confluyen en esta industria, como primera aproximación, es preciso mencionar que la forma en que nuestros recursos mineros han sido explotados se ha llevado a cabo a través de métodos superficiales y subterráneos, predominando aún en la actualidad el primero, no obstante atendida la calidad no renovable de los minerales se prevé que a futuro y dada la profundidad donde se encontrarán los depósitos, la extracción subterránea cobrará cada vez mayor relevancia.

Dicho lo anterior, las investigaciones recientes se han orientado a la resolución de problemáticas relacionadas al complejo desafío que constituye la extracción de mineral a profundidades cada vez mayores. Existen en la actualidad diversos métodos de explotación subterránea, sin embargo aquellos que han adquirido mayor relevancia son los métodos por hundimiento masivo o Caving, dentro de los cuales podemos encontrar diferentes variantes con ciertos matices, como lo son el Block, Sublevel y Panel Caving, este último considerado como el más idóneo para yacimientos a grandes profundidades con roca competente, en particular mineral primario.

El Método Panel Caving, sobre el cual se centrará el presente estudio, es un método de explotación subterránea por hundimiento masivo que utiliza la gravedad para fragmentar una porción del macizo rocoso inducida por una socavación basal de espesor relativamente bajo en comparación al de la columna a hundir. Esta fragmentación se propaga en dirección vertical principalmente generando una columna de material fragmentado, la cual es extraída continuamente desde puntos de extracción.

El diseño de un Método de Panel Caving debe considerar diversos parámetros desde características geotécnicas como la caracterización del macizo rocoso, hundibilidad, fragmentación, monitoreo de la fragmentación, pasando por el diseño de su

infraestructura determinando la posición óptima para los distintos niveles y distribución de las unidades de extracción, hasta la selección de métodos de socavación, equipos y por último la planificación de la preparación y extracción [3] .

Para que un proyecto minero tenga reales posibilidades de éxito y logre maximizar beneficios es preciso que conste de una certera planificación, esta etapa es fundamental dentro de los procesos que determinan el resultado del proceso de extracción del mineral. En esta se determina la secuencia de incorporación y extracción de las distintas unidades generando así un programa de producción cercano al óptimo [1].

El proceso de Planificación Minera en las últimas décadas ha sido objeto de estudio en diversos laboratorios, centros tecnológicos y universidades. Se han hecho extraordinarios avances en la optimización del beneficio esperado enfocados en la determinación de las unidades productivas, secuenciamiento, agendamiento y extracción de estas unidades [4].

No obstante existen distintas fuentes de interferencias operacionales como las condiciones geotécnicas, infraestructura, utilización de equipos, estimación de ley, control de tiraje, entre otras, que generan incertezas en el resultado esperado [5].

En el presente trabajo nos remitiremos específicamente a aquellas interferencias operacionales de origen geotécnico, en particular a la incorporación de un modelo de peligro sísmico al proceso de planificación minera, en búsqueda de contribuir al esclarecimiento de aquellas incertezas antes mencionadas.

1.2 MOTIVACIÓN

La Planificación Minera, en general busca maximizar el valor del negocio a través del valor presente neto (VPN) o bien maximizando las reservas del proyecto. Para lograr esto se deben incorporar el mayor número de variables con el objetivo de predecir el comportamiento de la operación y así representar de mejor manera el problema analizado. Debido a la gran cantidad de variables en juego es que, comúnmente el problema se desagrega en cada uno de los procesos que comprenden la planificación minera. A esta complejidad se suma la presencia de una gran cantidad de

variables con incertezas asociadas algunas como la geología, el precio e interferencias de distinta índole.

Estas interferencias en general, se materializan en la operación como retrasos en los plazos definidos para el desarrollo de las distintas actividades, pérdida de capacidad productiva e incluso se ve involucrada la pérdida de sectores productivos imposibilitando la extracción del mineral dimensionado en él.

Como fue introducido anteriormente, el siguiente trabajo busca generar una metodología que permita incorporar las interferencias operacionales de origen geotécnico presentes en el día a día en un método de Panel Caving. En particular busca incorporar las interferencias operacionales de origen geotécnico provocadas por peligro sísmico, proponiendo una incorporación dinámica al proceso de planificación minera. Este problema en la actualidad causa efectos considerables en la operación del método como muestra la siguiente gráfica en la que se registran los estallidos de roca en las distintas minas de la División El Teniente, CODELCO.

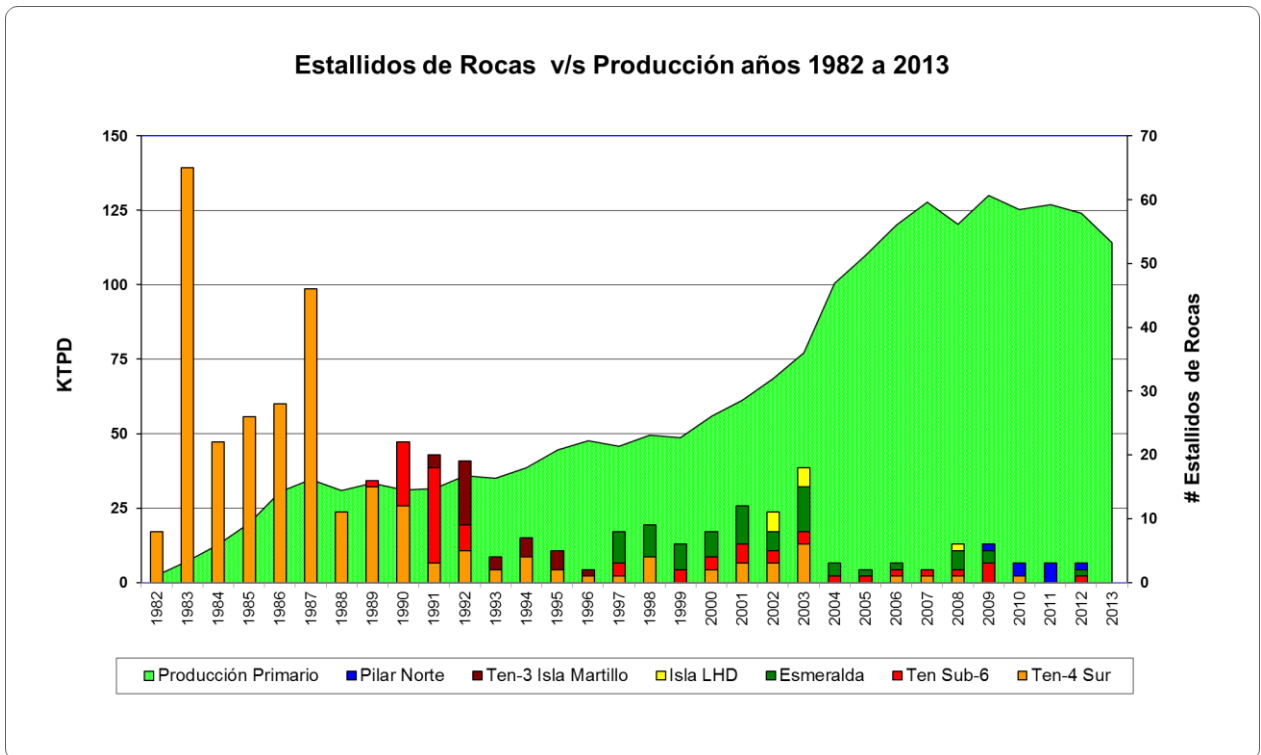


Ilustración 1: Estallidos de Roca vs producción 1982 a 2013, División El Teniente, CODELCO

Con el objetivo de minimizar eventos de estallidos en zonas productivas es que actualmente el peligro sísmico se considera mediante una metodología que incorpora la litología, las estructuras, zonas de transición, luz libre y el estado del macizo rocoso, para generar una clasificación de la vulnerabilidad de cada zona la cual caracteriza el nivel de producción y genera una recomendación para los criterios utilizados por planificadores al momento de generar la secuencia y agendamiento de la producción.

		Vulnerabilidad			
Peligro	1	2	3	4	
4	4**	8	12	16	
3	3	6	9	12	
2	2	4	6	8	
1	1	2	3	4**	

Ilustración 2: Clasificación Vulnerabilidad / Peligro para Vulnerabilidades Geomecánicas sector Reno

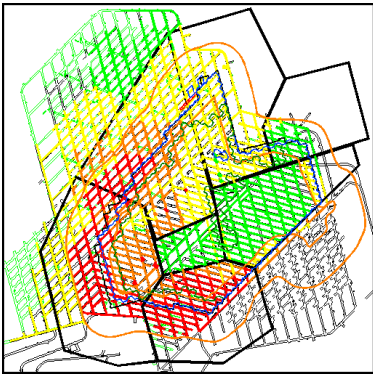


Ilustración 3: Representación de la clasificación en nivel de producción del Sector Reno

El siguiente trabajo, sin embargo busca integrar en forma dinámica y directa las interferencias operacionales de origen geotécnico a la Planificación Minera, en particular el peligro sísmico promoviendo así la validación y generación de un plan de producción que considere estos factores. Es de especial consideración la profundización del entendimiento e incorporación de esta incertidumbre. El Peligro Sísmico en innumerables ocasiones ha sido considerado como parte de los factores críticos de éxito de un proyecto, considerado como factor de riesgo geomecánico; en específico se considera el riesgo de estallidos de roca y sismicidad en proyectos y operaciones actuales de la División El Teniente.

Este trabajo tiene su origen en las recomendaciones y acciones futuras sugeridas en el trabajo realizado por la consultora GMT [1] en el cual se presenta un modelo que permite estimar la probabilidad de ocurrencia de un evento sísmico con una determinada magnitud considerando variables geotécnicas, operacionales y mineras. El cual sentará las bases y criterios al momento de generar y evaluar los planes de producción generados.

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

El objetivo principal de este trabajo de tesis es generar una metodología para incluir interferencias de origen geotécnico en la Planificación Minera de Panel Caving en forma dinámica.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

En el marco del objetivo principal se deben cumplir los siguientes objetivos específicos:

- Integrar el Modelo de Peligro Sísmico al Modelo de Optimización incorporado al software de Planificación Minera.
- Desarrollar y/o adaptar los parámetros del software de Planificación Minera para que describa en forma realista la operación del Método Panel Caving.
- Desarrollar un Modelo Iterativo que permita gestionar el riesgo de Peligro Sísmico.
- Desarrollar una metodología que permita integrar los distintos modelos utilizados.
- Evaluar la apertura de área según el Modelo de Peligro Sísmico
- Evaluar la Velocidad de Extracción media según el Modelo de Peligro Sísmico.
- Determinar un programa de producción que cumpla con las restricciones de producción, apertura de área y riesgo sísmico.
- Determina el impacto en el Valor Presente Neto debido al control de la probabilidad de peligro sísmico

1.3 ALCANCES

Los alcances del trabajo se restringen a las condiciones particulares de cada uno de los modelos utilizados, en particular:

1.3.1 MODELO DE PELIGRO SÍSMICO:

- Asume condición de régimen del Caving y una unidad básica de explotación de minería de Panel Caving aislada.
- Se define el Peligro Sísmico como la probabilidad que ocurra un evento de magnitud de momento $M_w = 1.5$
- El modelo plantea un modelo estadístico utilizando una base de datos empíricas[1]
- Para el análisis se considera una base de datos del Sector RENO entre los años 2000-2013 de la mina El Teniente propiedad de CODELCO.

1.3.2 MODELO DE PLANIFICACIÓN:

- No se desarrollan nuevos modelos de optimización, se adapta la definición de atributos y restricciones al problema abordado.
- La dimensión del modelo de resolución dependerá exclusivamente de la capacidad de resolución de los algoritmos hoy existentes.
- La precisión del modelo dependerá de la magnitud de error aceptada considerando tiempos razonables de resolución.
- Los resultados obtenidos dependerán de las variables y parámetros incorporados exclusivamente en el modelo y no otros.
- No se considerarán otro tipo de fuentes de variabilidad
- El horizonte de planificación considerará periodos de cinco años o quinquenales considerando como subdivisión o unidad temporal de análisis trimestres.

1.4 METODOLOGÍA

A continuación se describe en forma acotada la metodología adoptada para la resolución del problema antes planteado.

1. Análisis del modelo de peligro sísmico e identificación de aquellas variables operacionales y su comportamiento.

2. Búsqueda un modelo de optimización que permita incorporar las variables controlables del modelo de peligro sísmico.
3. Estudiar la interacción de ambos modelos mediante un proceso secuencial e iterativo.
4. Determinar criterios o estrategias de iteración adecuada al problema.
5. Plantear casos de estudio en base a los datos de la mina RENO y los criterios de expertos, provistos por la División El Teniente, CODELCO.
6. Resolver, analizar y concluir sobre la aplicabilidad de la metodología adoptada en cada uno de los casos.
7. Conclusiones generales al trabajo y propuesta de trabajos futuros.

CAPITULO 2

ANTECEDENTES

El presente capítulo tiene como objetivo presentar los antecedentes principales de las distintas áreas estudiadas en las cuales se fundamenta el trabajo realizado. Las distintas temáticas se organizan a modo de facilitar la comprensión de la problemática y cómo interactúan las sub-disciplinas.

2.1 MINERÍA SUBTERRÁNEA

Minería, consiste en el proceso de extracción de mineral desde la tierra. Históricamente los depósitos han sido explotados en forma superficial o subterránea. La selección de una de estas dos opciones depende principalmente de:

- Tamaño, forma y profundidad del depósito
- Estructuras geológicas y condiciones geomecánicas
- Capacidad productiva
- Recuperación minera
- Condiciones de seguridad
- Impacto ambiental durante y después de las labores

Según la clasificación de la SME [3], luego de ser evaluadas estas características se decide por aquella alternativa que otorgue el mejor negocio, es decir, mayor rentabilidad y menor riesgo, en la materialización del proyecto.

Existen distintos métodos subterráneos y variantes de los mismos, por lo mismo existen distintos modos de clasificarlo. A continuación se presenta una clasificación general de los métodos subterráneos presentada por Hartman y Mutmanský [6]:

- No soportados o Soporte Natural:
 - Room and Pillar
 - Shrinkage Stopping
 - Sublevel Stopping

- Soportados o Soporte Artificial:
 - Cut-and-Fill Stopping
- Hundimiento Masivo (Caving):
 - Sublevel Caving
 - Block Caving
 - Panel Caving

2.1.1 MÉTODO PANEL CAVING

El método Panel Caving se define como un método subterráneo por hundimiento masivo. El principio fundamental de estos métodos recae en la extracción de un volumen basal o socavación, esta induce esfuerzos en el techo del volumen socavado, generando la ruptura inicial para luego producto de los esfuerzos y la gravedad propagar esta fragmentación hacia superficie como bien lo explica Brown [7].

Este método consiste en una socavación inicial que permite el inicio del hundimiento y posteriormente la incorporación constante de paneles aledaños a el área inicial, permitiendo aumentar el ritmo de producción. Dichos paneles están constituidos por unidades básicas de explotación denominadas puntos de extracción.

La operación de estos métodos, al ser de hundimiento masivo, han permitido una alta mecanización y bajo requerimientos de mano de obra, lo cual implica un bajo costo productivo.

Existen ciertas características que deben ser estudiadas para explotar un depósito con un método de esta naturaleza como bien los clasifica Nelson [3]:

A. Características geotécnicas

1. Caracterización del Macizo Rocoso
2. Hundibilidad: Capacidad del Macizo Rocoso de ser hundido.
3. Fragmentación:
 - In-situ: Determinado por las estructuras presentes en el Macizo
 - Primaria: Aquella inducida por la Socavación
 - Secundaria: Aquella inducida por contacto entre fragmentos al seguir un flujo gravitacional para ser extraídos

4. Monitoreo de la propagación de fragmentación
5. Sismicidad inducida: Aquella generada por la distribución de esfuerzo y liberación de energía potencial de deformación mediante grietas o quiebres.

B. Diseño de la mina

1. Nivel de Hundimiento: Aquel donde se genera la socavación
2. Nivel de Producción: Aquel donde se extrae el mineral fragmentado
3. Nivel de Ventilación: Aquel que permite el intercambio de aire con el exterior
4. Nivel de Transporte: Aquel que permite trasladar el mineral al exterior

C. Variantes de Hundimiento (Descripción Cavieres [8])

1. Convencional: Ambos niveles son construidos previos hundimiento
2. Previo: El nivel de producción se retrasa entre 30-45 [m] de la socavación en el nivel de hundimiento.
3. Avanzado: El nivel de producción se fortifica en forma definitiva dejando al menos 30 [m] del frente de socavación en el nivel de hundimiento.

D. Preparación minera:

Es aquella actividad que permite acceder al mineral, la cual no tiene fines económicos, sólo el de desarrollo de infraestructura necesaria para la operación.

E. Producción: Los parámetros que deben ser considerados en la construcción de un programa de producción son mencionados por Rubio [9]:

1. Tasa de incorporación de área: cantidad máxima de puntos que pueden ser abiertos en un periodo, basado en geometría o geomecánica.
2. Secuencia de construcción de puntos: determina el orden en el cual deben ser incorporados los puntos de extracción.
3. Área máxima en producción: área o número de puntos que pueden estar en producción simultáneamente según disponibilidad de infraestructura y equipos.
4. Velocidad de extracción: cantidad de tonelaje a extraer por punto acotado superiormente por características de fragmentación y propagación del quiebre e inferiormente por la compactación del mineral y flujo de aire repentinos.
5. Razón de tiraje: determina la relación entre la extracción de un punto con sus vecinos, esto con el objetivo de controlar la dilución del mineral definido.

6. Producción objetivo: define el tonelaje esperado a producir en determinado periodo.

7. Ventilación

8. Equipos

F. Control de Fragmentación

1. Control de ley de mena

2. Progreso de la fragmentación: propagación de la fragmentación iniciada posterior a la socavación hasta alcanzar o conectar con la superficie.

3. Control de tiraje: estrategias que rigen la extracción del mineral desde puntos de extracción y la interacción generada en puntos aledaños o vecinos.

G. Costo de Capital y de Operación

H. Riesgos

1. Air Blast/ Flujo de Barro/ Agua

2. Estallidos de Rocas/ Colapsos

Algunas de estas características serán explicadas con mayor profundidad a lo largo de este estudio al estar directamente relacionadas con el desarrollo del trabajo.

Resulta indispensable, comprender las real diferencias en cada una de las variantes del Método Panel Caving, debido a las distintas consecuencias que tiene cada uno de los métodos con su entorno, en particular el comportamiento de los esfuerzos, en las zonas de relajación, transición y pre-minería con respecto al avance de los frentes de extracción y socavación.

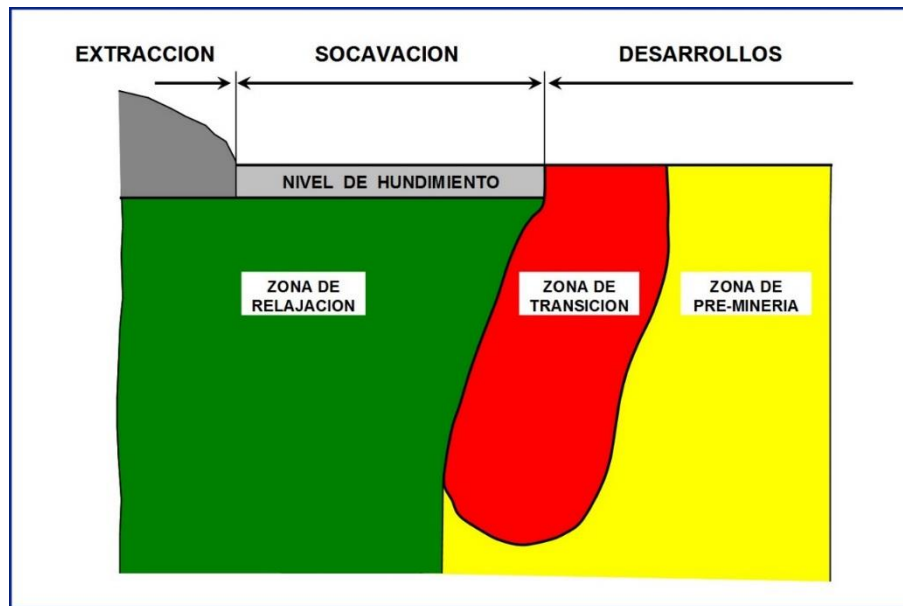


Ilustración 4: Comportamiento de los esfuerzos en distintas zonas según los frentes del método Panel Caving

De la ilustración podemos notar la delimitación de tres zonas:

- Zona de pre-minería: Aquella que se encuentra distante al avance de la minería
- Zona de transición (Abutment Stress): Aquella zona donde el estado tensional se encuentra aumentado y bajo continuos cambios, lo cual genera condiciones de esfuerzo considerablemente mayores a la condición in-situ.
- Zona de relajación: Aquella que por encontrarse bajo el frente de socavación y posterior a la zona de transición, presenta condiciones de esfuerzos menores.

Finalmente, se presenta gráficamente cada una de las variantes del método panel Caving en vistas tangencial e isométrica.

2.1.2 VARIANTE DE HUNDIMIENTO DEL MÉTODO PANEL CAVING

A continuación se presentan una serie de ilustraciones en las que pueden identificar las diferencias de las distintas variantes de hundimiento de este método:

2.1.2.1 HUNDIMIENTO CONVENCIONAL



Ilustración 5: Variante del Método Panel Caving Hundimiento Convencional

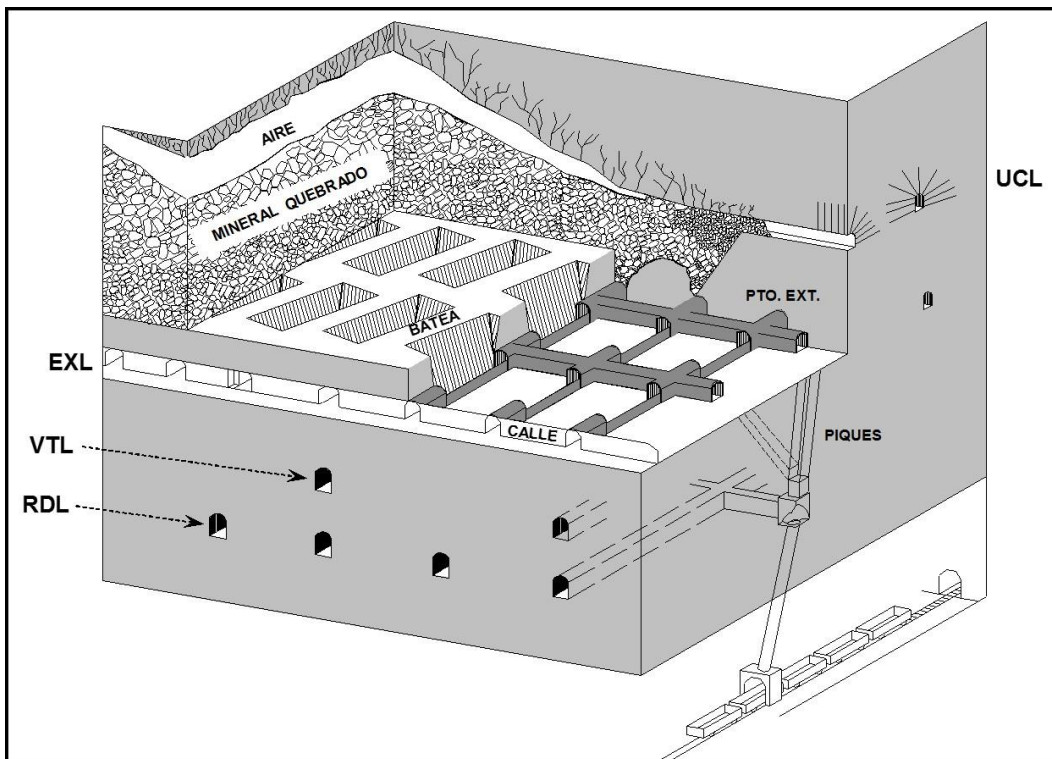


Ilustración 6: Variante del Método Panel Caving Hundimiento Convencional - Vista Isométrica

2.1.2.2 HUNDIMIENTO PREVIO

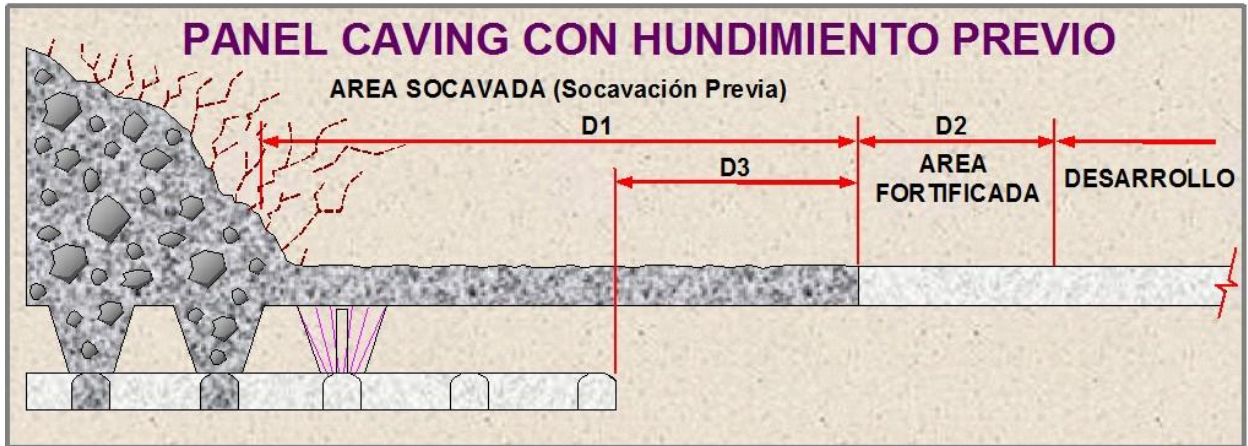


Ilustración 7: Variante del Método Panel Caving Hundimiento Previo

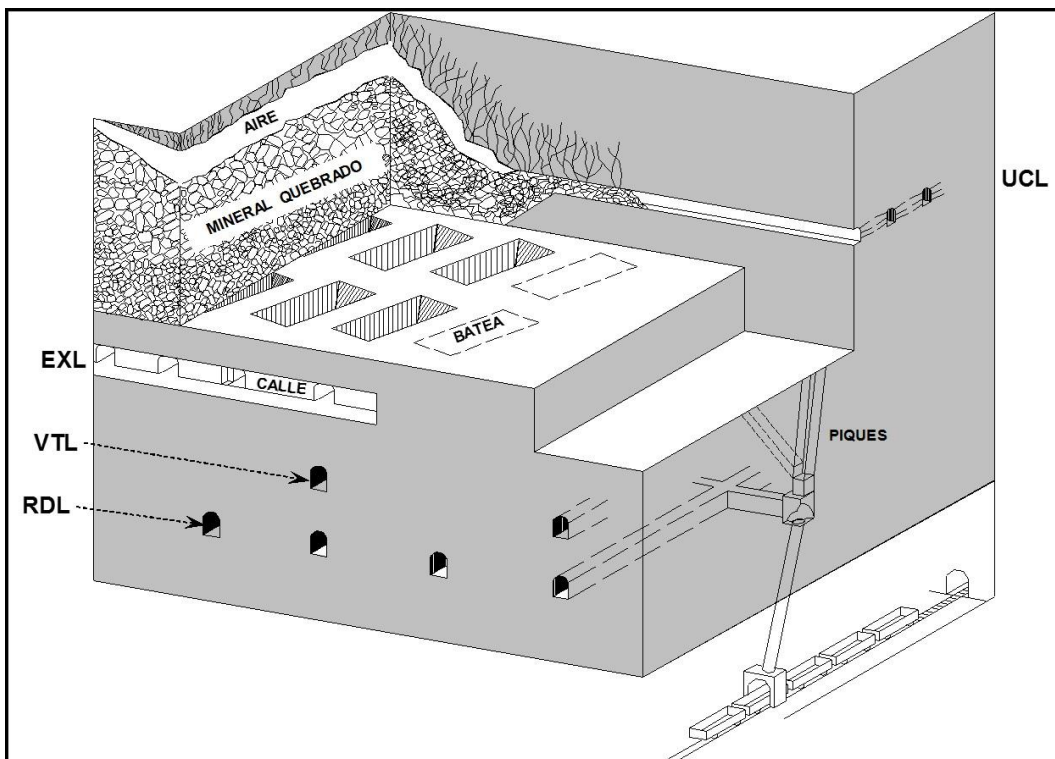


Ilustración 8: Variante del Método Panel Caving Hundimiento previo - Vista Isométrica

2.1.2.3 HUNDIMIENTO AVANZADO

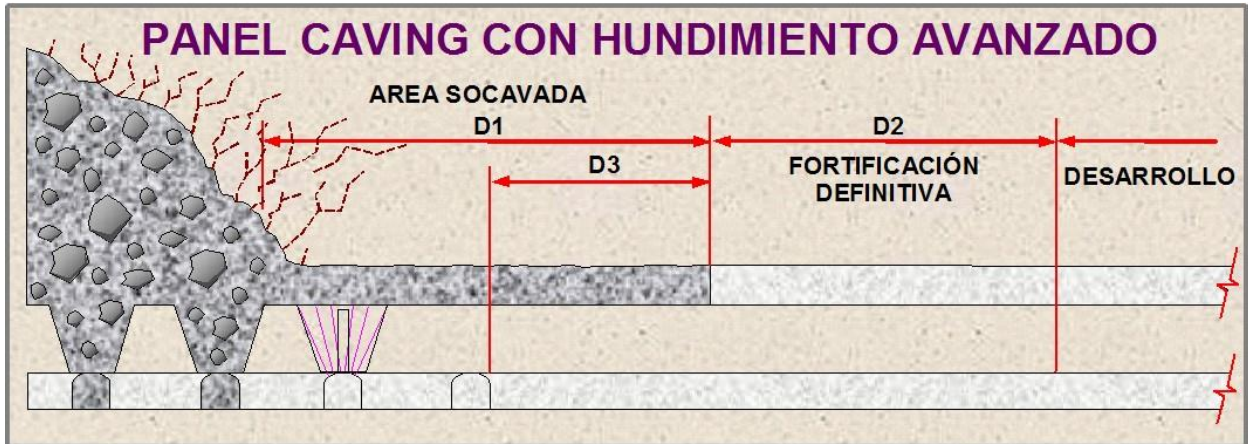


Ilustración 9: Variante del Método Panel Caving Hundimiento Avanzado

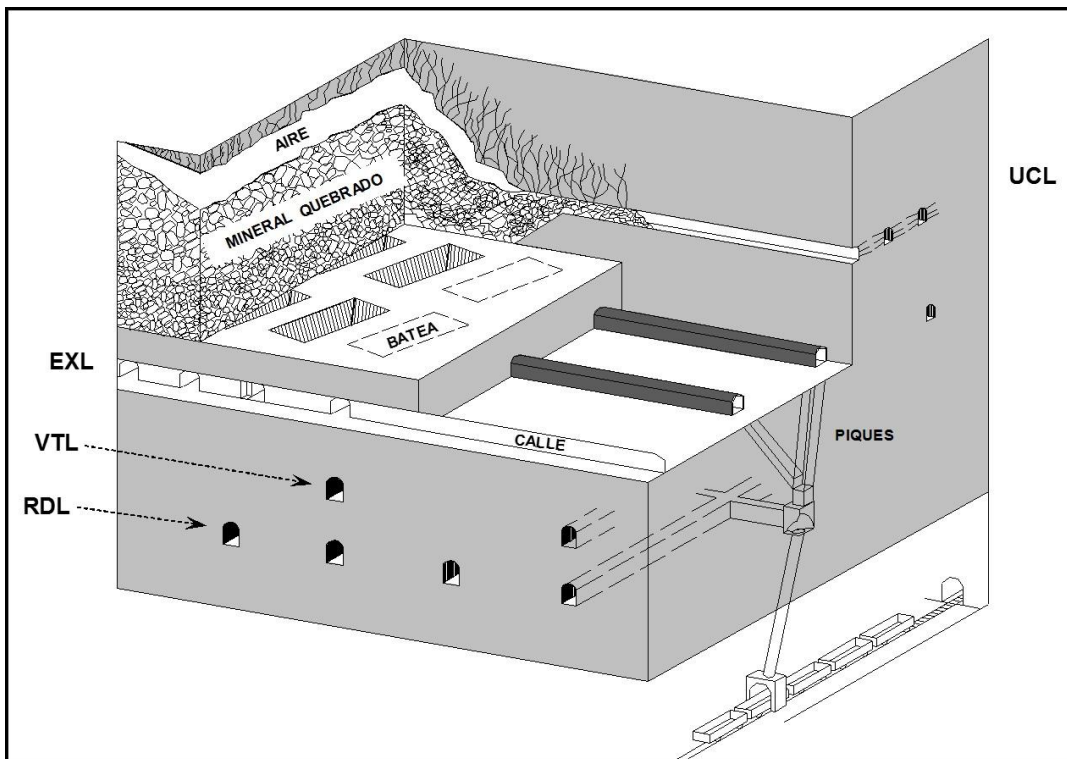


Ilustración 10: Variante del Método Panel Caving Hundimiento Avanzado - Vista Isométrica

2.2 RIESGOS EN MINERÍA

Los proyectos mineros que se explotan métodos masivos, en general, son intensivos en inversión y consideran horizontes de tiempo mayores a 10 años, por esto se deben considerar distintos escenarios, los cuales describen distintos niveles de riesgo según la

probabilidad de ocurrencia de determinadas condiciones como expone Bustamante et al [10].

Estos riesgos pueden ser clasificados como lo aborda Kazakidis [5], diferenciando entre “Externos” que son aquellos que forman parte del contexto político y económico del proyecto y aquellos “Internos” que abordan aspectos técnicos y operativos en el proyecto.

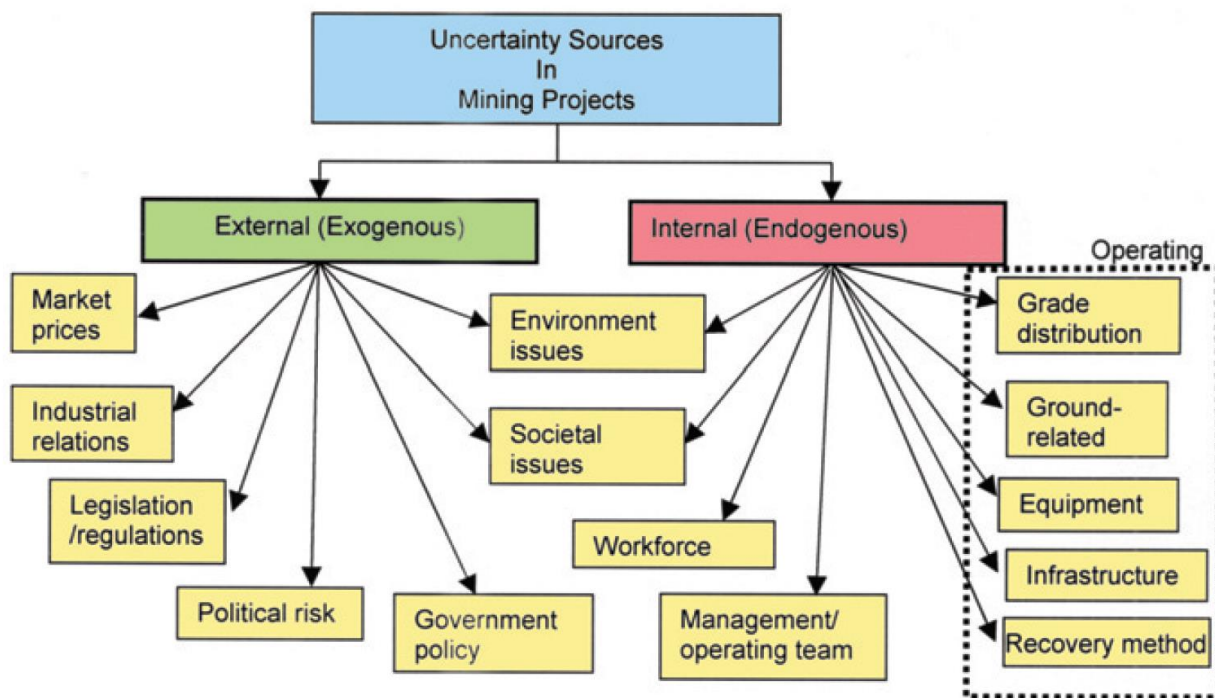


Ilustración 11: Clasificación de Riesgos en Minería [5]

De lo anterior se ponen en evidencia que los riesgos que deben ser considerados al evaluar un proyecto son múltiples, pero aquellas incertezas inherentes a la minería y la operación de un proyecto son la distribución de la ley, el control y estabilidad de suelo, confiabilidad y utilización de equipos, estabilidad de la infraestructura y la recuperación del método.

El riesgo de cada una las ramas de clasificación, se verá asociado a la probabilidad de ocurrencia del evento como también de las consecuencias que este tenga.

$$\text{Riesgo} = \text{Probabilidad de Ocurrencia} * \text{Consecuencias de Ocurrencia}$$

Las consecuencias que puede traer la ocurrencia de un evento depende exclusivamente de la naturaleza del fenómeno como declara Brummer [11] donde caracterizan los eventos por el costo del incidente y su probabilidad de ocurrencia.

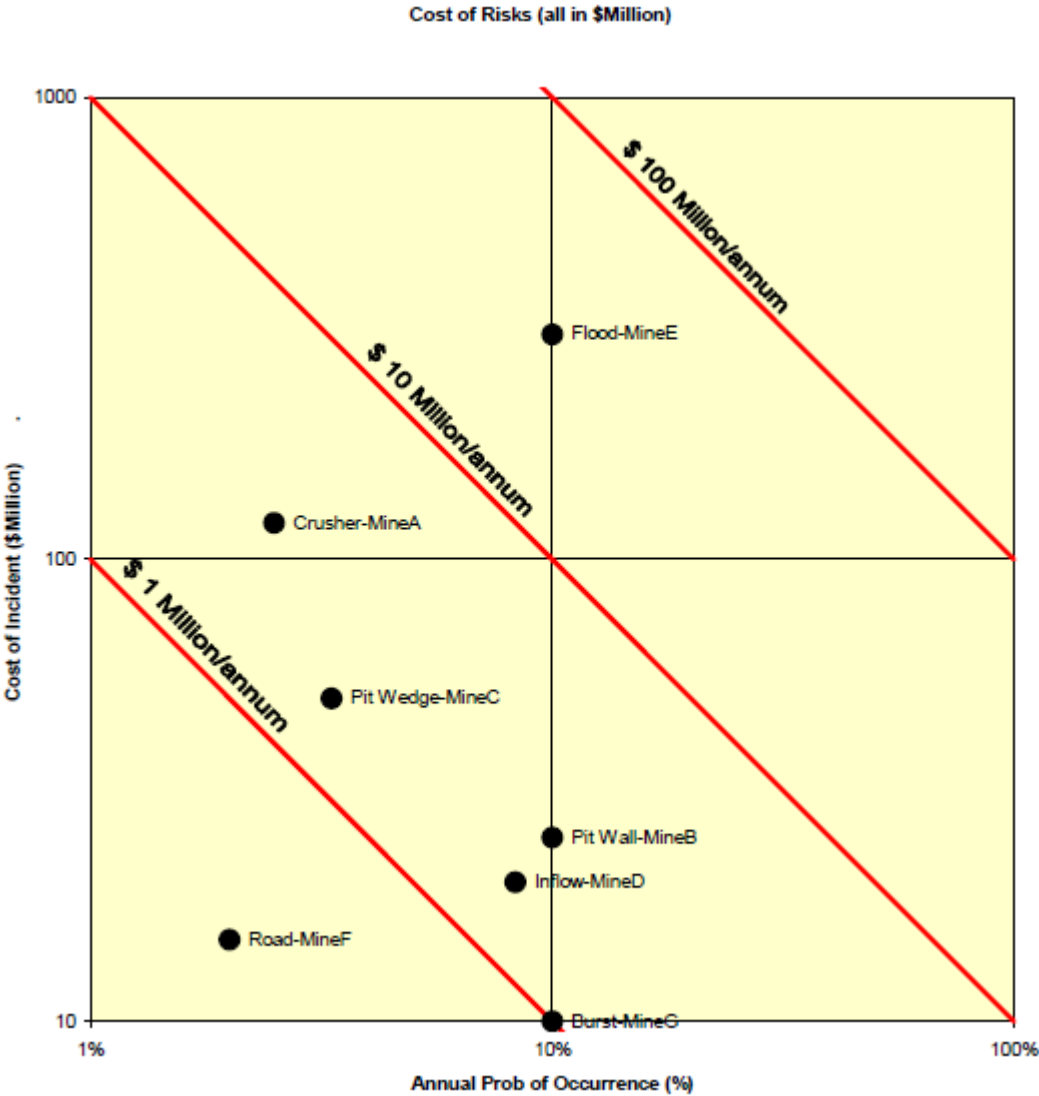


Ilustración 12: Costo de incidente v/s Probabilidad de ocurrencia [11]

La incertidumbre que representan estos factores, se analiza en las distintas etapas de ingeniería de un proyecto, pero también se debe gestionar día a día las interferencias generadas en el proceso de preparación minera y extracción del mineral.

2.3 INTERFERENCIAS OPERACIONALES DE ORIGEN GEOTÉCNICO

Las interferencias operacionales se definen como cualquier evento que interrumpa un proceso que forme parte de la operación. En minería la productividad y rendimiento de la operación se calcula en base a la medición de un desglose de tiempos donde se las interferencias operacionales se ven representadas como aquellos tiempos perdidos por causas operacionales. La definición de las tareas que encajen con esta definición en general depende de la operación en cuestión y sus características, pero se presenta a continuación una clasificación estándar de tiempos.

TIEMPO TOTAL (HT)			
TIEMPO PROGRAMADO (HP)			TIEMPO RESERVAS PROGRAMADAS (HRP)
TIEMPO DISPONIBLE (HD)		TIEMPO MANTENCIÓN (HM)	
TIEMPO OPERATIVO (HO)		TIEMPO RESERVAS NO PROGRAMADAS (HRNP)	
TIEMPO EFECTIVO (HE)	TIEMPO PÉRDIDAS (HDM)		

Ilustración 13: Distribución de tiempos Índices Operacionales ASARCO

En la práctica estas interferencias pueden tener origen mecánico, eléctrico, laboral, ambiental y/o geotécnico. Aquellas que presentan relevancia en el presente estudio serán aquellas de origen geotécnico, las que serán definidas en forma breve a continuación.

2.3.1.1 GRADO DE FRAGMENTACIÓN

El grado de fragmentación se define como la distribución granulométrica de la roca una vez iniciada la fragmentación del macizo rocoso inducida por la socavación. En general, cuando el grado de fragmentación es menor al esperado en el diseño, en combinación con factores operacionales como la tasa de extracción se pueden generar las siguientes interferencias:

- Colgaduras: Se originan cuando los bloques de roca fragmentados forman un arco estable a lo ancho de la luz de la excavación impidiendo el flujo del mineral [12].

- **Sobretamaño:** Se caracteriza por bloques de mineral de un tamaño por sobre el de diseño el cual genera dificultades a equipos de carguío y/o en sistemas de traspaso de mineral.

Estos riesgos, generan interferencia en las unidades productivas al establecer cierres y/o despejes de área para que las cuadrillas de reducción secundaria reestablezcan las condiciones productivas.

2.3.1.2 HUMEDAD

La presencia de humedad en el material fragmentado se debe principalmente al ingreso de agua debido a grietas generadas en la propagación de la fragmentación del macizo. Esto sumado a la presencia inherente de material fino entre los fragmentos de roca genera las condiciones para la formación de mezclas que fluyen entre los bloques de mayor tamaño, un ejemplo de interferencias producto de la humedad son los bombeos que pueden ser definidos de la siguiente forma:

- **Bombeos o estallidos de agua-barro:** Se definen como ingresos violentos de una mezcla de material fino y agua hacia las labores productivas como lo define Navia [13].

El riesgo de bombeo, es crítico a nivel operacional dado que a una determinada presencia de humedad, el punto se inhabilita y permanece bajo evaluación periódica, generando la pérdida momentánea o permanente en el punto de extracción determinado.

2.3.1.3 CAMPO DE ESFUERZOS

El campo de esfuerzos es inherente a la naturaleza del macizo rocoso, profundidad y zona geográfica donde se ubique el depósito. La redistribución de los esfuerzos in-situ se debe principalmente a las excavaciones generadas en el macizo rocoso como parte del diseño minero. Además en el caso de los métodos Block/Panel Caving existe un variante del esfuerzo en la zona de transición denominado Abutment Stress. Este es considerablemente mayor en la zona donde se encuentra el frente de socavación. Esta zona queda delimitada con la proyección del frente de socavación delante y detrás del frente siendo mayor la distancia hacia delante, a su vez el área definida por dichas proyecciones se proyecta sobre y bajo el nivel, siendo mayor su proyección hacia abajo del nivel de hundimiento.

- Inestabilidades: En general pueden ser ocasionadas por deformaciones o agrietamientos en las excavaciones generadas. Estas dañan y debilitan la fortificación e infraestructura.
- Colapsos: Derrumbes parciales o totales en forma violenta y repentina de una labor minera. Estos riesgos tienen consecuencias importantes en el día a día de la operación del método, los cuales pueden ir desde la reparación de una galería hasta la pérdida de un área considerable en un sector productivo.

2.3.1.4 SISMICIDAD INDUCIDA

La denominación Sismicidad Inducida responde a la causalidad de los eventos, es decir, se originan debido a la combinación de un estado inicial o in-situ y cualquier intervención generada en el macizo rocoso, provocando así una modificación del contexto.

La sismicidad inducida tiene su origen en la re-acomodación de esfuerzos producto de las excavaciones e intervenciones en la roca. Esto se materializa en que la roca acumula energía potencial la cual al ser liberada produce agrietamientos, quiebres, eventos sísmicos e incluso estallidos de roca [14]. Esta afecta a gran parte de las minas subterráneas en el mundo y más aún aquellas ubicadas a grandes profundidades.

Para estudiar la sismicidad en una operación en general se instalan arreglos de sensores de tipo sismógrafos con el objetivo de medir tres parámetros principalmente: hipocentro, momento sísmico y energía como lo señala Estay [15].

El momento sísmico (M_0) se relaciona con la magnitud de momento (M_w) mediante la siguiente ecuación enunciada por Hanks y Kanamori [16]:

$$M_w = \frac{2}{3} (\log M_0 - 10.7)$$

Esta nos permite representar la sismicidad en una escala común de mediciones, así generar bases de datos robustas y además establecer criterios como alertas en la operación.

Los eventos sísmicos en minería pueden provocar daños estructurales en túneles, pérdida de área en producción e incluso comprometer vidas en zonas aledañas a los eventos. Es importante entender cada uno de los conceptos involucrados como bien los defines Larsson en [14]:

- Evento sísmico: se define como una inesperada liberación de energía acumulada en la roca que se transmite como onda sísmica.
- Estallido de Roca: se define como un evento de magnitud considerable en el cual la energía se libera en forma repentina generando daños en la zona aledaña a la ubicación del evento sísmico. En general se puede ver comprometida la infraestructura generando pérdidas operacionales considerables en tiempo y recursos para la reparación.



Ilustración 14: Sección de Nivel de Producción afectado por estallido de roca [17]

El daño generado por eventos sísmicos y estallidos de roca propiamente tal, va desde ruidos de fractura y caída de roca por lajeo con aislaciones temporales hasta incluso el cierre inmediato de galerías o sectores de la mina, en el caso de los estallidos de roca. El daño que se pudiera generar es complejo de cuantificar, pues este puede relacionarse a la magnitud de momento del sismo o bien a la energía liberada por el evento. Con respecto a esta última Cornejo [18] deduce que para un evento sísmico con Magnitud de momento mayor a 1.5 y una energía liberada mayor a 10^6 [J] es probable observar daños en aproximadamente 50 [m] lineales de infraestructura.

Energía v/s Daño estallidos de roca entre 1996-2012

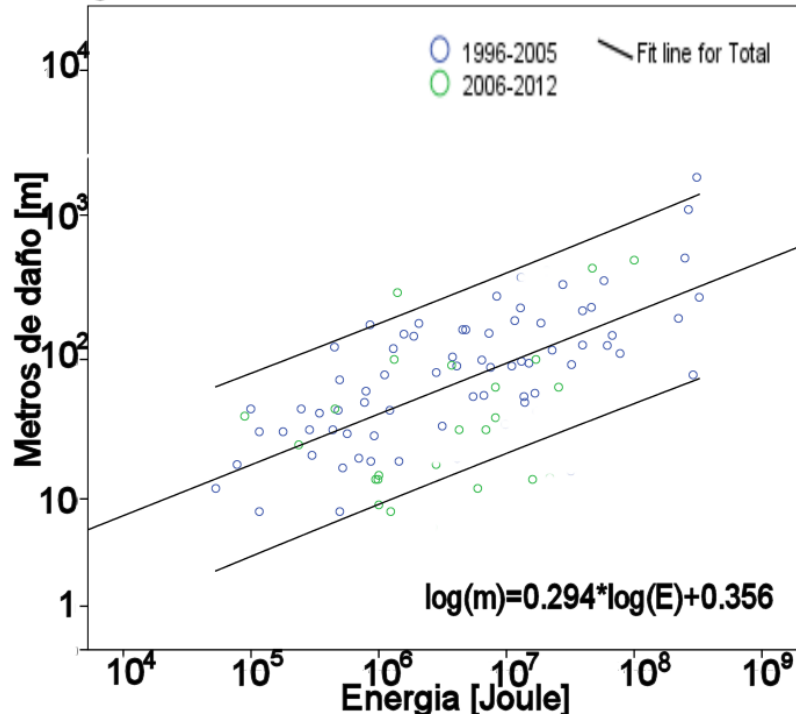


Ilustración 15: Energía liberada v/s Estallidos de roca [18]

2.4 PLANIFICACIÓN

La planificación se consiste en crear un plan general, metódicamente organizado y de planteamiento amplio, para obtener un objetivo determinado. Esta se aplica en la industria a distintos niveles de la organización y para distintos horizontes de tiempo.

En minería la planificación se considera un análisis integral de la producción de mineral, incluyendo inversión, tecnologías, sistemas de producción, un programa de extracción y traspaso a las plantas de procesamiento. Este plan debe ser coherente para las decisiones tomadas en los distintos horizontes de tiempos definidos por la compañía.

El enfoque tradicional divide en forma temporal la toma de decisiones, especificando para cada uno de ellos distintos niveles de riesgo y precisión de la información y entregables requeridos.

- Largo Plazo: Esta etapa define el negocio en forma global, incorporando la definición de una envolvente económica, elección del método de explotación, ritmo

de extracción, secuencia de explotación, leyes de corte, etc. Se analizan distintas opciones de proyecto con distintos niveles de riesgo.

- Mediano Plazo: El enfoque de esta etapa consiste en conciliar lo proyectado en el largo plazo, adaptando los modelos generando planes de producción para conducir la operación y cumplir las metas definidas.
- Corto Plazo: El enfoque de esta etapa se centra en la gestión y planificación de los recursos necesarios para la operación. En general la forma de gestionar los recursos implica la recopilación y utilización de información de los procesos, los cuales son la base para retroalimentar los modelos generados en el mediano plazo.

Otro enfoque es abordado por Bustamante et al [10] donde se describen las acciones a realizar en cada uno de los horizontes definidos en el desarrollo de proyectos en CODELCO:

- Desarrollo estratégico: Provee de escenarios de análisis y guías generales del negocio, los cual son de capital importancia en planes de largo y mediano plazo. Se define un plan exploratorio en cual se toman decisiones de largo plazo seleccionando un grupo de posibles escenarios con distintos niveles de riesgo. Finalmente se selecciona aquel que cumpliendo con las consideraciones estratégicas y restricciones del proceso, otorgue el mayor valor al negocio.
- Plan de Negocio y Desarrollo (PND): Se analizan decisiones de largo plazo considerando flujos de caja, costos, inversiones y ganancias generadas por los recursos que respaldan el negocio. Se consideran aspectos de mercado, recursos minerales, estrategia corporativa, medio ambiente, finanzas, técnicos, restricciones contractuales y otras regulaciones.
- Programa Quinquenal (PQ): Reporta en detalle los primeros cinco años del PND, considerando principalmente la gestión de activos y productividad.
- P0 y revisión: Reporta en detalle el primer año de los cinco detallados en el PND, este considera las tasas de extracción de mineral (producción) y aquellas de construcción (preparación minera).

Dentro de las consideraciones existen distintos enfoques según los resultados esperados del proceso. Como la discusión generada por Hinrichsen [19].

- **Planificación Estratégica:** Provee escenarios y guías generales del Negocio. Esta es un pilar fundamental en los planes de largo y mediano plazo. En los planes generados se obtiene la identificación de procesos, análisis de posibles escenarios, consideración de riesgos a la operación y lineamiento a los objetivos y propósito de la compañía.
- **Planificación Táctica:** Esta se basa en las consideraciones de la planificación estratégica pero busca maximizar el VAN esperado del negocio. De este modo se busca operativizar técnicamente el planteamiento de la planificación estratégica.

2.4.1 PLANIFICACIÓN EN MINERÍA SUBTERRÁNEA EN MÉTODOS BLOCK/PANEL CAVING

La planificación en minería subterránea presenta desafíos importantes en todas sus etapas y horizontes de planificación debido a la interacción de distintas disciplinas, periodos prolongados de tiempo y múltiples incertezas tanto en aquellas externas a la minería como aquellas directamente relacionadas como se mencionó en el capítulo de riesgos en minería.

A continuación se definirán los principales procesos a realizar en cada uno de los horizontes de tiempo señalados anteriormente. Estos fueron definidos en base a las distintas actividades desarrolladas en el transcurso de mis estudios de pregrado en el Departamento de Minería de la Universidad de Chile; cursos, congresos, talleres, visitas a terreno y prácticas profesionales. Orientado principalmente a la metodología de planificación minera de caving utilizada por la mina El Teniente, CODELCO.

2.4.1.1 PLANIFICACIÓN EN MINERÍA SUBTERRÁNEA DE LARGO PLAZO

Se define a continuación la secuencia de hitos que componen el proceso de planificación de largo plazo en minería subterránea de caving:

1. Modelo de Recursos in-situ: modelo de bloques del depósito con porcentaje de los elementos de interés.
2. Modelo de Material Quebrado: se estima el material de la cavidad en base a la tasa de extracción de mineral.
3. Modelo de Planificación in-situ: Considera los modelos i e ii.
4. Modelo de Planificación Diluido: Se utiliza el criterio de dilución de Laubscher, tomando en cuenta el RMR, altura de columna, estimando regularidad de tiraje, diseño minero, obteniendo como parámetro el Punto de Entrada de Dilución o el porcentaje extraído de la columna previo al ingreso de material diluido.
5. Límites de la explotación: Se define en base a los costos e inversiones asociadas al proyecto con el objetivo de definir el volumen económico a extraer seleccionando así un área basal (footprint) y una altura de columna óptima.
6. Definición Unidades Básicas de Explotación (en adelante, UBE): Se define el diseño a utilizar para los puntos de extracción y su disposición en forma previa.
7. Secuencia de Explotación: En su definición considera la ley del mineral a extraer, geomecánica e interferencias entre sectores. Además se debe analizar la secuencia por sector tanto en el inicio de Caving como la continuación de la explotación.
8. Altura Extraíble: Se consideran tres aspectos fundamentales en la dimensión del depósito, aquella técnica por zona de barro y agua, riesgo de colapsos y económica
9. Envolvente económica óptima: Mediante modelos de optimización lineal se busca maximizar el valor considerando desglose de costos, capacidad de incorporación y producción, secuenciamiento, plan de incorporación de área, alturas máximas y velocidad de extracción por sector.
10. Simulación de Extracción: Busca verificar la factibilidad de cumplir el plan generado, considerando distintos escenarios de producción.
11. Plan de producción: Representa el tonelaje a extraer con su ley media por periodo por periodo
12. Plan de preparación minera: Representa los desarrollos de tipo vertical u horizontal para brindar acceso a la extracción del mineral desde las UBE.

13. Declaración de reservas: Esta considera todo lo económicamente extraído como parte final del proceso de clasificación.

2.4.1.2 PLANIFICACIÓN EN MINERÍA SUBTERRÁNEA DE MEDIANO PLAZO

A continuación analizaremos los hitos propios de un proceso de planificación subterránea mediano plazo, comprendiendo este periodo un horizonte que va desde uno a cinco años. En esta etapa los esfuerzos se orientan a cumplir con el plan generado para el periodo mayor, definiendo y desarrollando algunas de las etapas anteriores a un mayor nivel de detalle evaluando e integrando los sistemas que interactúan.

Se debe cumplir con la definición de los siguientes objetivos:

1. Revisión Diseño: Evaluar los diseños previos en base a los lineamientos geomecánicos de la zona y cualquier actualización de las condiciones de la zona. Las dimensiones definidas deben ser consecuente con la variante del método seleccionada para la explotación.
2. Altura de extracción: Se debe operativizar las alturas de extracción definidas anteriormente, considerando la interacción entre puntos vecinos y la posible entrada de mineral de dilución o mezcla.
3. Plan de producción: Se define a escala mensual o semanal las toneladas que deben ser extraídas desde cada punto de extracción y la ley de dicho mineral, debido a los requerimientos impuestos por las plantas de procesamiento. Se deben respetar las velocidades de extracción media para cada zona definidas por el área de geomecánica.
4. Plan de preparación minera: Se debe definir a escala mensual o diaria, los distintos desarrollos, equipos y suministros necesarios para que estos sean materializados. Se debe respetar el área a socavar e incorporar para cada zona definida por el área de geomecánica.

2.4.1.3 PLANIFICACIÓN EN MINERÍA SUBTERRÁNEA DE CORTO PLAZO

Finalmente se enunciará en este apartado la secuencia de hitos que forman parte del proceso de planificación subterránea de corto plazo, siendo este periodo aquel que comprende el plazo desde un día a un año. En el corto plazo se busca cumplir con los

compromisos adquiridos previamente, pero con un enfoque en la eficiencia en la utilización de los recursos y la minimización de los costos asociados al proceso.

Se debe cumplir con la definición de los siguientes objetivos:

1. Plan de Producción: Se debe definir un plan de extracción mensual a escala diaria considerando el tonelaje o baldadas de mineral a extraer para asegurar una velocidad de extracción media acorde a la zona. Además se debe considerar la disponibilidad de puntos según su condición inmediata, estos podrían presentar colgaduras, material de Sobretamaño, humedad, etc. Por lo tanto, se debe re-assignar y actualizar el plan en forma semanal.
2. Plan de preparación minera: Se debe definir un plan detallado por operación unitaria para cada uno de los desarrollos tanto en el nivel de hundimiento como en el nivel de producción, considerando la reparación o modificación de la infraestructura. Este plan debe re-assignarse a escala diaria o semanal.
3. Suministros: Se debe definir a nivel de unitario, los suministros necesarios para cada uno de los procesos realizados al interior de la mina.
4. Plan de contingencias: Se deben definir distintos planes de acción debido a la probabilidad de ocurrencias de distintos eventos de interferencia operacional y geotécnica

2.5 INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES

La disciplina de Investigación de Operaciones tiene sus orígenes en la planificación de operaciones militares en la segunda guerra mundial. Esta disciplina mediante la utilización de métodos analíticos avanzados contribuye a tomar mejores decisiones; métodos matemáticos como el modelamiento, análisis estadístico y la optimización, los cuales permiten llegar a soluciones óptimas o cercanas a estas en problemas complejos. Se han desarrollado diversas técnicas y métodos de resolución que permiten abordar los problemas de modo más eficiente, tales como simulación, optimización matemática, teoría de colas, procesos de markov, métodos económicos, análisis de datos, estadística, y análisis de decisiones. Estas técnicas o métodos, requieren de la construcción de un modelo matemático que describa el sistema que se busca representar.

Investigaciones de operaciones interactúa con una amplia gama de disciplinas, principalmente aquellas que involucran a la ingeniería industrial y gestión de operaciones. En esta usualmente se busca determinar un máximo; orientado a obtener retornos, rendimiento, productividad, etc. O mínimos; orientado a cumplimiento, riesgo, costos, etc. Junto a esto se define un set de variables y restricciones apropiadas a la naturaleza del sistema [20].¹

2.5.1 INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES EN MINERÍA

La utilización de esta disciplina en la resolución de problemas mineros se remonta al año 1960, desde aquella época se han utilizado problemas de simulación y optimización principalmente orientados a resolver problemas de rajo abierto o superficiales como también aquellos subterráneos. Las decisiones que se busca cuantificar o sustentar son principalmente en qué momento, de qué modo extraer el mineral y qué hacer con él, para que el resultado se aproxime al óptimo económico [4].

El desarrollo de esta disciplina en minería de rajo o superficial, se ha orientado a resolver principalmente los siguientes problemas:

- Pit Final o Pit último: Enfocado a determinar el mineral económicamente extraíble respetando restricciones geotécnicas y diseño.
- Secuenciamiento o Agendamiento de Bloques: Enfocado a determinar cuándo debiese ser extraído un bloque, considerando restricciones de producción y procesamiento principalmente.
- Asignación de equipos: Enfocado a determinar los recursos necesarios para cumplir el agendamiento establecido.

Aquellos aportes y desarrollos referentes a minería subterránea serán mencionados con mayor nivel de detalle en la siguiente sección.

¹ Extraído de < <https://www.informs.org/About-INFORMS/What-is-Operations-Research> > Octubre 2015

2.5.2 INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES EN MINERÍA SUBTERRÁNEA

Los desarrollos de esta disciplina orientados a resolver problemas de minería subterránea son más recientes. A continuación se presenta una breve mención de distintas aplicaciones según las características de las decisiones tomadas.

2.5.2.1 DECISIONES ESTRATÉGICAS

Las decisiones tomadas a nivel estratégico en minería subterránea, es decir, elección del método apropiado de extracción y el diseño del mismo, son evaluadas principalmente por características geomecánicas y la mineralización del depósito. Sin embargo existen distintos trabajos que abordan variables asociadas a estas características:

- Barbaro y Ramani [21] mediante un la resolución de un modelo de programación entero mixto, buscan determinar el agendamiento de la producción y el tipo de plantas de procesamiento con múltiples ubicaciones en forma de satisfacer la demanda de mercado.
- Qinglin [22] presenta una aproximación para cuantificar la elección de un método de explotación, el autor define una metodología seleccionando distintos métodos probables para un depósito, luego considera parámetros técnicos y económicos para cada uno de ellos, para finalmente resolver identificando la incertidumbre y complejidad de la geología como un “Grey System” o Sistema incompleto y utilizando redes neuronales para determinar los índices para determinar aquellos índices técnicos y económicos.
- Rubio [23] desarrolla una metodología de agendamiento que permita interactuar objetivos estratégicos, como la maximización del valor neto descontado y la maximización de la vida útil de la mina con el agendamiento de la producción. Obteniendo así la integración de estimación de reservas con las tasas de desarrollo como resultado del agendamiento de la producción.
- Rahal [24] describe un modelo de programación lineal entera mixta con múltiple objetivo, minimizar la desviación del perfil de puntos de extracción manteniendo la producción esperada.
- Yun [25] introduce el uso de algoritmos evolucionarios para optimizar la producción de una mina a partir del análisis de un depósito, en el cual mediante un algoritmo

genético se fija el óptimo a producir, determinando así el periodo a ser minado para cada bloque, luego mediante programación evolucionaria se fija la tasa a ser minada para cada bloque, llegando a una solución parcial para cada periodo.

- Newman y Kutcha [26] mediante un modelo de programación entera mixta para agendar una producción multi-periodo. El modelo respeta parámetros de una secuencia operativa factible minimizando la desviación de los tonelajes planificados. Implementan una heurística de agregación de periodos para luego resolver el modelo original con información proveniente del modelo agregado.
- Epstein et al [27] presentan una metodología para abordar problemas de largo plazo basados en la formulación de flujos capacitados para una red multi-producto(commodities) considerando la producción de minas subterráneas como superficiales utilizando plantas de procesamiento común. Por la magnitud del problema se aborda una solución lineal relajada para el problema mayor y aproximando este a una solución cercana a entera con un procedimiento modificado.
- Davis [28] introduce el cuestionamiento a la forma actual de evaluar un proyecto mediante la cuantificación del valor descontado neto como función objetivo versus la valorización de múltiples alternativas mediante el modelo de Opciones Reales.
- Pourrahimian [29] se hace cargo del agendamiento a largo plazo de una mina de Block Caving mediante un modelo de programación lineal mixto, maximizando el valor considerando restricciones técnicas y operacionales. Las formulaciones del modelo son definidas en tres niveles; clúster de puntos de extracción, punto de extracción y punto de extracción en bancos por cota.
- Vargas [30] propone un metodología que permita considerar la incertidumbre geológica mediante simulaciones de la ley del depósito en el cálculo de la envolvente económica para minas de Block/Panel Caving. Se consideran la elección de un piso óptimo, cálculo de reservas mediante utilizando el algoritmo de pit final inverso y un análisis de riesgo con respecto al valor de la envolvente definida.

2.5.2.2 DECISIONES TÁCTICAS

Las decisiones tácticas involucran las evaluaciones y especificaciones de los procesos que se deben llevar a cabo a lo largo de la vida de la mina. En esto se considera la interacción de sistemas de extracción, preparación, transporte, construcción y procesamiento dentro de los más importantes y a su vez cómo interactúan con la naturaleza geológica y geotécnica de la operación.

En esta sección se describen trabajos en las cuales se ven involucradas este tipo de decisiones tanto en el planteamiento como la solución del problema.

- Kazakidis [5] demuestra como los problemas del comportamiento del macizo rocoso afectan en forma significativa la operación, determinando así una metodología para cuantificar y evaluar la interacción entre la planificación y la geomecánica. La probabilidad en los eventos permite hacer un análisis de confiabilidad, el cual determina los valores iniciales para el plan de producción. La flexibilidad necesaria en el diseño y planificación con respecto a estos eventos, fue determinada mediante análisis de flujos descontados, opciones reales, simulación de la producción y simulaciones de Monte-Carlo. Finalmente desarrolla una metodología que permite evaluar el proyecto considerando las flexibilidades necesarias y los riesgos presentes en el proceso de planificación y diseño.
- Troncoso [31] busca simular la producción de una operación de Block/Panel Caving considerando las interferencias operacionales. Esto lo realiza describiendo el comportamiento de cada una de estas interferencias como distribuciones probabilísticas para luego integrarlas en un modelo de simulación que considera una zona del nivel de producción, determinando así la productividad máxima de un cruzado de producción.
- Maldonado [12] formula una metodología para establecer la programación de la producción a corto plazo, considerando la incertidumbre existente en la capacidad productiva de la mina, es decir, considerando los sistemas productivos: Mina, Transporte y Planta de Procesamiento de manera integrada. Esto estudiando el comportamiento de los sistemas en forma probabilística con el objetivo de asegurar el cumplimiento del plan de producción.

- Armstrong et al [32] utilizan optimización estocástica multi-escenario para determinar cómo asegurar la producción comprometida en venta ante la ocurrencia de incidentes importantes en la producción considerando en el proceso de decisión la incertidumbre del precio del producto/commodity determinado así el conjunto de decisiones a tomar para alcanzar el valor óptimo.
- Alarcón [33] introduce la metodología de Opciones Reales en la consideración de la disponibilidad de los puntos de extracción en métodos Block/Panel representándolo a través del castigo de la velocidad máxima de extracción por punto considerando coberturas para contrarrestar dicho efecto, como el aumento de inversión en preparación minera. De este modo se determina el impacto en el valor esperado del proyecto.
- Rocher et al [34] busca integrar dos bloques del proceso de planificación generando un modelo optimización y agendamiento de actividades, el cual hiciera posible considerar en forma simultánea el desarrollo de la preparación minera y la producción, de manera tal que se genere un agendamiento factible y robusto.
- Martínez y Newman [35] mediante un modelo de programación entera mixta se busca conciliar los planes de largo plazo con aproximaciones mensuales a un plan de corto plazo minimizando la desviación de estos respetando restricciones operacionales.

2.6 INCLUSIÓN DE INTERFERENCIAS OPERACIONALES DE ORIGEN GEOTÉCNICO EN MINERÍA SUBTERRÁNEA

A lo largo de las secciones anteriores se describieron distintos trabajos, referentes al estado del arte de algunas de las disciplinas relacionadas a este trabajo de tesis. En esta sección se describirán y compararán lo realizado por dichos autores, pero siempre haciendo énfasis en la arista principal de este trabajo que consiste en incorporar el concepto de Peligro Sísmico en forma dinámica al proceso de Planificación Minera de Panel Caving.

El proceso de planificación involucra diversos eventos de interferencias como lo grafica Kazakidis [5] trabajo en el cual profundiza en la consideración de eventos de

interferencias causado por problemas de suelo en minas de roca dura en el cual se determina la necesidad de considerar en forma más flexible parámetros geomecánicos en el proceso de planificación.

La consideración de estos eventos en forma de parámetros iniciales para el proceso de planificación fue revisada por Troncoso [31] en donde considera la distribución probabilística de eventos de interferencias en puntos de extracción y puntos de traspaso determinando la capacidad máxima de acarreo de material en una calle de producción. Por otra parte Maldonado [12] castiga en el modelo de producción mina la velocidad de extracción media si el porcentaje de columna extraído de un punto es menor al 30% del total de esta, incorporando así la disponibilidad de área como un porcentaje del área incorporada. Se incorpora el concepto utilización efectiva del área abierta como la razón entre la producción extraída y la producción máxima extraíble. También Alarcón [33] utiliza velocidades de extracción reales las cuales fueron ajustadas a una distribución para generar distintos casos y representar la variabilidad real de estas velocidades en la operación debido a interferencias de distintos tipo como colgaduras, sobretamaños u otras.

Por otra parte, existen trabajos en los cuales se estudian interferencias operacionales de origen geotécnico buscando proveer de lineamientos o recomendaciones al proceso de planificación minera como:

Kaiser et al [36] identifican la dificultad que existe en el proceso de planificación y diseño en infraestructura subterránea, al ser procesos que involucran una gran cantidad y diversidad de datos a ser considerados. Proponen una solución no convencional al problema interpretando datos en modalidad de realidad virtual. El mayor beneficio identificado es la velocidad en la que sistemas subterráneos complejos pueden ser identificados y por ende ser comprendidos en su tridimensionalidad. En particular Kaiser et al [37] en un trabajo previo se enfoca en la visualización de eventos sísmicos de naturaleza n^*D (número de datos por dimensión como datos de monitoreo) para implementar una plataforma con visualización tridimensional de la minería y geotecnia, permitiendo un mejor desempeño de un panel de expertos al considerar el diseño, evaluación, monitoreo y planes de producción en una mina subterránea.

Navia [13] abordó la aparición de flujos de barro en puntos de extracción, los cuales tienen consecuencias importantes en la disminución de las reservas definidas al momento de declarar un punto o zona clausurados. En este trabajo se logran identificar correlaciones entre la aparición de barro debido a estrategias de extracción de una zona y la uniformidad con la que se extrae el mineral, lo cual, impacta directamente en la recomendación de una determinada velocidad de extracción para una zona o punto durante el proceso de planificación.

2.7 RESUMEN Y CONCLUSIONES REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Aparece de manifiesto que el problema del riesgo inherente a la minería subterránea se pone en evidencia al describir la naturaleza del problema y en particular aquella presente en el desarrollo de métodos por hundimiento masivo como lo es el método Panel Caving. Estos en general, son considerados como eventos de interferencias las operaciones de extracción y preparación, viéndose comprometidas las metas establecidas en los distintos horizontes de planificación e incurriendo en costos no considerados además del peligro a la vida e integridad de las personas que participan de dichos procesos, lo cual no puede ser cuantificado de ninguna manera y bajo ninguna consideración.

En este trabajo se busca incorporar al proceso de planificación el Peligro Sísmico originado por sismicidad inducida, considerando variables operacionales como la tasa de incorporación de área y la velocidad de extracción, como también variables de diseño y geotécnicas. Esto no ha sido considerado en forma directa en los trabajos antes mencionados y representa una oportunidad de complementar los planes de producción generando recomendaciones tanto en el secuenciamiento como velocidades de extracción apropiadas para la zona estudiada.

CAPITULO 3

MODELOS

El siguiente capítulo presenta los modelos que interactúan en la incorporación del Peligro Sísmico a la Planificación Minera de Panel Caving, definiendo para cada uno de estos las variables que los representan, modelo de resolución e interacción.

3.1 MODELO DE PELIGRO SÍSMICO

El Modelo de Peligro Sísmico utilizado fue desarrollado por la consultora GMT [1] para el mandante con el objeto de sustentar el plan exploratorio del Nuevo Nivel Mina (NNM).

El modelo se basa en la calibración de una regresión logística para una data histórica de las variables en estudio. Esto permite estimar el peligro sísmico para una unidad básica de explotación de Panel Caving considerando como input variables geotécnicas, mineras y operacionales.

La estimación del Peligro Sísmico consiste en el cálculo de la probabilidad de ocurrencia de un evento sísmico mayor o igual a M_w^* , la cual representa un límite técnico definido como la magnitud de evento relevante en estudio.

3.1.1 ALCANCES

- El peligro sísmico se define como la probabilidad de que ocurra un evento de momento de magnitud mayor a M_w^* considerando variables geotécnicas y de la minería desarrollada. Se define un $M_w^* = 1.5$ en el estudio realizado.
- Para estimar el peligro sísmico se planteó un modelo estadístico utilizando una base de datos empírica. Esto limita el resultado del modelo a los datos utilizados en la calibración y por ende las características particulares de la mina.
- El modelo asume una condición de régimen y una unidad básica de explotación de minería de Panel Caving aislada.

3.1.2 DEFINICIÓN DE VARIABLES

A. Variables geotécnicas

1. Estructuras geológicas: Son aquellas estructuras presentes en la corteza terrestre. Estas se clasifican en Diaclasas, Fallas o Pliegues y su orientación se determina según la dirección de su inclinación, Rumbo y Manteo.
2. Parámetro geotécnico [P_{10}]: Este parámetro mide la frecuencia de vetillas blandas de espesor mayor o igual a 1 [mm].
3. Esfuerzo vertical en la zona abutment Sva [MPa] : Esfuerzo vertical en la zona de Abutment, en función del esfuerzo vertical in-situ, Svo [MPa]; la losa, L_2 [m]; y la altura de socavación, h_s [m].
4. Fracturamiento Hidráulico [FH]: Son aquellos fracturas inducidas al macizo rocoso por un método externo.

B. Variables operacionales

1. Velocidad de Avance del Frente: Este parámetro representa la cantidad de metros lineales que se trasladó el frente dado un determinado periodo de tiempo. Esto se calcula en base al área incorporada en un periodo de tiempo dividido el ancho del frente a la fecha. Se consideran frentes rectos y los metros lineales se miden en la orientación perpendicular al frente al inicio del periodo.

$$Ainc/Bext [m/trimestre]$$

2. Velocidad media de Extracción: Representa la tasa a la cual se extrae el mineral desde un punto de extracción medido en toneladas por periodo de tiempo para un metro cuadrado de área. La notación más utilizada es toneladas por día por metro cuadrado.

$$Vext[tpd/m^2]$$

3.1.3 GENERALIDADES

El modelo considera la definición de zonas dentro de un sector de un método Panel Caving y una escala de tiempo trimestral. De esta forma se define periodo a periodo, según el avance del frente, el área incorporada y las condiciones geotécnicas que rigen dicha zona.

El modelo se calibró para eventos de magnitud $M_w \geq 1.5$, entregando así la probabilidad que tienen de ocurrir estos eventos mediante un ajuste que relaciona las variables mencionadas en anteriormente. Para valores de probabilidad de ocurrencia de 7%, el modelo alcanza su máxima eficiencia, con tasas de aciertos en torno al 89% y exactitud de 77%.

Este valor de magnitud se estableció en conjunto con el equipo de la Superintendencia de Planificación Minera de El teniente-CODELCO debido a la probabilidad de registrar daños considerables sobre esta magnitud considerando la liberación de energía como lo establece Cornejo [18].

No obstante lo anterior, el modelo podría ser calibrado para condiciones distintas a las actuales y/o establecer criterios distintos de aceptación en cuanto a la calibración de la probabilidad de ocurrencia de eventos de magnitud distinta a la definida.

3.2 MODELO DE PLANIFICACIÓN – UDESS

El modelo de planificación utilizado se basa en la resolución de un problema de programación lineal mixto, el cual fue desarrollado por el Laboratorio de Planificación Minera Delphos², este fue presentado por Morales, Rocher y Rubio en los siguientes trabajos [34], [38]. Posteriormente el modelo fue utilizado como base para el desarrollo del Software Underground Developer and Extraction Sequencer and Scheduler hoy renombrado Universal Delphos Sequencer and Scheduler o UDESS [2].

UDESS fue desarrollado inicialmente en el lenguaje de programación Python 2.7, luego migrado a C++ y llevado a una interfaz gráfica. Como motor de optimización pueden ser utilizados los siguientes: Gurobi [39] o CBC [40]

² Fuente < <http://delphos.dmi.uchile.cl/> >

3.2.1 ESTRUCTURA DEL SOFTWARE

La estructura del software se articula en la definición genérica de actividades, las cuales deben ser descritas por recursos y/o atribuciones dado el problema que se busque resolver, esto permite abordar cualquier problema que pueda ser descrito bajo esa definición. Dentro de estas atribuciones existen tres indispensables, cinco accesorias y todas aquellas que el usuario defina.

A. Indispensables:

1. ID :Nombre de la actividad
2. ING: Ingreso o valor percibido por la actividad (Ingreso Total)
3. Max Rate: Tasa máxima realizable por mes de la actividad

B. Accesorias:

1. Pre Cost: Costo incurrido al comenzar una actividad
2. Post Cost: Costo de poner fin a la actividad
3. Lenght: Duración de la actividad (recursos por ejemplo)
4. Min Rate: Tasa mínima realizable por actividad
5. Sub-actividad: si forma parte de un actividad mayor
6. Atributos numéricos que describan la naturaleza del problema

Estas actividades interactúan en el modelo de optimización mediante la definición de restricciones acordes al problema. Dentro de estas se definen las siguientes:

- #### A. Precedencias:
- Representa el vínculo lógico entre la realización de una actividad predecesora y otra sucesora. Estas dan sentido generalmente al problema, describiéndolo física y operacionalmente. Una consideración importante en la definición de estas es su naturaleza de tipo “o”, es decir, puede existir más de un conjunto de actividades que de paso a la realización de una actividad.

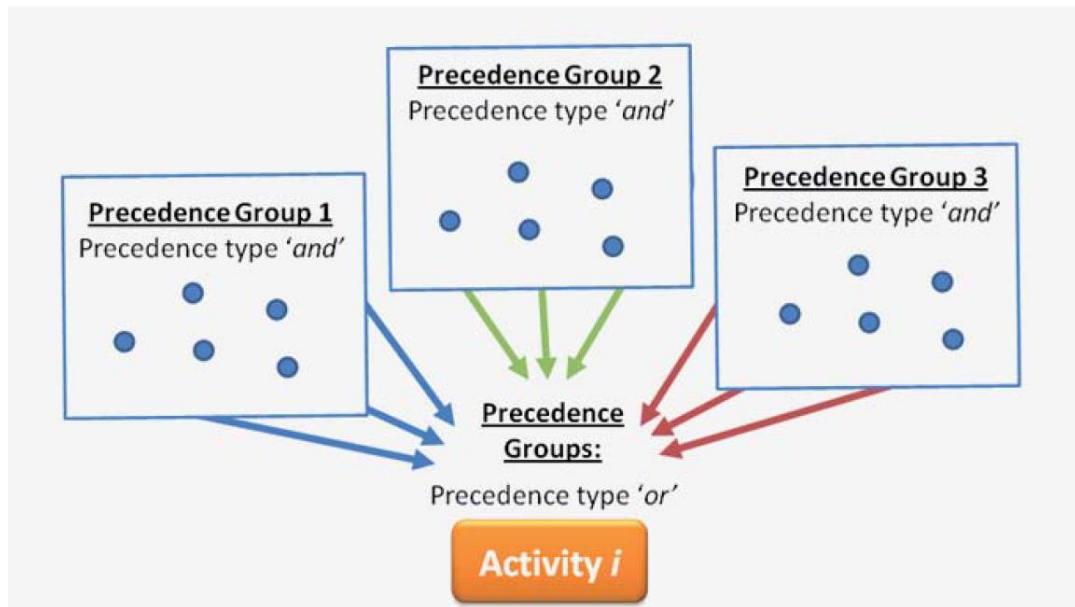


Ilustración 16: Representación gráfica restricciones de precedencia tipo "O" [34]

B. Restricciones incorporadas en el software:

1. Operational Resource Constraint o Restricciones de Recursos Operacionales: Limita el consumo de un determinado recurso para un determinado periodo de tiempo, para todas las actividades que lo requieran.
2. Starting Resource Capacity o Restricción de Recurso de Inicio: Limita el consumo de un recurso dado al iniciar las actividades.
3. Progress Limit Constraint o Restricción Limite de Desarrollo: Obliga el cumplimiento de un progreso mínimo y máximo de una actividad en un intervalo de tiempo.
4. Range Resource Constraint o Restricción de Rango de Recursos: Limita el consumo de las actividades para un recurso dado. Esta limita el total del recurso en el rango de tiempo dado y no una tasa por cada periodo.
5. Activity incompatibility Constraint o Restricción de Incompatibilidad de Actividad: Limita el desarrollo simultáneo de un grupo de actividades en un intervalo de tiempo dado.
6. Starting period Constraint o Restricción de Inicio en Periodo: Limita el intervalo de tiempo en el que un grupo de actividades debe comenzar.

Estas últimas permiten describir el problema en base a los recursos asignados a cada una de las actividades. La descripción realizada fundamenta la versatilidad de la herramienta desarrollada y su potencialidad en la resolución de problemas de diversas disciplinas y por supuesto de la industria minera.

3.2.2 BASE RESOLUTIVA

La resolución de un problema de programación entera en general implica elevados tiempos de resolución, por lo tanto, es usual representar ciertos problemas como problemas de programación lineal mixta, donde algunas variables pueden ser continuas y otras enteras. La resolución de este problema utilizando el software Gurobi [39] transforma el problema en ecuaciones lineales que se resuelven a través de iteraciones. El proceso de resolución se puede describir bajo el comportamiento de dos curvas de las cuales una representa la relajación del problema original estableciendo una curva decreciente que representa la cota superior al valor del problema y otra creciente que representa la evolución efectiva del valor objetivo subiendo un determinado porcentaje en cada iteración. La diferencia aceptable entre los valores obtenidos para ambas curvas lo define el usuario, usualmente como el error aceptado o GAP. De este dependerá de la precisión con la cual se quiera determinar la solución y los tiempos de resolución asociados a esta.

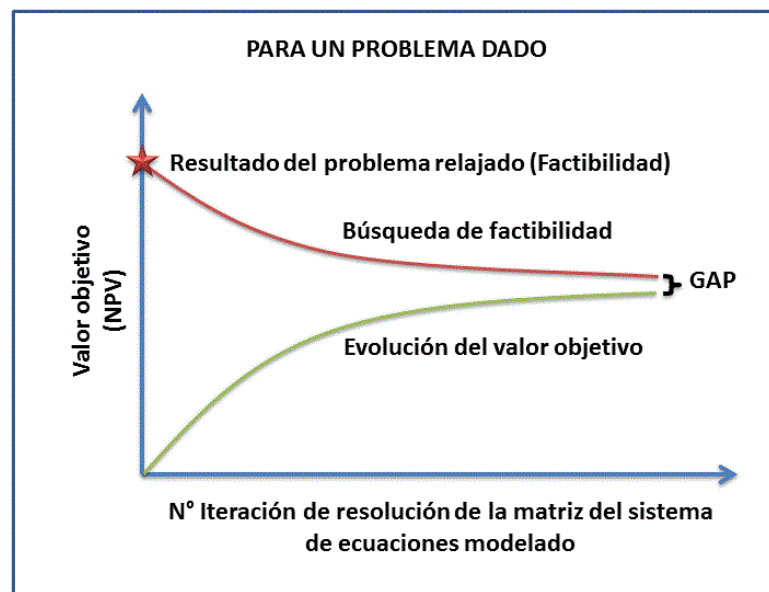


Ilustración 17: Curvas resolución Gurobi y GAP [38]

3.2.2.1 HEURÍSTICA DE VENTANAS

Esta heurística se implementa con el objetivo de resolver problemas de mayor envergadura en tiempos considerablemente menores que los observados al resolver el problema en forma completa. La heurística de ventanas se hace cargo de la longitud de

los periodos en los cuales se busca resolver el problema de optimización. Esta se implementa mediante la elección de un número de periodos resueltos a la escala definida y otro número de periodos que se agregarán en periodos de mayor tamaño considerando los recursos y restricciones para el problema de menor tamaño.

Por ejemplo, se tiene un caso en el cual el problema que se quiere resolver lo hace en 20 periodos mensuales. Se eligen 5 periodos iniciales de tamaño mensual y periodos agregados de 5 meses. De este modo el problema se resuelve en 5 periodos mensuales y 3 de cada uno 5 meses, para un total de 8 periodos, lo cual disminuye drásticamente los tiempos de resolución. De esta forma se resuelve una primera instancia del problema, para luego pasar a tantas etapas como periodos agregados hayan sido definidos. A continuación se fijan los valores obtenidos para periodos mensuales, se divide el periodo de 5 meses en escala mensual y los últimos dos periodos agregan cinco meses cada uno. Quedando representado de la siguiente forma:

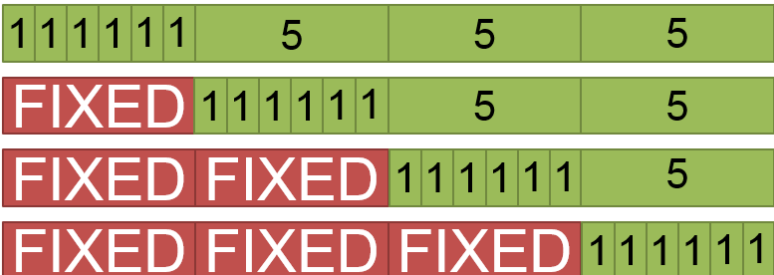


Ilustración 18: Representación metodología Heurística de Ventanas

3.2.3 CASOS DE UTILIZACIÓN DE UDESS

UDESS ha sido utilizado en múltiples trabajos de memoria y tesis, principalmente por alumnos de la Universidad de Chile. A continuación se describen brevemente alguno de los problemas que han sido abordados con el software.

Rocher en [38]: secuenciamiento de actividades de preparación y producción para el método de minería subterránea selectiva Sublevel Open Stopping.

Rocher en [38]: secuenciamiento de actividades de preparación para un plan de producción guía de un método de minería subterránea Block Caving.

Alarcón en [33]: secuenciamiento de actividades de preparación y extracción de puntos de extracción para una mina de Caving considerando distintos escenarios de velocidades máximas de extracción.

Gómez en [41]: desarrollo de una metodología que provea de distintas alternativas para el secuenciamiento de minería subterránea selectiva en función de multi-criterio para su evaluación.

Arriagada en [42]: secuenciamiento optimizado considerando restricciones de mezcla para métodos de Block Caving

Tapia en [43]: evaluación del riesgo de cumplimiento de un plan de producción para minería de rajo considerando la incertidumbre del precio y geología. Además se considera la utilización de stocks como medida de mitigación

3.2.4 PLATAFORMA DEL SOFTWARE

El software UDESS actualmente se encuentra asociado a una interfaz usuario GUI, pero en su creación fue desarrollado en scripts de Python. En esta sección se demuestra la versatilidad y utilización del software en los dos formatos que actualmente se puede utilizar; una interfaz de usuario (GUI) o mediante Scripts de Python

3.2.4.1 INTERFAZ DE USUARIO O GUI:

La interfaz permite al usuario interactuar con el algoritmo de forma simple. La utilización del software es bastante sencilla y para la ejecución de un proyecto se deben cumplir una serie de pasos, los cuales serán mencionados a continuación acompañados de una imagen de su visualización en el software.

1. Cargar archivo de actividades

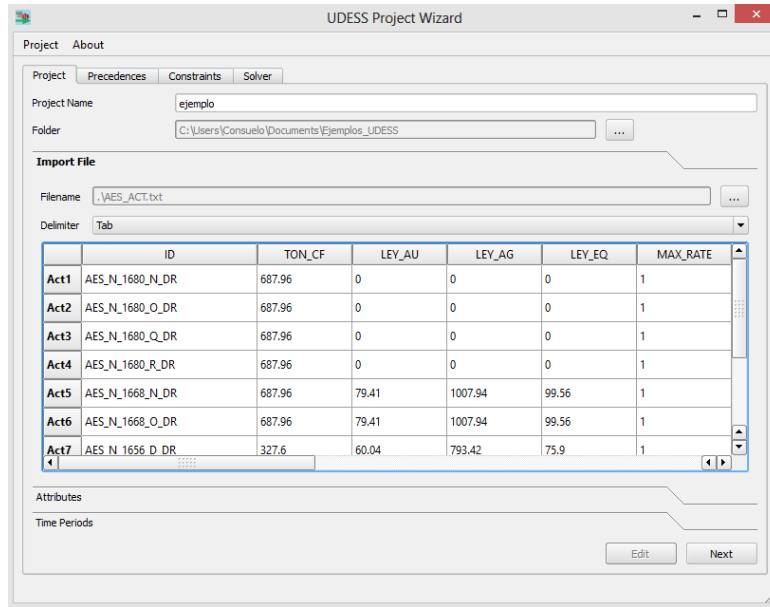


Ilustración 19: Selección de archivo actividades - UDESS

2. Asignación de atributos por columna

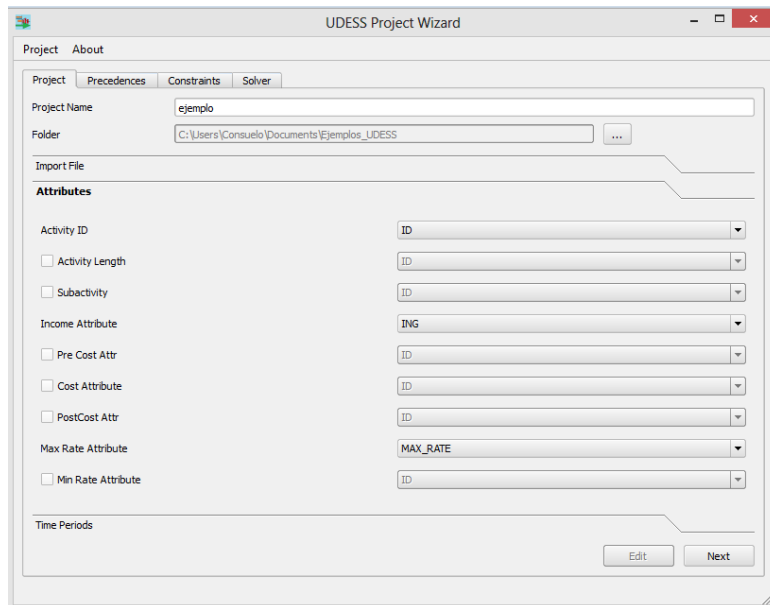


Ilustración 20: Selección de atributos por columna - UDESS

3. Definición de periodos de tiempo en base mensual

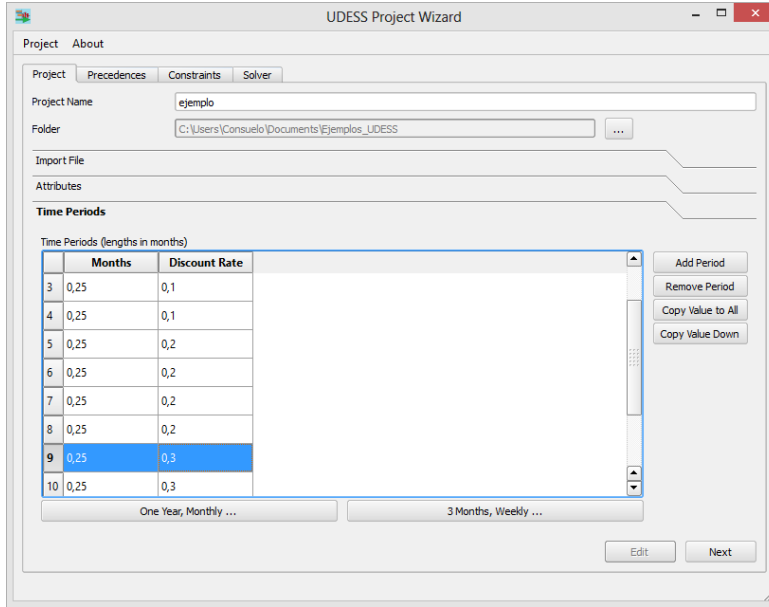


Ilustración 21: Definición de tamaño de periodo en base mensual - UDESS

4. Cargar o seleccionar precedencias entre actividades

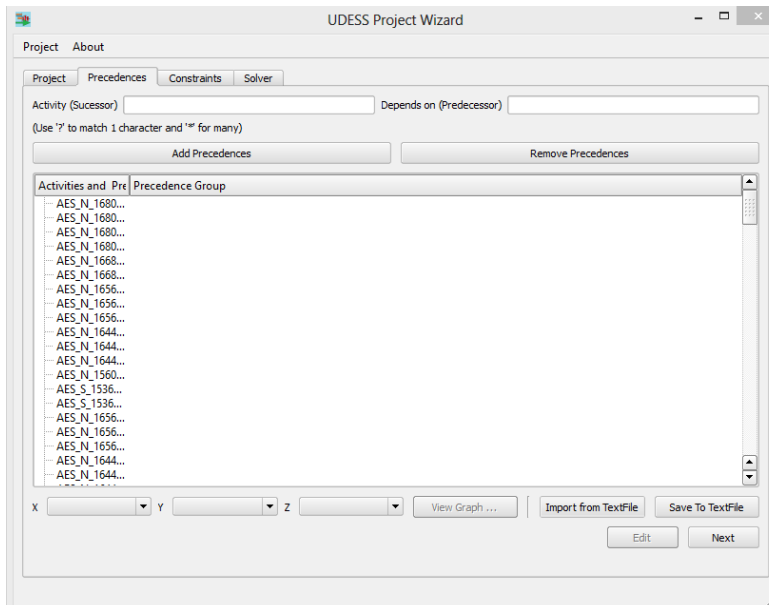


Ilustración 22: Seleccionar o cargar archivo de precedencias entre actividades- UDESS

5. Creación de restricciones

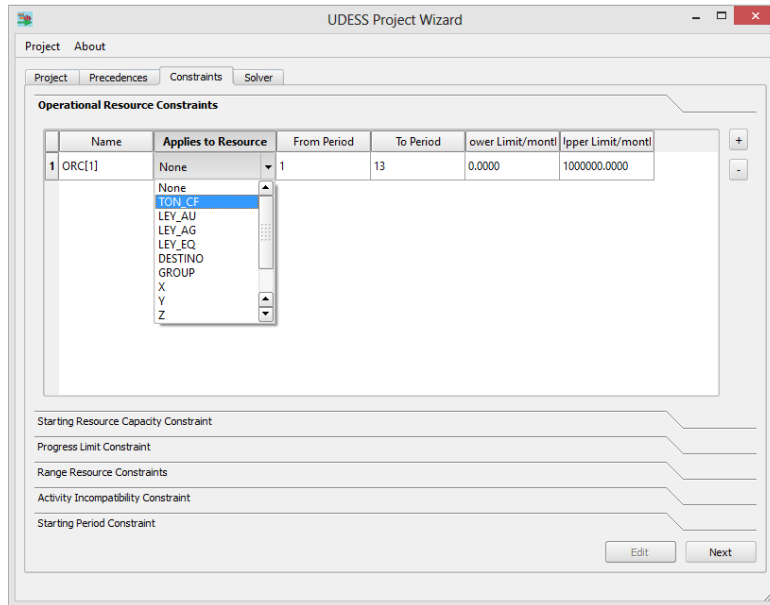


Ilustración 23: Creación de las distintas restricciones pre definidas.

6. Seleccionar solver, método de resolución y Gap

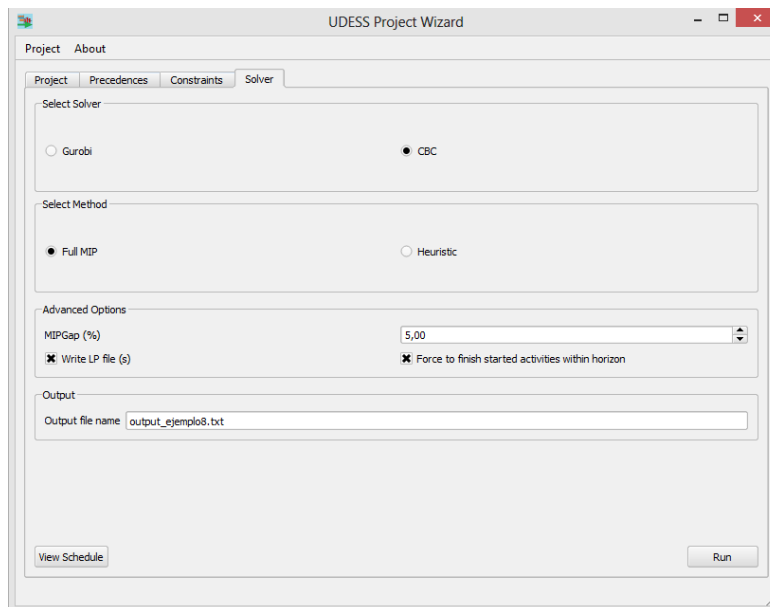


Ilustración 24: Seleccionar modelo de resolución - UDESS

7. Visualización porcentaje de realización por actividad y periodo.

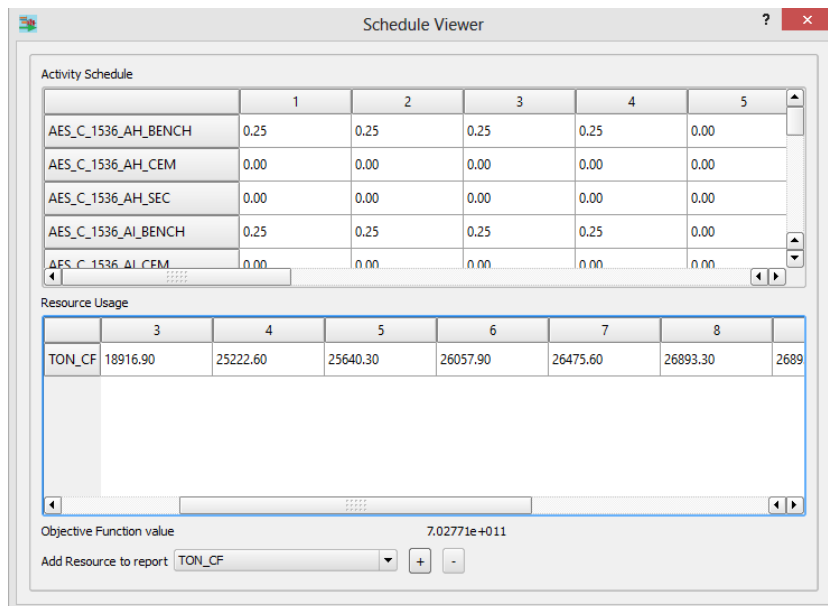


Ilustración 25: Visualización de resultados en porcentaje por y periodo - UDESS

Esto se encuentra explicado en detalle para cada uno de los pasos mencionados en el sitio web del laboratorio Delphos (www.delphos.dmi.uchile.cl) en la sección Software→ Ejemplo y Demos → “Tutorial de UDESS”. Este fue desarrollado por el equipo de trabajo del Laboratorio de Planificación Minera Delphos de la Universidad de Chile.

3.2.4.2 SCRIPTS DE PYTHON

La utilización de Scripts en lenguaje Python es fundamental en la versatilidad que tiene el software y el motivo principal de su utilización en este trabajo de tesis.

Al igual que en el caso anterior se deben cumplir las distintas actividades mencionadas, pero ahora definidas como la ruta de cada uno de los archivos. Estos serán ejecutados por comandos específicos en el script de arranque. Esto permite modificar mediante instrucciones directas algunos de los pasos; en la creación de archivos, en el establecimiento de parámetros, definición de restricciones e incluso iterar el proceso de resolución completo.

En particular en este trabajo se utilizó una iteración del proceso de resolución modificando el archivo de actividades, mediante la interpretación del output generado. De este modo se modificando el archivo inicial de actividades en forma consecutiva para cada iteración hasta cumplir el criterio de término definido. Esto puede ser utilizado en distintos proyectos persiguiendo distintos objetivos para los cuales el método iterativo puede generar un beneficio a la hora de obtener un resultado más preciso.

Se adjunta en Anexo un código de arranque de UDESS desde un script genérico para el desarrollo de un proyecto.

3.3 CONCLUSIONES MODELOS

- Con respecto al Modelo de Peligro Sísmico se considera que su aplicabilidad en el estudio es adecuada dado que se respetan los alcances con los que este fue definido: calibración para eventos sísmicos en el sector Reservas Norte, buen desempeño a la magnitud de detección seleccionada igual 1.5 y probabilidad de Peligro Sísmico Limite igual a 7%. Además las variables operacionales permiten la representación del proceso productivo al generar un programa de producción.
- El software UDESS, otorga la versatilidad de definición de actividades necesarias para la resolución del problema, buen desempeño en problemas de gran cantidad de variables y periodos. Estos último es importante considerando que se definirá una metodología iterativa para minimizar la probabilidad de Peligro Sísmico.
- Finalmente, se logra visualizar la aplicabilidad e interacción entre ambos modelos acoplando entradas y salidas de datos para la creación de planes de producción mediante iteraciones.

CAPITULO 4

METODOLOGÍA

En el siguiente capítulo se expondrá la metodología de resolución abordada para el desarrollo del trabajo. En específico se construye una metodología que permite incluir de forma idónea los modelos mencionados en el Capítulo 3, mediante bloques de análisis e iteraciones. Se muestra a continuación un flujo de decisiones que representa en forma global la secuencia y decisiones que deben ser tomadas al resolver el problema.

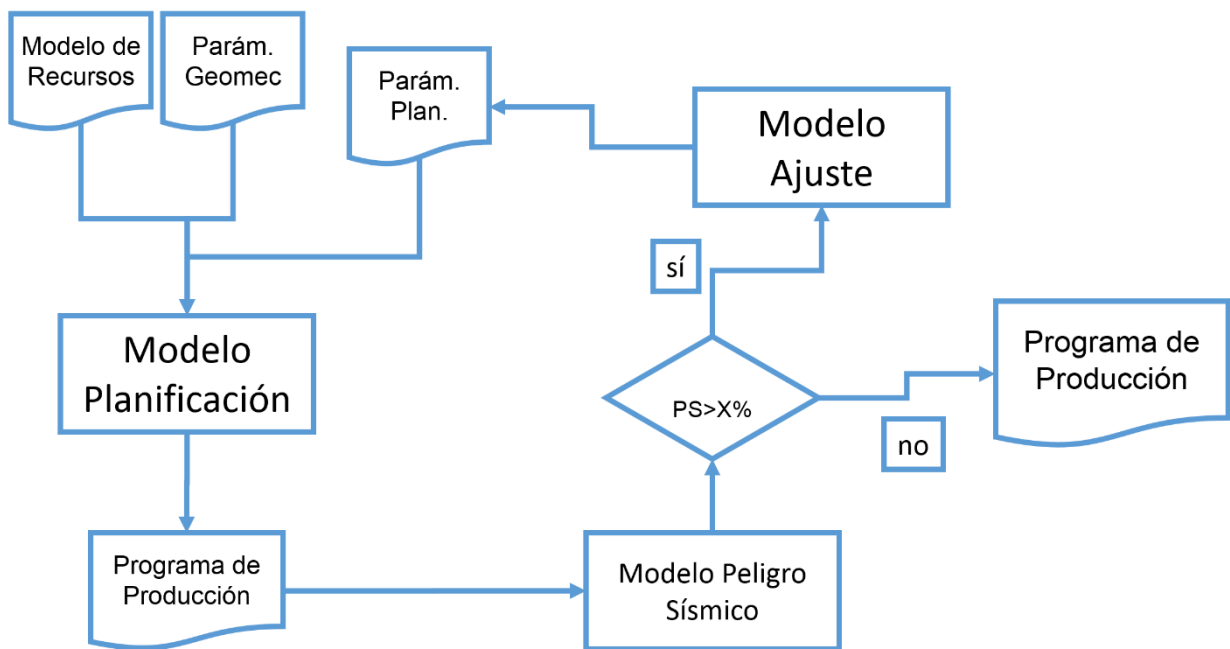


Ilustración 26: Metodología Incorporación del Peligro Sísmico a la Planificación Minera

La metodología planteada se implementó computacionalmente mediante el lenguaje de programación Python 2.7 [44], de modo tal que, el flujo de decisiones e información generada se desarrollase en forma inmediata y secuencial.

La metodología del modelo queda definida a través de los siguientes pasos:

1. Se debe definir un modelo de recursos, compuesto por puntos de extracción y su respectiva columna de mineral asociada.

2. Se deben identificar parámetros geotécnicos del macizo que se busca definir como el P10 o P32, Esfuerzos principal y su ponderación en zona de transición y si fue pre acondicionado con la técnica de Fracturamiento Hidráulico.
3. En base al plan generado por largo plazo, se definen cotas superiores e inferiores para el tonelaje día a extraer por periodo y la incorporación de área.
4. Utilizando los parámetros anteriores se genera un programa de producción, el cual detalle el tonelaje extraído, área incorporada y valor del plan.
5. Se evalúa el plan con el modelo de peligro sísmico determinando para cada periodo si dicha zona presenta una probabilidad mayor al PS_Límite (7%). Si este es mayor en cualquier de las zonas en cualquier de los periodos, el modelo castiga la velocidad de extracción en dicha(s) zona(s). Si no se detecta ninguna el programa de producción es aquel que presenta el mínimo Peligro Sísmico.
6. Si fueron detectadas zonas por periodo mayor al PS_Límite, luego de realizar el castigo, se vuelve a correr el modelo de optimización para generar un nuevo programado de producción. Se retorna al paso 3 y se itera hasta finalizar en 5 sin detecciones.

4.1 OBTENCIÓN BASE DE DATOS

La obtención de una base de datos es una pieza clave al inicio del desarrollo de un estudio o proyecto, ya que de esta dependerán las observaciones y/o conclusiones a las cuales se podría llegar en etapas posteriores.

La metodología propuesta extrae datos desde tres fuentes principalmente, además de las variables de mercado, las cuales sirven para contextualizar la situación actual y futura de las decisiones tomadas.

4.1.1 MODELO DE RECURSOS

Este entrega la cantidad de recursos, la caracterización y presencia de los elementos de valor en el depósito. En general, en minería de Panel Caving se comienza de un modelo de bloques discretizados como bloques regulares, lo cuales posteriormente pasan a formar columnas de mineral dentro de las elipsoides definidas sobre un punto de extracción. Estas columnas se sub-dividen en cotas generando lo que llamaremos

Bancos. De este modo queda definido el tonelaje y porcentaje del elemento de interés que contiene cada uno de los Bancos de un Punto de Extracción.

4.1.2 PARÁMETROS GEOMECÁNICOS:

Se deben determinar los esfuerzos principales y la corrección de estos en la zona de transición asociando las variables definidas en el capítulo 3 (S_{vo} [MPa], L_2 [m], h_s [m]) y así determinar el esfuerzo en la zona de transición o abutment stress S_{va} [MPa].

Se debe estimar la cantidad de vetillas blandas o $[P_{10}]$ en la zona de influencia, sea esta un punto de extracción y su área asociada o el área de una zona asociada al área incorporada en un periodo de tiempo.

Por último, se debe considerar si la zona fue debilitada previamente mediante la técnica de Fracturamiento hidráulico $[FH]$ debido a su favorable efecto en la disminución de la sismicidad inducida al liberar gradualmente la energía acumulada mediante las fracturas inducidas previamente al macizo rocoso.

4.1.3 PARÁMETROS OPERATIVOS

Los parámetros operativos de la minería, marcan la directriz del modelo de optimización que se buscará resolver. En estos se intenta representar la naturaleza del método y las condiciones particulares de una operación. La definición de estas variables en general se realiza en etapas tempranas de un proyecto, sobre todo aquellas que tienen directa relación con la cuantificación de la inversión inicial. Dentro de estos parámetros se mencionan a continuación los de mayor relevancia.

- Capacidad productiva de la operación: representa cuánto se espera produzca una operación para cumplir con un plan de producción dada una flota de equipos, condiciones de interacción con otros procesos, etc.
- Capacidad de incorporación: se define como la cantidad de área que es posible hundir para entrar en producción dada una flota de equipos y las condiciones existentes en la operación.

4.1.4 PARÁMETROS TÉCNICO- ECONÓMICOS

Las variables económicas no son predecibles y representan una incertidumbre importante al momento de considerar un plan de producción. Estas variables son indispensables en el proceso de planificación minera debido a que este busca acercarse al óptimo económico maximizando el valor neto actualizado obtenido de esta evaluación.

Dentro de estos parámetros se deben definir:

- Tasa de descuento
- Precio del elemento de interés
- Costo Mina
- Costo planta
- Costo adicional
- Costo de refinería
- Recuperación metalúrgica

4.1.5 ADQUISICIÓN DE DATOS

Esta información se agrupa en un archivo único, el cual será definido un formato "Inputs_Ejemplo.csv". La información se añade columna a columna por cada parámetro de interés y fila a fila para cada uno de los puntos o bloques definidos.

ID	X	Y	Área	Zona	Ancho	Largo	Hcolm	UCS	P10	P32	Ztopo	Heq	d_insitu	d_espon	losa	hs	FH	Ton	LeyCU[%]
01_31H	1176.9	871.0	261.46	0	158.65	1.65	300	121	8.08	14.7	2884.95	764.95	2.77	2.2	20	3.6	1	57940	0.93%
01_32F	1189.9	880.7	261.53	0	158.65	1.65	300	121	8.08	14.7	2895.31	775.31	2.77	2.2	20	3.6	1	57955	1.04%
01_32H	1172.4	887.7	261.22	0	158.65	1.65	300	121	8.08	14.7	2884.13	764.13	2.77	2.2	20	3.6	1	57886	0.93%
01_33F	1185.4	897.4	261.28	0	158.65	1.65	300	121	8.08	14.7	2894.15	774.15	2.77	2.2	20	3.6	1	57899	0.96%
01_33H	1167.9	904.5	261.22	0	158.65	1.65	300	121	8.08	14.7	2883.17	763.17	2.77	2.2	20	3.6	1	57887	0.93%

Ilustración 27: Ejemplo adquisición de datos

Donde:

- ID: identificador de Unidad Básica de Explotación (UBE)
- X,Y: coordenadas espaciales de la Unidad
- Área [m²]: superficie que define a cada UBE
- Zona: subdivisión en el espacio que agrupa UBEs con características similares
- Ancho [m]: longitud medida entre los límites de cada zona en un periodo de tiempo determinado
- Hcolm [m]: altura de la columna de mineral asociada a la UBE
- P10 [1/m]: cantidad de vetillas blandas en un metro
- Heq [m]: altura equivalente, se refiere a la columna de roca sobre la definición de la UBE, el término equivalente indica que este en general se calcula como la carga de mineral primario, secundario o fragmentado, los cuales tienen densidades distintas

- D_{insitu} [kg/m^3]: densidad como propiedad de la roca en forma natural
- D_{espon} [kg/m^3]: densidad que considera la fragmentación de la roca, es decir, se forman volúmenes de material distinto entre los fragmentos
- $Losa$ [m]: característica intrínseca de la variante del método Panel Caving utilizada, se refiere a la distancia que existe entre el avance del frente de extracción y el de socavación
- H_s [m]: altura de socavación, se define como la extensión vertical de la socavación a realizar sobre las UBE para inducir la fragmentación de la roca subyacente
- FH : evidencia si existió debilitamiento previo mediante el uso de Fracturamiento Hidráulico (1) o si no lo hubo (0)
- Ton [Ton]: tonelaje contenido en la dimensión de la UBE
- Ley [%]: porcentaje que representa el tonelaje del elemento de interés por sobre el tonelaje total de la UBE

4.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN

El problema de optimización se resolverá con el software UDESS, el cual fue expuesto en el Capítulo 3, el cual incorpora un modelo de programación lineal mixto para resolver un problema de maximización del Valor Presente Neto (VPN).

Como fue mencionado el problema de optimización en UDESS debe ser definido por un set de actividades las cuales interactúan entre sí mediante precedencias y restricciones globales características del problema.

A continuación se define en forma genérica los pasos a seguir al abordar un problema de planificación minera de Panel Caving con el software.

4.2.1 DEFINICIÓN DE ACTIVIDADES

Las actividades que representen las UBEs del método Panel Caving pueden ser abordadas como áreas definidas que contengan un número definido de puntos o bien a nivel de puntos de extracción. En cada uno de estos casos se definirán dos grupos de actividades por cada UBE, una que represente la preparación minera a realizar para incorporar dicha unidad y actividades de extracción que representan el tonelaje contenido en la unidad posible de ser extraído. Estas últimas pueden ser subdivididas en tantos bancos como uno desee considerando que cada actividad aumentará el número de variables que deberá considerar el modelo al momento de resolver.

Estas actividades tienen ciertos atributos, algunos indispensables para la resolución y otros auxiliares. A continuación se detalla el cálculo de cada una de estas para las actividades de un método Panel Caving.

1. ID: se denotarán como Zona [I]-D[J]-B[K]-PREP o PROD, donde I es el número de zonas, J el número de puntos considerados por zona, K el banco de la columna que representa
2. INCOME: el cálculo del ingreso se realiza mediante la siguiente fórmula, este aplica sólo a las actividades de definidas para ser extraídas considerando el elemento de valor

$$\text{Ingreso} = \text{Tonelaje} * ((\text{Precio} - \text{Cventa}) * \text{Ley} * \text{RecM} * 2204.6) - (\text{Cmina} + \text{Cplanta} + \text{Cadicional})$$

3. COST: considera el costo en dólares de preparar una unidad de área.
4. MAX_RATE:
 - a. Actividades de extracción esta hace referencia a velocidad de extracción máxima a la cual puede ser sometida, esta se calcula como el tonelaje máximo a extraer por unidad de área en un día y se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Max}_{rate_PROD} = \frac{\text{VextMax} * \text{ÁreaUBE} * \text{días}_{periodo}}{\text{Tonelaje UBE}}$$

- b. Actividades de preparación se considera como el número de UBE que pueden ser incorporadas en un periodo o un área definida en metros cuadrados.

$$\text{Max}_{rate_PREP} = \frac{\text{ÁreaMaxIncorporación}}{\text{Área UBE}}$$

5. MIN_RATE: En formulación es homologa al Max_rate, pero hace referencia al mínimo porcentajes de realización de dicha actividad en un intervalo de tiempo.
6. TONELAJE: Cuantifica el tonelaje contenido en la UBE, se debe diferencia entre el tonelaje total de la UBE y si las subdivisiones en banco, donde el tonelaje asignado corresponde al tonelaje por el porcentaje que represente el banco del total de la columna. Esta se considera sólo para las actividades de extracción
7. TON_ZONA*: Es útil en la definición de restricciones de capacidad productiva por zona, definir columnas con asignación de tonelaje sólo al pertenecer a dicha zona.

8. AREA_INC: cuantifica el área que se incorporaría de realizarse dicha actividad.
9. AINC_ZONA*: Al igual que el tonelaje, facilita la definición de restricciones de capacidad de preparación en una zona.

4.2.2 DEFINICIÓN DE RESTRICCIONES DE PRECEDENCIAS

Las restricciones del tipo precedencias permiten establecer una secuencia lógica de desarrollo para las actividades que se busca realizar.

En la aplicación del concepto para actividades del método Panel Caving se define las siguientes restricciones:

1. PREP-PREP: Esta refiere que para preparar la UBE (i+1), la actividad UBE (i) debe haber sido desarrollada.
2. PREP-PROD: Define la secuencia lógica, en la cual, para extraer mineral de una UBE, esta debe haber sido preparada en forma previa.
3. PROD-BANCO: La definición de esta restricción busca respetar la extracción secuencial de una UBE, extrayendo en principio el banco inferior de la columna y al completar la actividad continuar con el banco superior.

4.2.3 DEFINICIÓN DE RESTRICCIONES GLOBALES

Las restricciones globales son todas aquellas que buscan describir el comportamiento o naturaleza de un método de explotación. Estas restricciones tienen por objeto delimitar inferior y superiormente los parámetros operativos que deben ser alcanzados para el problema definido.

El set de restricciones disponibles en el software fue descrito en el Capítulo 3. De estas, las utilizadas son aquellas que permiten acotar recursos operacionales y la de límite de completitud de actividades.

En problemas de Planificación Minera, como el abordado en este trabajo, es usual definir las siguientes restricciones:

1. Capacidad de Incorporación: Delimita la cantidad mínima y máxima que es factible incorporar considerando la naturaleza del método y el comportamiento del macizo

rocoso, como también la capacidad operativa para cumplir con dicha incorporación.

2. Capacidad de Producción: Delimita la cantidad mínima y máxima que es factible extraer dada las condiciones de operación y las proyecciones definidas en etapas previas del proceso de planificación.

4.2.4 RESOLUCIÓN

Finalmente, se procede a resolver el problema de optimización en el cual se busca obtener el agendamiento de las actividades definidas, de manera tal que estas representen un plan de producción para un método de Panel Caving.

Para la resolución del problema en UDESS se utilizará como motor de optimización Gurobi [39], el cual otorga licenciamiento ilimitado para fines académicos.

Con respecto a la modalidad de resolución, se utilizará la heurística de ventanas descrita en la descripción de UDESS, utilizando periodos discretizados según el número de periodos del problema completo. Además se exigirá un GAP del 5% como mínimo criterio de error en los casos a desarrollar.

Finalmente, se obtiene un archivo de salida, el cual representa una carta Gantt donde se especifica los porcentajes de realización por actividad en cada uno de los periodos analizados.

4.3 EVALUACIÓN PELIGRO SÍSMICO E ITERACIONES

El planteamiento expuesto en la sección anterior representa en forma global, como se podría definir el problema, representando así una guía para la conceptualización de un problema para un método de Panel Caving.

Para la definición del problema a resolver en el presente trabajo es necesario destacar los siguientes aspectos:

- El problema se resuelve considerando una UBE como un punto de extracción.

- La asignación a una zona está determinada por aquellos puntos que geográficamente resulten estar dentro de los límites definidos para cada una de ellas.
- La escala temporal utilizada para resolver será de 3 meses por periodos, esto dado que el modelo de Peligro Sísmico así fue definido en su calibración.
- El avance de un frente en forma unitaria, se calcula dividiendo el área que representa un punto sobre el ancho de la zona determinada. El avance global se considera como la suma del avance promovida por cada uno de los puntos incorporados en una zona en determinado periodo.

4.3.1 PELIGRO SÍSMICO

El peligro sísmico será evaluado a partir de las 5 variables definidas en su descripción, estos son: velocidad de avance del frente, velocidad de extracción media, P10, Esfuerzo Abutment y realización de FH.

Una vez obtenida la carta Gantt con las tasas de progreso por cada actividad, se procede a calcular las variables operativas necesarias para el cálculo del PS. Se calcula el tonelaje extraído por periodo, el área incorporada, a partir de estos se calculan las variables operativas de la siguiente forma:

- Velocidad de Avance del Frente [m]: Se consideran todos los puntos incorporados para una zona determinada durante un trimestre.
- Velocidad de extracción media [tpd/m2]: Se considera el cálculo de una velocidad de extracción para cada punto, para luego ser promediada con todos los puntos activos en una zona correspondientes al mismo banco en un determinado trimestre.

Las variables geotécnicas se calculan como el promedio entre las variables asociadas a los puntos en los cuales se extrajo mineral en una zona (D donde d representa una sub-zona por periodo) para un determinado periodo de tiempo. Esto se aplica para las variables P10, Sva y FH, las cuales se calculan en forma genérica del siguiente modo:

$$\text{Si } V_{ext} \geq 0.01 \rightarrow \frac{\sum_d^D \text{Variable Geotécnica}_{(\text{Banco,Zona,Periodo})}}{\sum_d^D \text{Zonas} \geq 0.01}$$

4.3.2 CONDICIÓN DE ITERACIÓN

La condición de iteración en este trabajo se definirá como aquella que sobrepase la probabilidad definida como límite para el peligro sísmico. Esto podría ser modificado si el objeto de estudio fuese otra interferencia operacional en la que existan variables que puedan ser debidamente controladas mediante el problema de optimización planteado.

La formulación de esta es la siguiente:

$$PS_{(Banco,Zona,Periodo)} \geq PS_{límite} \rightarrow Nueva Iteración$$

Pasando a la formulación de un nuevo problema de optimización y su posterior resolución recursivamente hasta que en la evaluación del peligro sísmico no se detecten zonas en que sobrepasen el $PS_{límite}$.

4.3.3 MODELO DE AJUSTE

Al ser detectada dicha probabilidad para una zona y periodo, se pueden adoptar múltiples estrategias de castigo a las variables definidas como atributos de actividades del problema.

La estrategia adoptada en este trabajo como Modelo de Ajuste consiste en castigar la velocidad de extracción media permitida en una zona y banco, es decir a cada punto de extracción dentro la zona definida, independiente el periodo en el que este se detecte. Esto porque si la disminución fuese focalizada a un periodo, crecería considerablemente el número de iteraciones a realizar y no respetaría los criterios usualmente usados en la operación en la cual se establecen velocidades medias a nivel de sector.

El castigo se formula a una tasa fija de disminución en el porcentaje de realización de cada actividad como MAX_RATE, la cual se muestra a continuación:

Si $PS_{(Banco,Zona,Periodo)} \geq PS_{límite}$ se redefine MAX_RATE como

$$Max_{rate(Banco,Zona)} = \frac{VextMax * ÁreaPunto * días_{periodo} * Disminución}{Tonelaje Banco}$$

$$\forall \text{ punto de extracción } \in D$$

Se decide no castigar la tasa de incorporación debido a que esta variable se encuentra acotada por la mínima y máxima capacidad de incorporación de área, la cual ajusta esta variable a aquella definida por la operación. Sin embargo considera la flexibilidad que al ser considerado un rango, esta se ve directamente influenciada por el parámetro de decisión de la velocidad de extracción media por zona y banco dado que, a menor velocidad de extracción es necesaria una mayor área abierta para cumplir con la producción deseada.

Con esta modalidad de castigo se busca que la ocurrencia y probabilidad promedio por Banco-Zona, disminuya secuencialmente con el avance de las iteraciones obteniendo así dos resultados posibles, uno en el que el riesgo sísmico no logra ser controlado dado el $PS_{límite}$ establecido debido a que el rango de los parámetros de variables de decisión no logran cumplir las restricciones de capacidad y otro en el cual se logra controlar la probabilidad de peligro sísmico y se obtiene un plan de producción que se ajusta a las capacidades pre-establecidas.

CAPITULO 5

ESTUDIO DE CASOS

El estudio de casos consiste en la aplicación de la metodología antes propuesta en escenarios representativos de una mina real con variaciones según la forma de abordar el problema y estudios de variables en escenarios generados a partir de estos.

Los datos utilizados en esta sección fueron obtenidos gracias a la contribución realizada por la Superintendencia de Planificación Minera de la División El Teniente (DET), CODELCO. Estos corresponden en su totalidad a la mina Reservas Nortes (RENO) en el cual fue calibrado el modelo de Peligro Sísmico en el estudio realizado por la consultora GMT [1].

5.1 MINA RENO

La mina El Teniente se ubica en la zona precordillerana en la Comuna de Machalí, Provincia del Cachapoal, en la Región del Libertador Bernardo O'higgins, a 50 km al noreste de Rancagua, en las coordenadas 34°05' Latitud Sur y 70°21' Longitud Oeste, a una altura entre los 2000 y 2700 sobre el nivel del mar. Es uno de los depósitos de pórfidos cupríferos más grandes del mundo con un Cu total estimado en 93,5 Mt (17.6756 Mt, 0.558% de Cu) y el mayor producto a nivel mundial de cobre fino por año con 450 mil toneladas métricas.

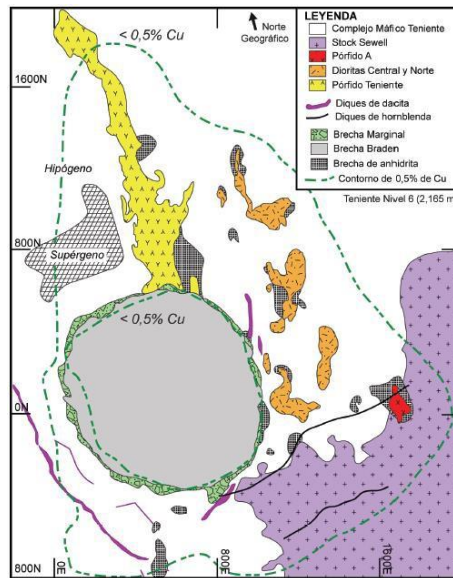


Ilustración 28: Mapa geológico del Yacimiento El Teniente

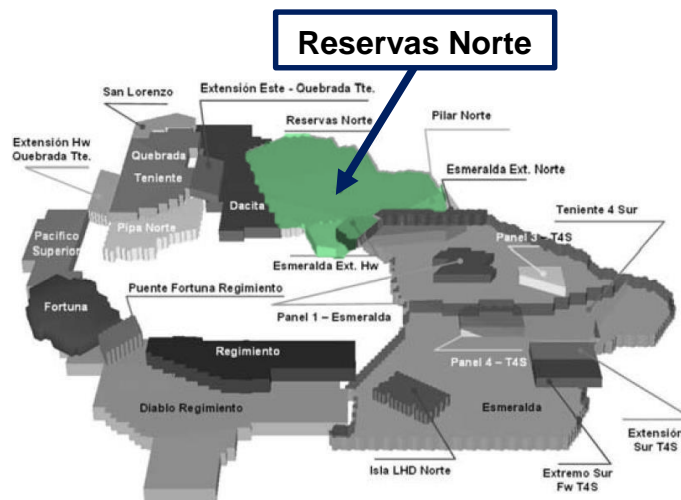


Ilustración 29: Vista en planta superpuesta a una misma cota de los sectores productivos de la Mina El Teniente

La información utilizada para esta tesis se enmarca en los estudios realizados a nivel de Sustento del Plan Exploratorio la mina RENO y aquellos entregados por profesionales de la Superintendencia de Planificación (SPL) de la División El Teniente (DET). La mina RENO se encuentra al Norte del yacimiento y corresponde a una extensión de Teniente Sub-6 al Norte desde el Área Invariante. Este limita en el Sur con el Sector Pilar Norte y al Oeste con el Sector Dacita.

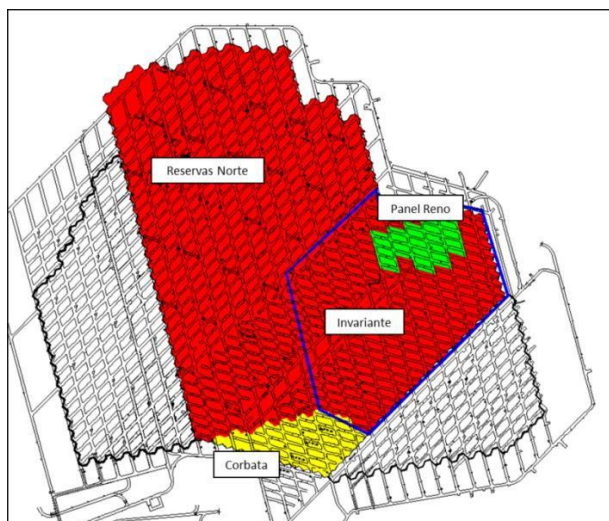


Ilustración 30: Vista en planta de los subsectores que conforman la mina RENO

Las reservas extraíbles para el sector están definidas en torno a 93 Mt de mineral con una ley media de 0.96%CuT y 0,020% de Molibdeno. La variante del método Panel Caving utilizada es el Hundimiento Avanzado, donde la extracción se realiza desde un nivel de producción por Equipos LHD de 7 [yd³], que transportan el mineral hacia piques de traspaso donde este es recibido en el nivel de transporte, donde este es cargado en camiones de 72 [Ton] y 80 [Ton] para ser descargado finalmente en el nivel de transporte principal de ferrocarriles en el nivel Teniente 8.

El sector RENO, actualmente se encuentra en su etapa final de régimen, tiene planificada una producción media de 40 [Ktpd] entre los años 2015 y 2016, para posteriormente decrecer hasta las 10 [Ktpd] en el año 2025, en el cual se vería involucrado en la subsidencia del PNNM, este sector se conforma por los subsectores Invariante, Andesita y Corbata, además de un panel ubicado en una cota inferior en 18 [m] del nivel de producción.

5.1.1 CRITERIOS DE PLANIFICACIÓN

- Los criterios de planificación para la mina RENO son los siguientes:
- Conexión al 30% de extracción de roca u 80 [m] de la columna extraída en el caso de columnas mayores a 270[m].
- Disponibilidad de área:
 - Zona de quiebre: 75%
 - Zona de Régimen: 80%
- Tasa de extracción
 - Inicio Quiebre [30%]: 0.28 [tpd/m²]
 - Final Quiebre [>30%]: 0.65 [tpd/m²]
- Incorporación de área máxima: 1700[m²]

5.2 CONSIDERACIONES GENERALES

En la siguiente sección se describe en forma breve cómo fueron obtenidos de manera genérica los parámetros a utilizar en cada uno de los casos, los cuales en la medida que sean desarrollados se entregarán con mayor detalle en relación a las situaciones particulares.

5.2.1 DEFINICIÓN DE ZONAS

Las zonas utilizadas son las definidas por el informe de GMT [1], las cuales resultan ser muy similares a aquellas definidas por la Superintendencia de geomecánica en DET. Esto se puede observar en las ilustraciones a continuación mostradas.

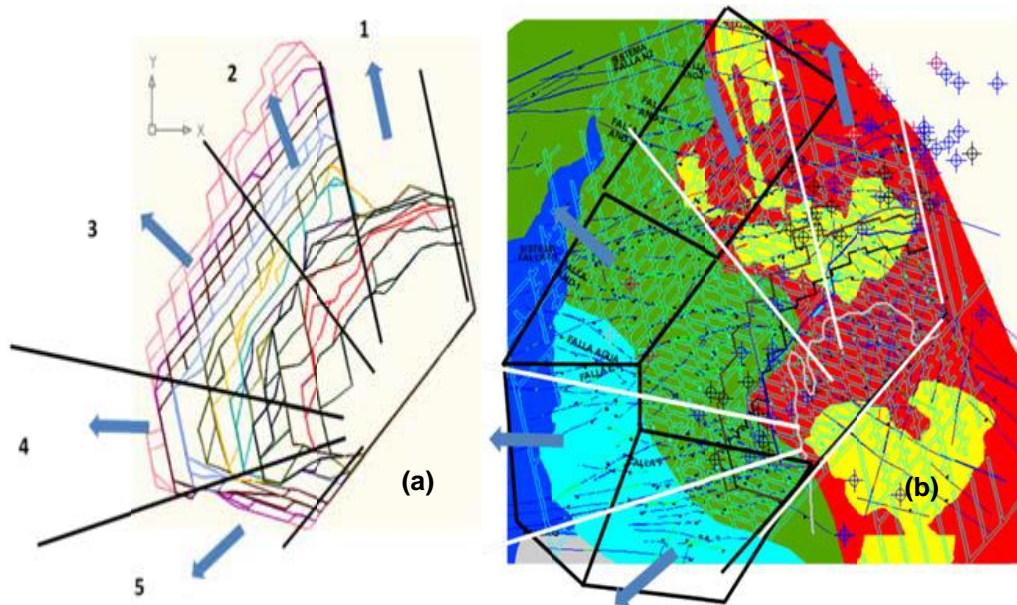


Ilustración 31: (a) se identifican las cinco zonas de análisis para la mina RENO [1]; (b) Se identifica la superposición de las zonas definidas por el GMT versus aquellas definidas por SGM-DET.

Estas conforman un set de 5 zonas que cubren en forma íntegra la distribución de los puntos de extracción definidos para la mina RENO. Estas zonas se definen agrupando características de la roca principalmente, lo cual permite estudiar el desempeño de un set de parámetros frente a otro y predecir con cierto grado de precisión el comportamiento que tendrá el macizo al entrar en producción.

Estos sectores, con el objetivo de llevar un mejor control del ancho del frente de incorporación, se re-definieron dividiéndolos en sub-zonas de análisis respetando los límites laterales inicialmente definidos obteniendo así las delimitaciones mostradas a continuación:

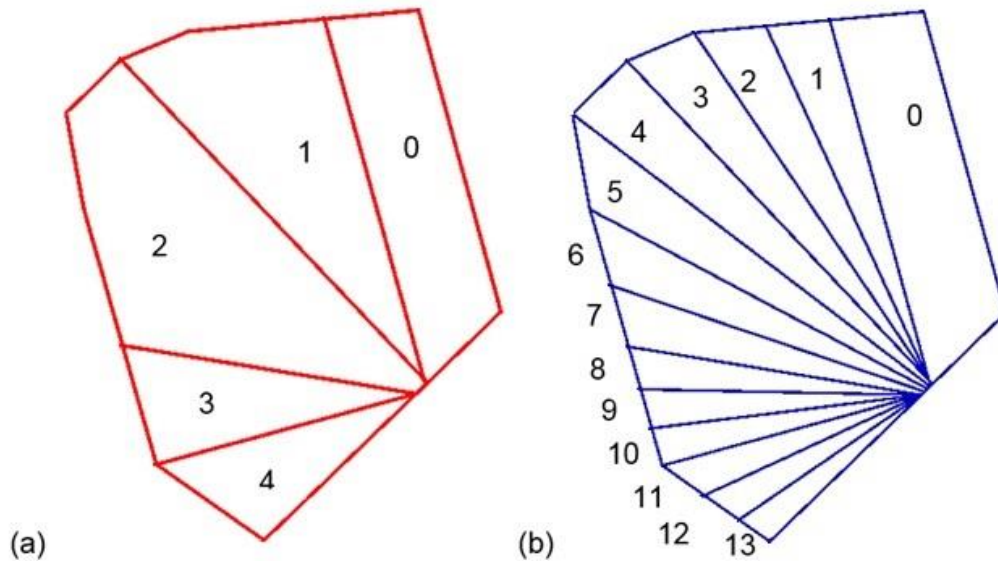


Ilustración 32: Vista en planta de la delimitación zonas utilizadas (a) 5 Zonas; (b) 14 Zonas

5.2.2 PUNTOS CONTENIDOS EN ZONAS

La clasificación de los puntos que se considerarán dentro de cada uno de los polígonos de cada zona se determinará mediante un algoritmo definido en Python 2.7 [44], el cual considera un archivo de extensión “.csv” con el ID de cada uno de los puntos y conjunto de Polígonos que permiten determinar si el punto pertenece o no a cada uno de estos. El archivo de salida se incorpora al archivo de Inputs utilizado para cada caso en una de las columnas de información.

5.2.3 ALTURA EQUIVALENTE

El cálculo de la altura equivalente se realizará midiendo la distancia existen entre los puntos de extracción definidos por coordenadas X, Y y Z hasta su intersección con la topografía de la zona.

Se utilizó la herramienta “register” de Vulcan, el cual fue facilitado por la Superintendencia de Planificación en DET, para determinar la coordenada Z de los puntos de extracción, el procedimiento consiste en proyectar en superficie las coordenadas X,Y de los puntos hasta intersectar con la triangulación de una topografía entregada, obteniendo así un set de puntos que pueden ser exportados en formato “.csv” del cual será extraídas dichas

cotas para ser restadas a la cota inicial de los puntos, representada por la cota a la cual se encuentran el Nivel de Producción de la Mina.

A continuación se muestran imágenes representativas del procedimiento utilizado:

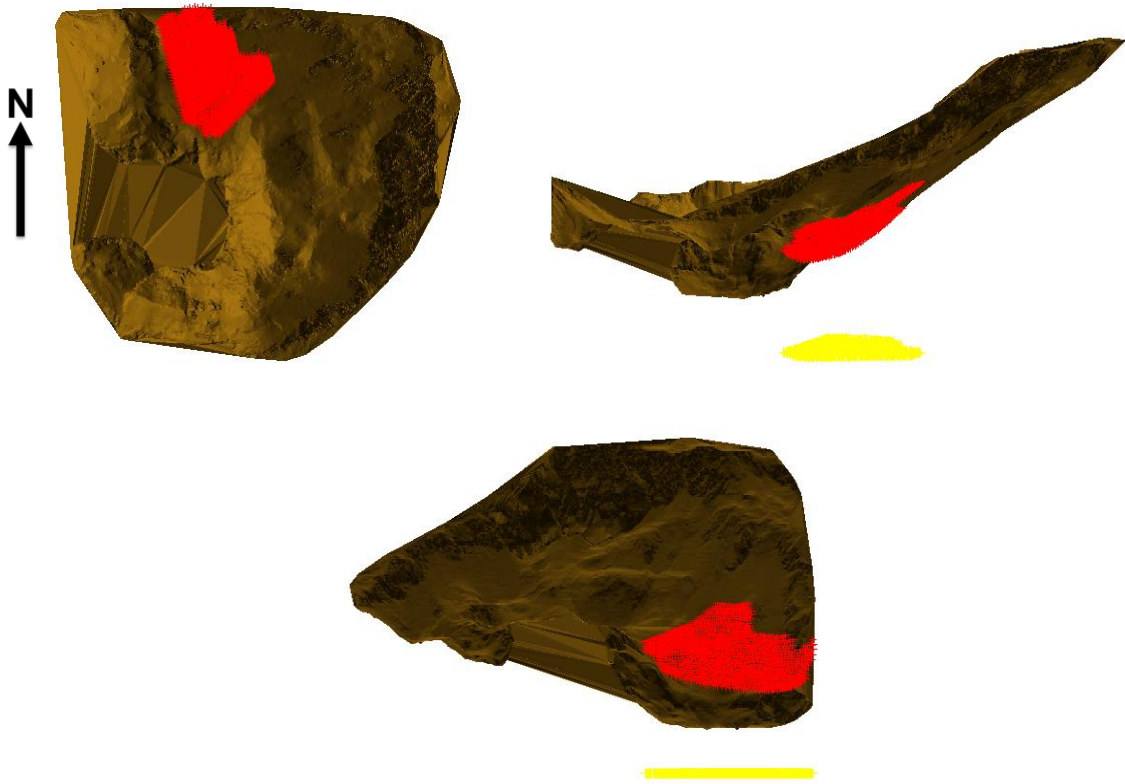


Ilustración 33: Vistas en planta e isométricas de la representación del procedimiento para calcular la distancia entre un punto de extracción y superficie

5.2.4 ESTIMACIÓN P10

El cálculo del P10 para cada punto fue determinado con el algoritmo desarrollado en el informe PSPEX, el cual se encuentra hoy implementado en Python 2.7 como parte del trabajo de Tesis del Alumno Gonzalo Pizarro Bore, el cual colaboró en la definición de este parámetro para los casos PND 2014-2018 y GENÉRICO, de los cuales no se tenía información completa para todos los puntos involucrados dada la temporalidad del estudio realizado por GMT. El algoritmo genera una discretización extensa de puntos para un determinado parámetro, luego identificando se busca identificar los puntos de dicha discretización que se encuentren contenidos en un determinado polígono. La

ponderación de la información contenida por cada uno de dichos puntos es la que determina el valor otorgado a una zona determinada.

5.2.5 CONDICIÓN INICIAL

La condición inicial definida en cada uno de los casos definidos busca replicar la naturaleza de un método Panel Caving y en particular, respetar la condición de alcance del modelo de peligro sísmico, el cual considera una unidad productiva de Panel Caving en régimen como base del estudio.

Para esto se define los siguientes parámetros:

- Área abierta inicial: es aquella que se encuentra actualmente abierta y de la cual puede ser extraído mineral.
- Altura de columna: representa la altura promedio remanente del área abierta.
- Ley media: representa el porcentaje del elemento de valor contenido en volumen definido por el área abierta y altura de columna.
- Disponibilidad de área: es el porcentaje de área abierta disponible para extraer.

Los parámetros seleccionados como iniciales en cada uno de los casos se desprenden del estudio realizado a los planes de producción PND 2014-2018 entregados por la Superintendencia de Planificación en DET. Estos se toman como referencia para el resto de los casos en los cuales no es posible determinar estos parámetros en forma acertada.

Tabla 1: Parámetros productivos iniciales a partir del plan PND 2014-2018 SP-DET

Parámetros Iniciales		
Área Abierta	80,000	[m ²]
Altura Remanente	250	[m]
Ley media	1.16	[%]
Disponibilidad de Área	85	[%]
Vext media	0.4	[tpd/m ²]

5.2.6 PARÁMETROS ECONÓMICOS

Los parámetros usados para definir el beneficio de los planes generados son comunes a los casos de desarrollados. Estos fueron recomendados por la Superintendencia de Planificación en DET y se presentan a continuación en forma resumida.

Tabla 2: Parámetros Económicos Casos A, B y C

Parámetros Económicos		
Precio Cu	2.4	[USD/lb]
Costo Mina	8	[USD/ton]
Costo Planta	10	[USD/ton]
Costo Adicional	1	[USD/ton]
Descuento Conc.	0.5	[USD/lb]
Costo Incorporación	3,500	[USD/m ²]
Rec.Metal	88	[%]
Tasa descuento	8	[%]

5.3 CASO A: “PSPEX”

El Caso A o “PSPEX” se enmarca en el desarrollo del informe realizado por GMT [1] en el cual se utilizaron datos históricos de la mina RENO entre los años 2000-2013. De este modo se busca definir los parámetros necesarios para describir el set de actividades para ingresar al software UDESS y generar un plan de producción acorde a los parámetros operacionales de la mina RENO.

5.3.1 ANTECEDENTES DEL PROBLEMA

En esta sección se definirá la obtención de los parámetros seleccionados para la creación del archivo actividades de UDESS:

El conjunto de puntos disponibles para incorporar se definieron en base al catálogo de extracción utilizado en el Informe PSPEX. Su incorporación se definió como el momento en el tiempo en el cual estos registran extracción de mineral por primera vez y se registró el año en el cual estos fueron incorporados. Esto permite al modelo replicar la cantidad de puntos que fueron incorporados en un determinado periodo de tiempo, es decir, si se define un problema que busque resolver el periodo de 5 años comprendidos entre el año 2006-2010 este seleccionará el total de puntos para dicho rango, pero sin la obligación que se incorporen año a año del mismo modo que se hizo en la operación.

Las zonas utilizadas corresponden a las definidas anteriormente en la sección 5.2.1 abarcando 14 zonas. Estas contienen un total de 672 puntos de extracción disponibles a ser incorporados en los distintos periodos.

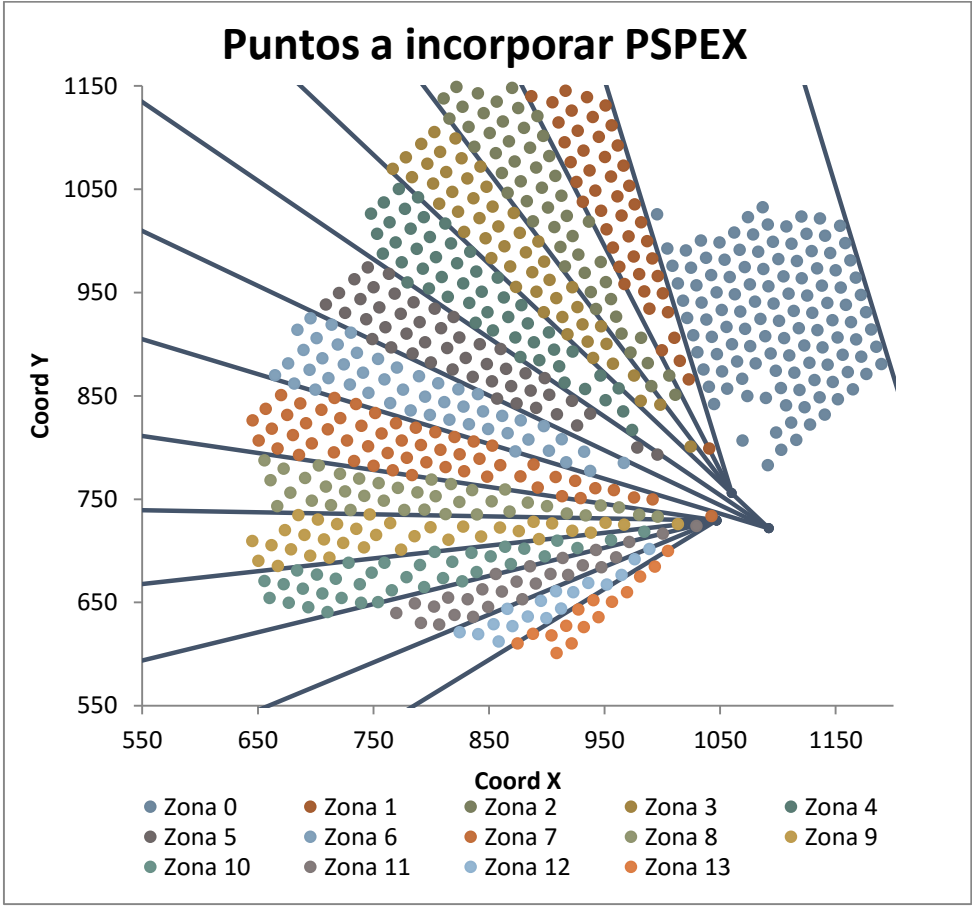


Ilustración 34: Puntos disponibles a incorporar PSPEX

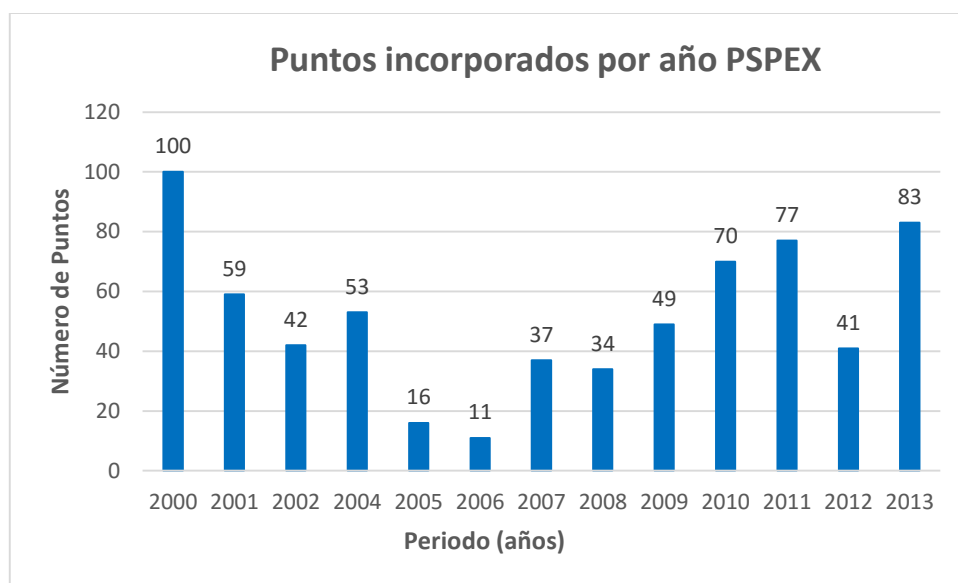


Ilustración 35: Gráfico de puntos de extracción incorporados por año en el caso PSPEX

Se observa una cantidad considerable de puntos de extracción en el año 2000, lo cual se explica porque no es posible detectar en forma certera los puntos incorporados o remanentes en dicho periodo, por lo tanto, este periodo se excluye del análisis.

El ancho de frente considerado para cada sector se extrajo del desarrollo del informe PSPEX, en el cual se registra el ancho promedio para cada una de las zonas por año, el cual se presenta a continuación:

Tabla 3: Ancho del frente de incorporación en metros por zona y año - Caso A

Zona	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
0	159	158	158	158	157	158	158	161	165	166	165	165	165	165
1	23	30	35	36	37	39	40	45	51	55	62	66	69	71
2	23	30	35	36	37	39	40	45	51	55	62	66	69	71
3	23	30	35	36	37	39	40	45	51	55	62	66	69	71
4	35	42	53	54	56	59	60	62	68	72	80	87	89	94
5	35	42	53	54	56	59	60	62	68	72	80	87	89	94
6	35	42	53	54	56	59	60	62	68	72	80	87	89	94
7	14	17	24	27	31	32	33	35	37	42	49	53	53	57
8	14	17	24	27	31	32	33	35	37	42	49	53	53	57
9	14	17	24	27	31	32	33	35	37	42	49	53	53	57
10	19	23	28	35	58	54	50	57	62	71	74	72	75	75
11	19	23	28	35	58	54	50	57	62	71	74	72	75	75
12	19	23	28	35	58	54	50	57	62	71	74	72	75	75
13	19	23	28	35	58	54	50	57	62	71	74	72	75	75

5.3.2 VARIABLES Y RESTRICCIONES DEL PROBLEMA

Se presenta a continuación el set de parámetros que deben ser establecidos para resolver el problema planteado, subdivididos en parámetros técnicos y de planificación

5.3.2.1 CASO A1: “PSPEX 2009-2013”

Tabla 4: Parámetros Técnicos Caso A

Parámetros Técnicos		
Altura de Columna	300	[m]
Bancos	2	u
B0 (80m)	26.7	[%]
B1 (220m)	73.3	[%]
PS Límite	7	[%]

Tabla 5: Parámetros de Planificación Caso A

Parámetros de Planificación		
Vext Máx.	0.65	[tpd/m ²]
Producción Mín.	24	[Ktpd]
Producción Máx.	38	[Ktpd]
Incorporación Mín.	500	[m ²]
Incorporación Máx.	1600	[m ²]
Número Periodos	20	[trimestres]

Las restricciones de precedencia en este caso fueron las definidas en la sección 4.2, las cuales no sufrieron modificaciones en la resolución de este.

5.3.2.2 CASO A2: “PSPEX 2006-2013”

Tabla 6: Parámetros Técnicos Caso A

Parámetros Técnicos		
Altura de Columna	300	[m]
Bancos	2	u
B0 (80m)	26.7	[%]
B1 (220m)	73.3	[%]
PS Límite	7	[%]

Tabla 7: Parámetros de Planificación Caso A

Parámetros de Planificación		
Vext Máx.	0.65	[tpd/m2]
Producción Mín.	24	[Ktpd]
Producción Máx.	38	[Ktpd]
Incorporación Mín.	500	[m2]
Incorporación Máx.	1700	[m2]
Número Periodos	32	[trimestres]

Las restricciones de precedencia en este caso fueron las definidas en la sección 4.2, las cuales no sufrieron modificaciones en la resolución de este.

Se definió como restricción global al problema la obligación de incorporar los puntos identificados para los periodos definidos a analizar, es decir, si en la base de datos para el rango 2009-2013 existen 350 puntos que fueron incorporados. Estos se exigirá deban ser incorporados al resolver el problema de optimización, pero no necesariamente en el mismo periodo en cual fueran ingresados en la realidad.

5.4 CASO B: “PND 2014-2018”

En el Caso B o “PND 2014_2018” se utilizarán como bases los documentos de planificación entregados por la Superintendencia de Planificación-DET. Estos fueron los siguientes archivos en formato “.csv”:

- Salida PND 2015 Reno (Dic2014)_punto_ton.csv
- Salida PND 2015 Reno (Dic2014)_punto_altura.csv
- Salida PND 2015 Reno (Dic2014)_punto_ley.csv

El objetivo de este nuevo caso de estudio es cuantificar de incorporación de puntos de extracción, secuenciamiento y velocidades de extracción media por zona que permita situarse bajo el umbral de $PS_{límite}$ establecido. Esto mediante la obtención de un plan de producción mediante la metodología planteada en secciones anteriores.

5.4.1 ANTECEDENTES DEL PROBLEMA

En este caso el conjunto de punto disponibles a incorporar se determinó haciendo un barrido de los archivos entregados y determinando cuales de estos no presentaban registro de altura acumulada en el periodo de inicio, es decir, aquellos en cero (0). El resto de los puntos fueron considerados ya incorporados y denominados remanentes, con el objeto de calcular los parámetros mencionados en la sección 5.2 como condición inicial.

Se considera para la definición de zonas, aquella compuesta por 14 zonas de análisis. A diferencia del caso A, no se define un número de puntos por año incorporados, ya que esto aún no ha sido realizado en la operación. Sólo se toma el número total de puntos posibles de incorporar el cual es de 384 y se encuentran distribuidos en las zonas definidas como se muestra a continuación:

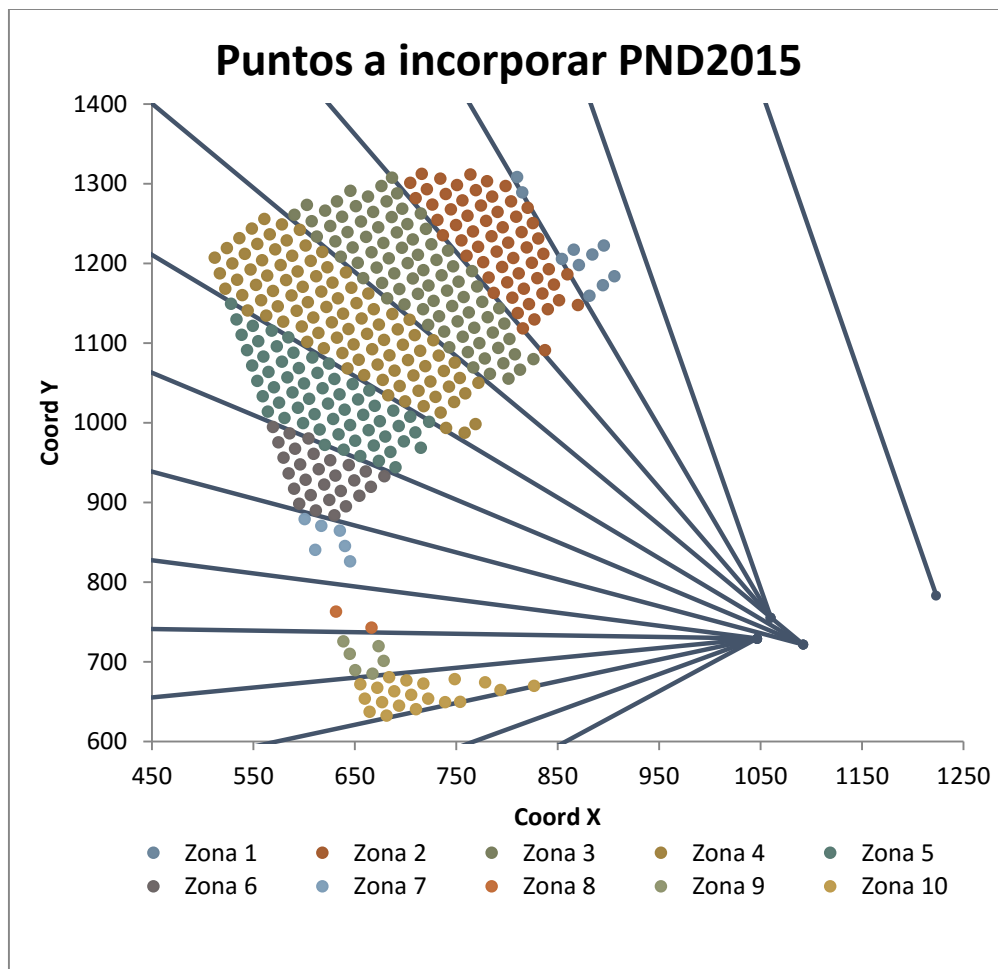


Ilustración 36: Puntos a incorporar Caso B

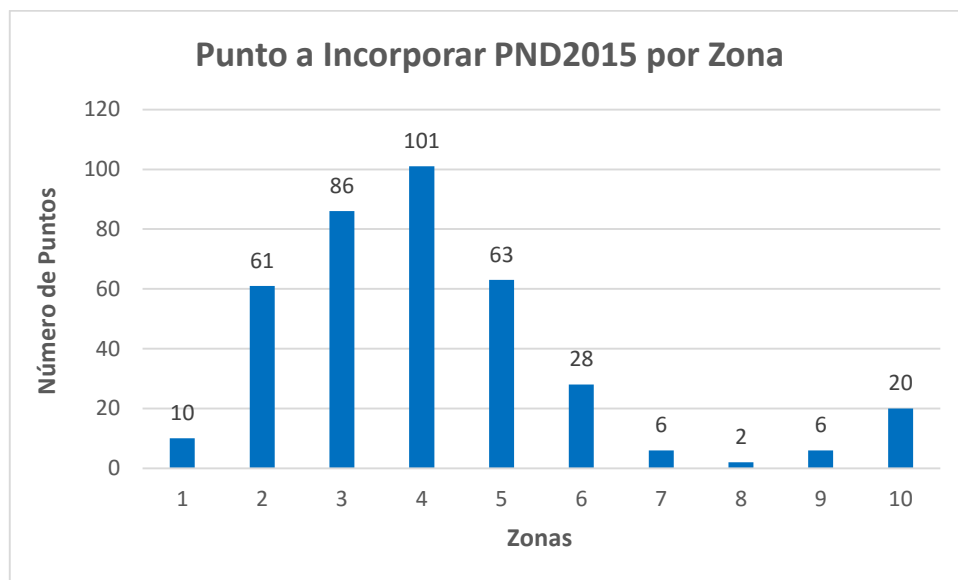


Ilustración 37: Puntos a incorporar por zona Caso B

El ancho de los frentes de incorporación se definió en forma global tomando el ancho mínimo en aquellas zonas con incorporación de puntos y el ancho máximo detectado de este en los extremos de cada zona. Se presenta a continuación una tabla con cada uno de estos parámetros.

Tabla 8: Ancho de frente de incorporación por zona Caso B

Zona	Mín.	Máx.	Promedio[m]
0	165.0	165.0	165.0
1	38.6	81.3	60.0
2	45.9	99.4	72.7
3	47.2	109.5	78.3
4	54.8	122.5	88.6
5	54.9	106.5	80.7
6	54.9	86.6	70.7
7	54.7	80.9	67.8
8	36.2	64.0	50.1
9	33.4	58.4	45.9
10	29.0	55.6	42.3
11	23.4	23.4	23.4
12	25.2	25.2	25.2
13	23.3	23.3	23.3

5.4.2 VARIABLES Y RESTRICCIONES DEL PROBLEMA

Se presenta a continuación el set de parámetros que deben ser establecidos para resolver el problema planteado, subdivididos en parámetros técnicos y de planificación.

Tabla 9: Parámetros Técnicos Caso A

Parámetros Técnicos		
Altura de Columna	300	[m]
Bancos	2	u
B0	80/300	[%]
B1	220/300	[%]
PS Límite	7	[%]

Tabla 10: Parámetros de Planificación Caso A

Parámetros de Planificación		
Vext Máx.	0.65	[tpd/m2]
Producción Mín.	24	[Ktpd]
Producción Máx.	38	[Ktpd]
Incorporación Mín.	500	[m2]
Incorporación Máx.	1700	[m2]
Número Periodos	20	[trimestres]

Las restricciones de precedencia en este caso fueron las definidas en la sección 4.2, las cuales no sufrieron modificaciones en la resolución de este.

5.5 CASO C: “MB_RENO”

En el caso C o “MB_RENO” se plantea con el objetivo de resolver un problema de agendamiento sin un patrón de incorporación definido ni acotar el número de puntos de extracción como aquellos que se espera abrir en un rango de tiempo sino que se considerará el total de los puntos de extracción definidos para la mina RENO utilizando para esto el modelo de bloques diluidos y discretizados en bancos entregado por la Superintendencia de Planificación-DET. Este documento se registra bajo el siguiente nombre:

- NN_CORBATA_PR_PND_2016_FEB_15_Mob_Bloq_Dil.csv

Con esto además de los parámetros utilizados y definidos para cada uno de los puntos como se detalló anteriormente, se busca estudiar el efecto que tiene cada una de las variables geotécnicas definidas, por lo cual se modifica la base de datos creada asignando distintas alturas equivalentes, P10 y presencia de FH en las zonas definidas. Esto se resume en el desarrollo de 4 casos:

1. Variación de Altura entre 500-1100 [m] con FH
2. Variación de Altura entre 500-1100 [m] sin FH
3. Variación de P10 entre 1.0-9.0 con FH
4. Variación de P10 entre 1.0-9.0 con sin FH

5.5.1 ANTECEDENTES DEL PROBLEMA

Como se mencionó en la descripción del caso, se considerarán para este todos los puntos de extracción definidos por diseño para la mina RENO, del cual se pudo corroborar un total de 1109 puntos de extracción distribuidos en las 5 zonas definidas inicialmente por el Informe PSPEX [1]. Esto porque el objetivo del caso es estudiar la variación de los parámetros definidos anteriormente. Se presenta en forma gráfica la zonificación y ubicación de los puntos de extracción y un gráfico con un resumen de la cantidad de puntos asociados a cada una de las zonas.

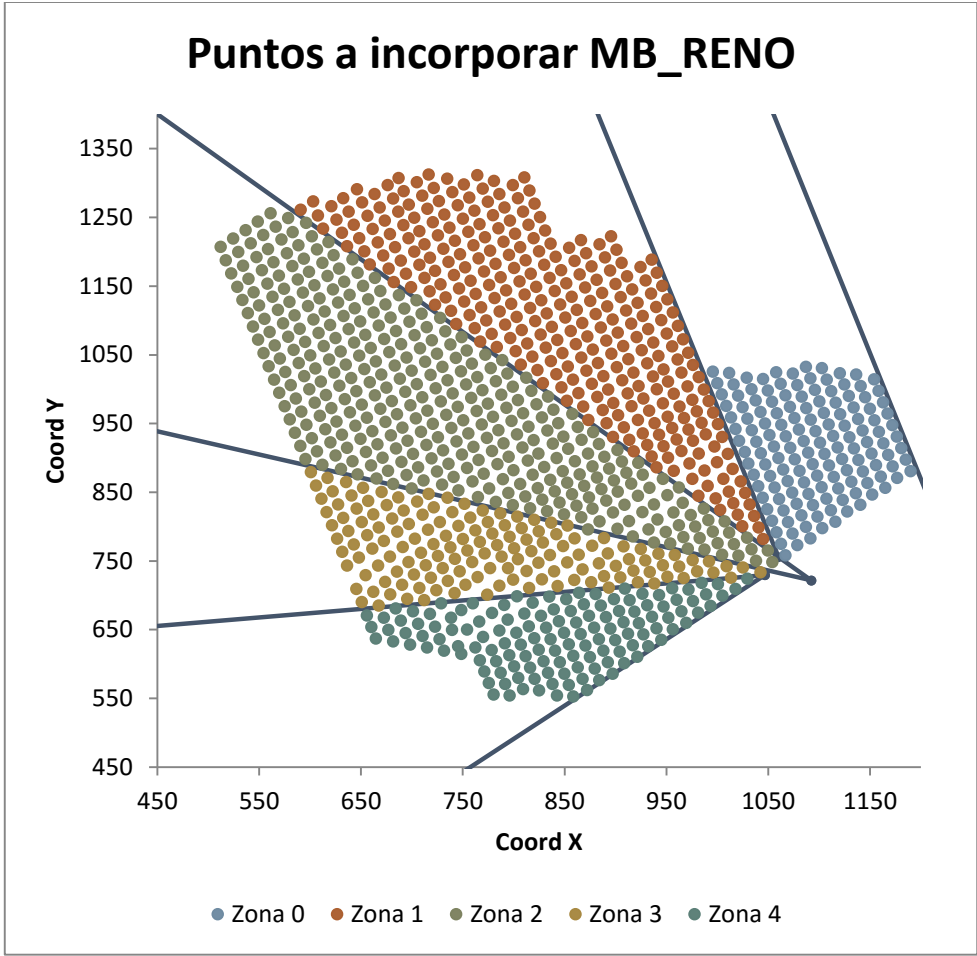


Ilustración 38: Puntos a incorporar por zona Caso B

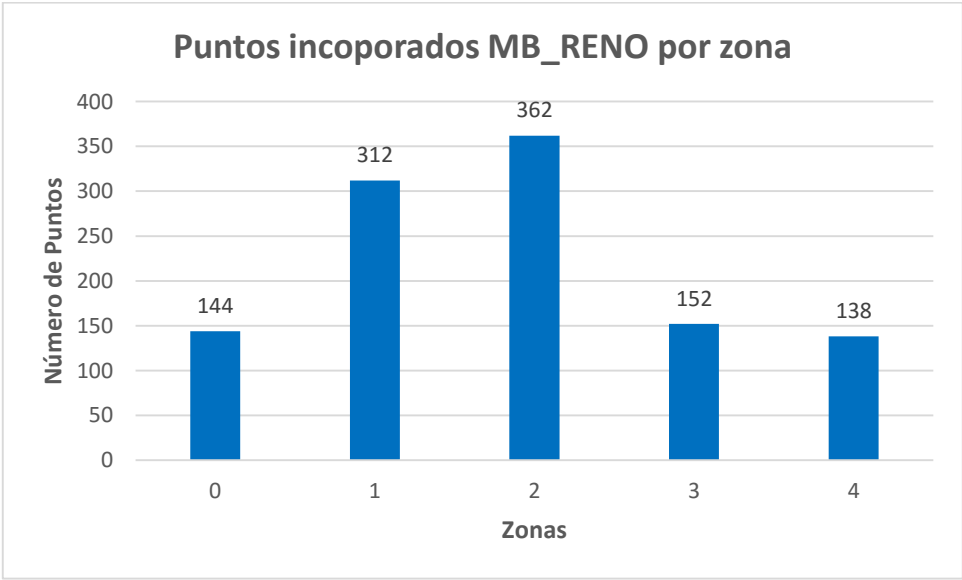


Ilustración 39: Puntos a incorporar por zona Caso C

El carácter empírico de este caso, trae como consecuencia que no sea posible establecer un ancho de frente en forma idónea para evaluar el avance del frente al incorporar cada uno de los puntos de extracción, pero se toma un promedio de los anchos observados en cada zona durante los años analizados en el Caso A (2000-2013). Se presenta una tabla resumida con dichos anchos por zona.

Tabla 11: Anchos promedio frente de incorporación por zona

Zona	Ancho Promedio[m]
0	161
1	142
2	197
3	109
4	163

5.5.2 VARIABLES Y RESTRICCIONES DEL PROBLEMA

Se presenta a continuación el set de parámetros que deben ser establecidos para resolver el problema planteado, subdivididos en parámetros técnicos y de planificación.

Tabla 12: Parámetros Técnicos Caso C

Parámetros Técnicos		
Altura de Columna	300	[m]
Bancos	2	u
B0	80/300	[%]
B1	220/300	[%]
PS Límite	7	[%]

Tabla 13: Parámetros de Planificación Caso C

Parámetros de Planificación		
Vext Máx.	0.65	[tpd/m ²]
Producción Mín.	24	[Ktpd]
Producción Máx.	38	[Ktpd]
Incorporación Mín.	500	[m ²]
Incorporación Máx.	1700	[m ²]
Número Periodos	20	[trimestres]

Las restricciones de precedencia en este caso fueron las definidas en la sección 4.2, las cuales no sufrieron modificaciones en la resolución de este.

5.5.3 DISTINTAS ALTURAS

La profundización de la explotación de los depósitos es un destino natural para muchos de los métodos existentes y futuros debido al agotamiento de los recursos más superficiales, es por ello que resulta interesante estudiar el comportamiento del peligro sísmico para distintas profundidades, teniendo en cuenta que en el caso de llevarse a cabo el estudio, el modelo debiese ser recalibrado para la profundidades en análisis.

En este caso la variable P10 fue establecida en 4.0 para observar un parámetro a la vez y la variación de altura equivalente se realizó desde los 500-1100 [m] asignando por tramos una medida para cada zona como se indica en la siguiente tabla.

Tabla 14: Asignación de alturas por zona

Altura Equivalente [m]	
Zona0	500
zona1	650
Zona2	800
Zona3	950
Zona4	1100

5.5.4 DISTINTO P10

Al igual que el caso anterior en el cual se varió el parámetro de altura equivalente, se busca estudiar el comportamiento y sensibilidad del peligro sísmico ante la variación de la condición de P10 de la zona en cuestión.

En este caso se fijó una altura equivalente de 700 [m] para todos los sectores y una variación de P10 entre 1.0 y 9.0, lo cual se especifica en la siguiente tabla:

Tabla 15: Asignación de P10 por zona

P10	
Zona0	1.0
Zona1	3.0
Zona2	5.0
Zona3	7.0
Zona4	9.0

5.6 CONCLUSIONES CASOS DE ESTUDIO

Se define un set de 3 casos distintos con el objetivo de estudiar el comportamiento de la metodología en distintos escenarios.

- El Caso A o PSPEX, busca generar un plan de producción con datos productivos pasados, acotando el modelo a cuanto fue incorporado por zona en determinado periodo de tiempo.
- El caso B o PND, busca generar un plan de producción sin limitar la incorporación más que a las cotas establecidas en el modelo de optimización, permitiendo así modificar los resultados de una proyección quinquenal considerando la probabilidad de Peligro Sísmico y el Valor Presente del negocio.
- El caso C o MB_RENO, se define como caso teórico en cual se busca estudiar el comportamiento del modelo ante distintas variaciones de los parámetros geotécnicos. En particular se generan dos variaciones la primera al P10 por zona y la segunda variando la altura equivalente de roca con el objetivo de modificar los esfuerzos. Ambos ejemplos se resuelven utilizando libremente el modelo de bloques completo de la Mina Reservas Norte restringido sólo por las cotas superiores e inferiores de producción e incorporación.

CAPITULO 6 RESULTADOS Y ANÁLISIS

En la siguiente sección se presentan los resultados de los dos escenarios definidos para cada uno de los casos en el capítulo 5.

6.1 CASO A - PSPEX

6.1.1 CASO A1: “PSPEX 2009-2013”

El caso A1, tiene como por objetivo determinar en forma cuantitativa el peligro sísmico de los planes según la incorporación observada de puntos para el periodo 2009-2013, es decir, respetando el total de puntos incorporados realmente. De esta forma se busca encontrar el plan que representa la mínima probabilidad de peligro sísmico sobre el umbral definido como PS Límite igual a 7%.

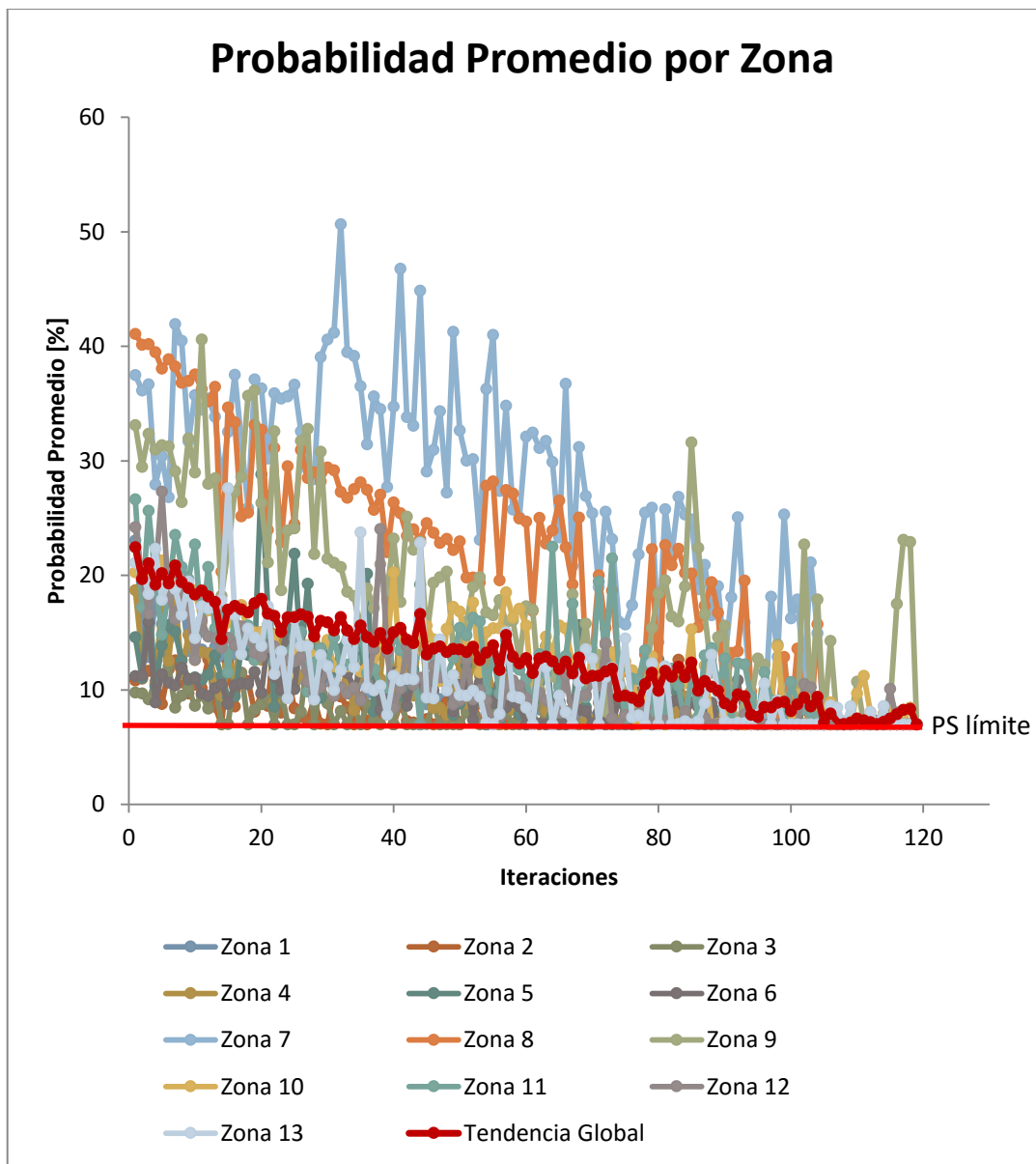


Ilustración 40: Gráfico probabilidad promedio por sector Caso A1-PSPEX 2009-2013

El peligro sísmico promedio por zona disminuye considerablemente en forma global desde un 22.4% al 7% límite definido para el control de peligro sísmico. Además se observa que gran parte de las zonas analizadas se ajusta a dicha tendencia, logrando así converger todas al 7% de probabilidad de Peligro Sísmico en la iteración número 118. La estrategia de disminución se basó en un descuento directo en la variable “MAX_RATE” del software UDESS, restando iteración a iteración en un valor fijo de 0.001 al porcentaje de realización de la actividad de producción a realizar cada trimestre (representado por

la velocidad de extracción), es importante notar que el máximo inicial para estas actividades fue de 11% equivalente a una velocidad de extracción de 0.65 [tpd/m²].

Las variaciones observadas en la probabilidad de cada una de las zonas se debe principalmente a la asociación que existe entre extracción e incorporación, es decir, si al castigar reduzco la velocidad de extracción implica que para extraer el mismo tonelaje necesito mayor área, por lo tanto, debo incorporar o extraer a mayor tasa si así lo permite el modelo. Por lo tanto, existen periodos en los que se incorporó, la probabilidad sube luego se castiga y vuelve a bajar, incorporando en el periodo siguiente y así sucesivamente hasta converger al mínimo establecido.

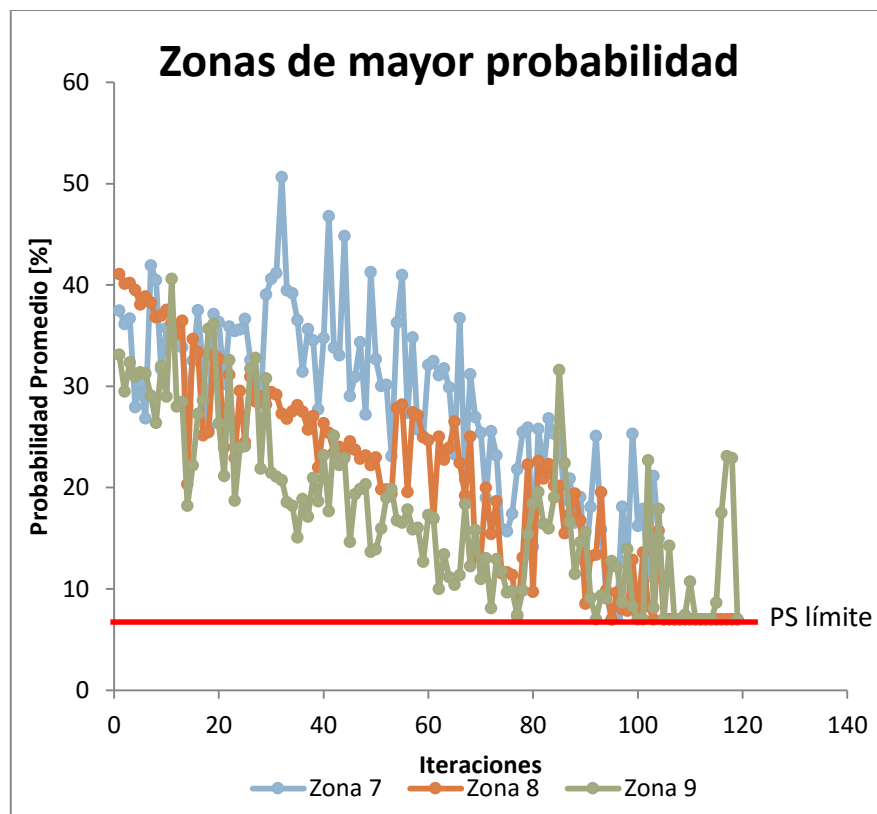


Ilustración 41: Zonas de mayor probabilidad Caso A1 -PSPEX 2009-2013

En cada una de las iteraciones realizadas se obtuvo un plan de producción, todos los cuales respetan las restricciones definidas para el problema, pero se muestran sólo los planes de producción e incorporación obtenidos en la iteración que se alcanza el Máximo Peligro Sísmico a nivel global.

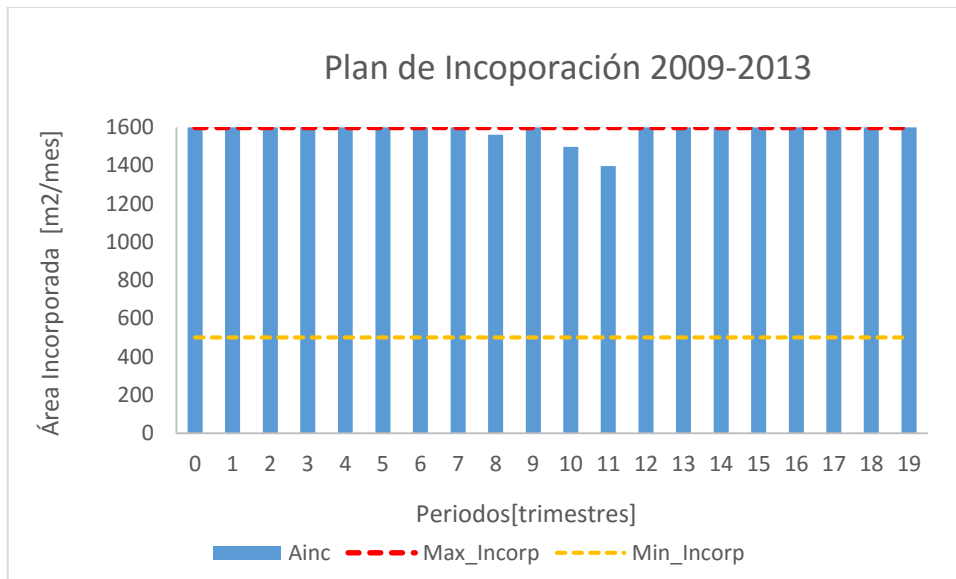


Ilustración 42: Gráfico Plan de Incorporación PSPEX 2009-2013

El plan de incorporación se ajusta en forma evidente a las cotas establecidas por el usuario, el cual además es relativamente constante en el tiempo.

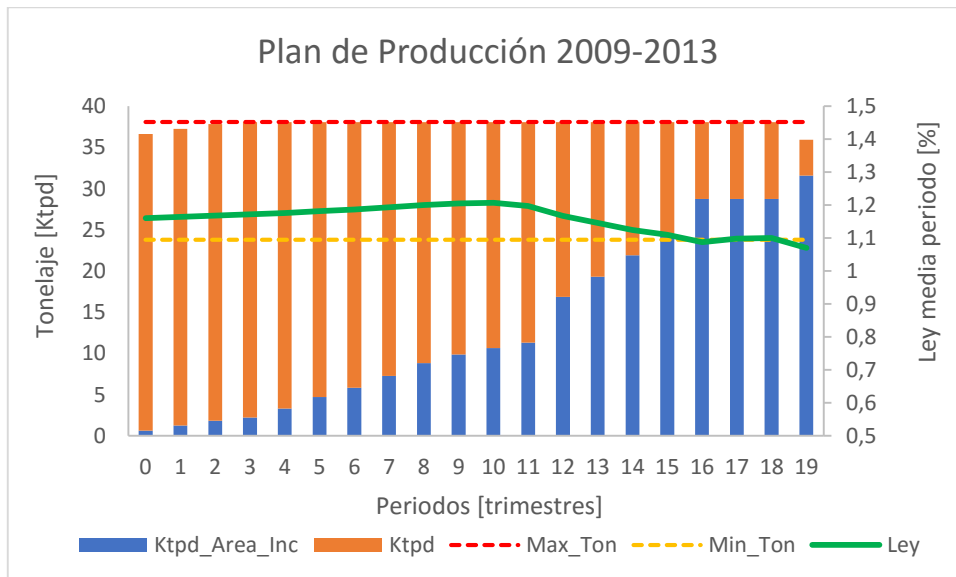


Ilustración 43: Gráfico Plan de Producción PSPEX 2009-2013

Se observa que la producción diaria se mantiene cercana al máximo establecido de 38 [Ktpd] y por sobre el mínimo establecido de 24 [Ktpd] como se observa en las cotas de línea punteada. En naranja se observa el tonelaje programado del área de 80,000[m²] y en azul el tonelaje perteneciente al área incorporada. De esto se observa como cada vez

sube el aporte representando una condición área nueva en quiebre. No se observan variaciones mayores en la ley de Cobre con rango aproximado de 1.05-1.20 [%].

El valor presente neto del plan generado incluyendo producción e incorporación fue de 1028.25 [MMUSD] en la iteración 118 considerando los parámetros económicos definidos.

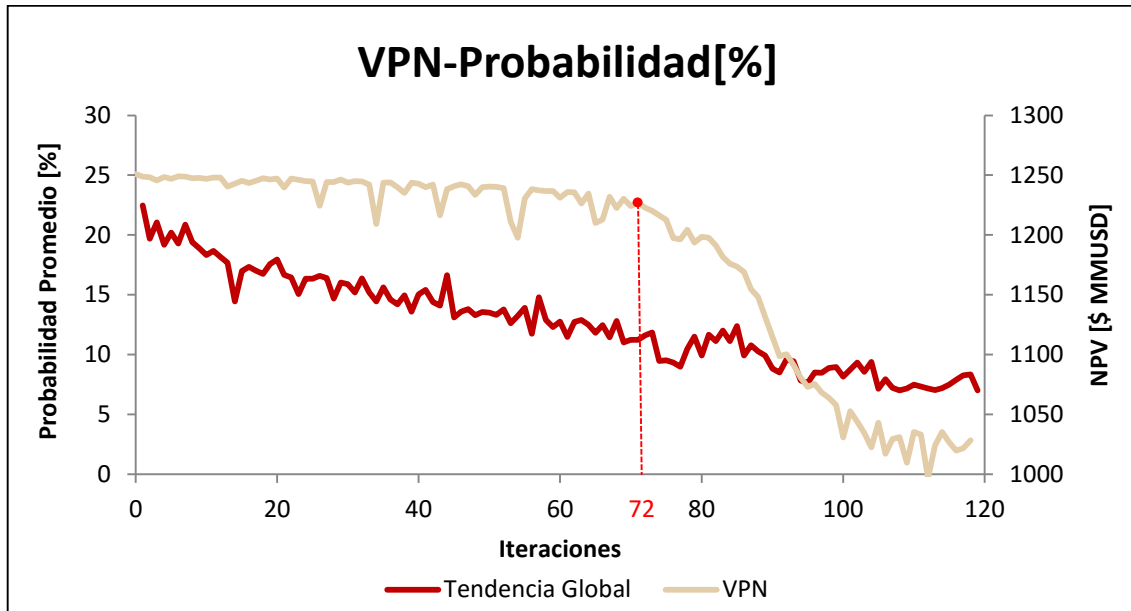


Ilustración 44: Gráfico VPN-Probabilidad Peligro Sísmico Promedio PSPEX 2009-2013

En este gráfico se observa el comportamiento que tiene el valor presente del negocio con respecto a la probabilidad de peligro sísmico media para cada una de las iteraciones realizadas. Las variaciones del VPN en el desarrollo de cada plan se ve influenciado principalmente por la variación de la velocidad de extracción media, la cual es castigada iteración a iteración para el control de la probabilidad de peligro sísmico. Esto exige al modelo la incorporación de mayor cantidad de área para cumplir con las restricciones de producción, por lo tanto, la inversión aumenta y el VPN disminuye.

La variación de dichos parámetros va desde el 22.4 [%] de probabilidad y un VPN 1,250 [MMUSD] hasta el 7 [%] de probabilidad con un VPN de 1,028 [MMUSD], lo cual representa una disminución del VPN de un 17.8% aproximadamente. Sin embargo la variación de ambos parámetros en este caso no tiene un comportamiento lineal y se logran identificar dos zonas de comportamiento una primera con menor variación del valor de la iteración 0 (22.5 [%]; 1,250[MMUSD]) a la iteración 72 (11.8 [%]; 1,222[MMUSD])

con una variación del VPN de un 2.3 [%] y una zona de mayor variación de la iteración 72 a la iteración 118 (7 [%]; 1,028[MMUSD]) con una variación de VPN de un 15.9 [%]. De esto se desprende que la decisión y consideración de la zona a situarse dependerá del riesgo que se esté dispuesto a asumir considerando las implicancias que puede generar un estallido de rocas como fue descrito en el capítulo de antecedentes.

6.1.2 CASO A2: “PSPEX 2006-2013”

El caso A2, se remite a los mismos objetivos del caso A1, pero con la diferencia que se busca ir más allá en periodo de control, con el objetivo de evaluar la transición completa desde el área inicial seleccionada para simular el comportamiento de Panel Caving y así poder evaluar el PS y los planes generados dada esta variación.

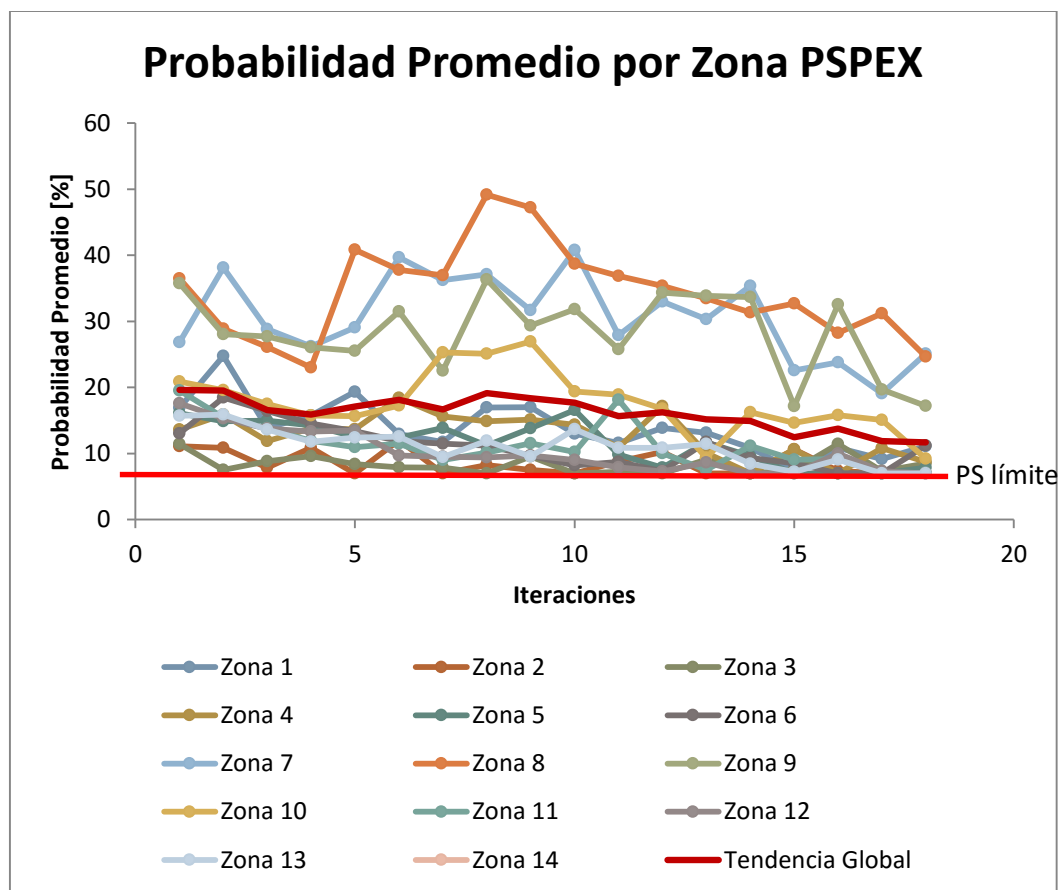


Ilustración 45: Gráfico probabilidad promedio por sector Caso A2-PSPEX 2006-2013

En este caso el Peligro Sísmico, respeta la tendencia global a la disminución de su probabilidad, pero no fue posible disminuir el peligro observado en forma global a niveles

del 7% debido a que el plan de producción se tornó infactible en la iteración 18 previo a que este fuera alcanzado. Este puede ser explicado debido a que el castigo al porcentaje de realización de cada actividad en este caso fue de 0.005, esto debido a que el tiempo de resolución asociado a estos planes es considerablemente mayor a los del Caso A1. Que el modelo se torne infactible significa que al disminuir la tasa de realización de la actividad en dicha iteración generamos que el modelo no cumpla con las restricciones de producción e incorporación entregadas, por lo tanto, el programa utilizado debe ser el último previo a que esto ocurra.

A continuación se muestran los planes de la última iteración 17 previo a que se tornara infactible en la iteración 18.

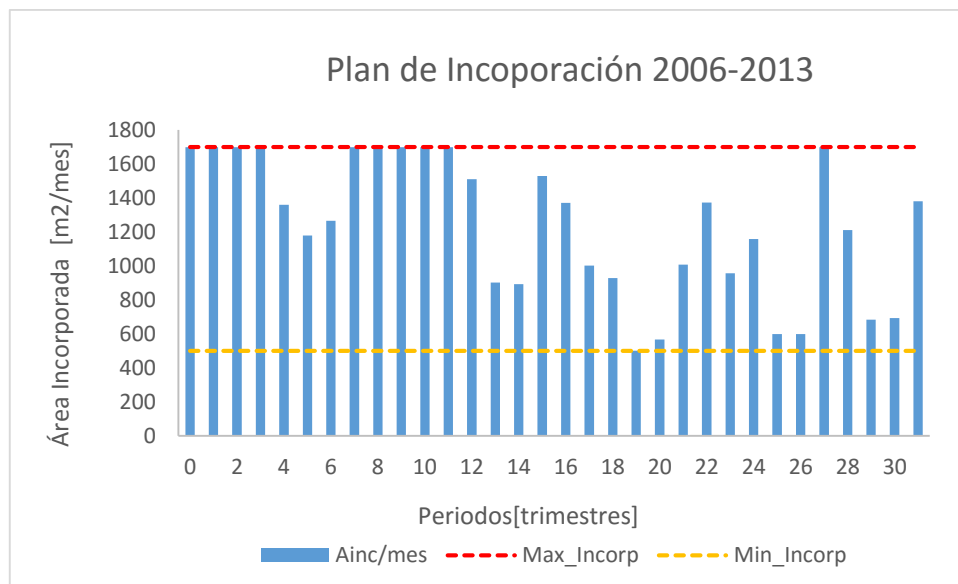


Ilustración 46: Gráfico Plan de Incorporación PSPEX 2006-2013

El plan de incorporación se ajusta en forma evidente a las cotas establecidas por el usuario, en el cual se observan bastantes variaciones en la tasa de incorporación. Esto pudiera ser corregido disminuyendo la variación actual de las cotas de 500-1700 [m2/mes]. Estas variaciones responden exclusivamente a la necesidad de satisfacer el área necesaria para general el tonelaje requerido por el plan de producción dada la velocidades de extracción media definidas para la iteración 17 en la cual el algoritmo finalizó. La mayor cantidad de variaciones se puede relacionar a la cantidad de periodos a resolver y la libertad entregada al modelo.

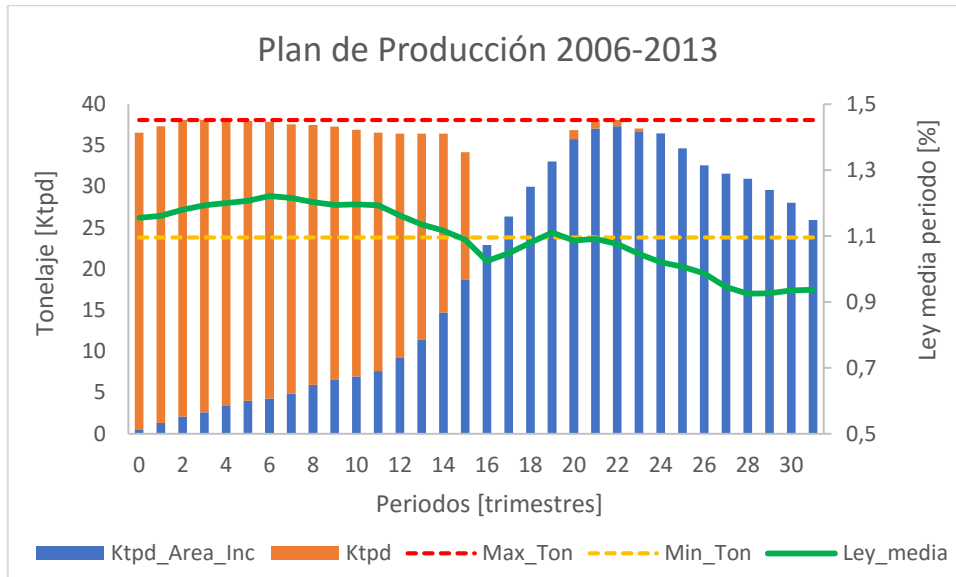


Ilustración 47: Gráfico Plan de Producción PSPEX 2006-2013

Se observa que la producción diaria se mantiene cercana al máximo establecido de 38 [Ktpd] hasta el periodo 15 y disminuye a 22.9 [Ktpd] hasta alcanzar el máximo establecido en los periodos 21 y 22 para luego disminuir nuevamente hasta 25.9 [Ktpd] en el periodo 31. En naranja se observa el tonelaje programado del área de 80,000[m²] y en azul el tonelaje perteneciente al área incorporada. De esto se observa como cada vez sube el aporte representando una condición área nueva en quiebre. La gráfica permite identificar el comportamiento productivo de un sector y cómo influye en este la incorporación de área en cada periodo. Es recomendable para evitar dicho comportamiento disminuir el rango de la restricción mínima de producción de modo que esta obligue al modelo la incorporación de área en forma más estable y evitar variaciones que tendrían implicancias en cambios de ritmos productivos en plantas de procesamiento.

Se observan variaciones mayores al caso anterior en la ley de Cobre con un rango aproximado de 0.93-1.22 [%].

El valor presente neto de los plan generado incluyendo producción e incorporación fue de 1525.5 [MMUSD] en la iteración 17 considerando los parámetros económicos definidos.

6.1.3 CONCLUSIONES CASO A -PSPEX

- Se logra cuantificar en forma directa, el peligro sísmico en cada uno de los planes generados e incluso identificar aquellos donde este se ajusta al límite establecido por el usuario. En ambos caso el Peligro Sísmico es mayor en las zonas 7,8 y 9, lo cual, confirma el correcto comportamiento de la metodología, identificación y minimización del peligro sísmico.
- Los planes de producción e incorporación logran representar el comportamiento observado en la operación de un método panel caving como lo es el caso de la mina RENO manteniéndose dentro de los valores esperados para un método de esta naturaleza y acorde a las cotas superiores e inferiores definidas para la producción e incorporación.
- Se logra identificar el aporte productivo generado por el área nueva y su comportamiento a lo largo de cada uno de los periodos.
- Se logra establecer para el Caso A1 o PSPEX 2009-2013 una relación entre la variación de la probabilidad de Peligros Sísmico y el Valor Presente Neto. Dicha relación tiene un comportamiento en dos zonas; la primera con baja disminución del VPN de 3% y una disminución de probabilidad del 10.6% y la segunda zona en la cual disminuye el VPN alcanza el 16% y una disminución de probabilidad de 4.8%

6.2 CASO B – PND

6.2.1 PND 2014-2018

El objetivo de este caso, como fue descrito anteriormente es determinar cómo debiesen ser incorporados los puntos de extracción considerando el valor económico que cada uno de estos aporta, determinado por su contenido del elemento de interés y la velocidad a la que este puede ser extraído.

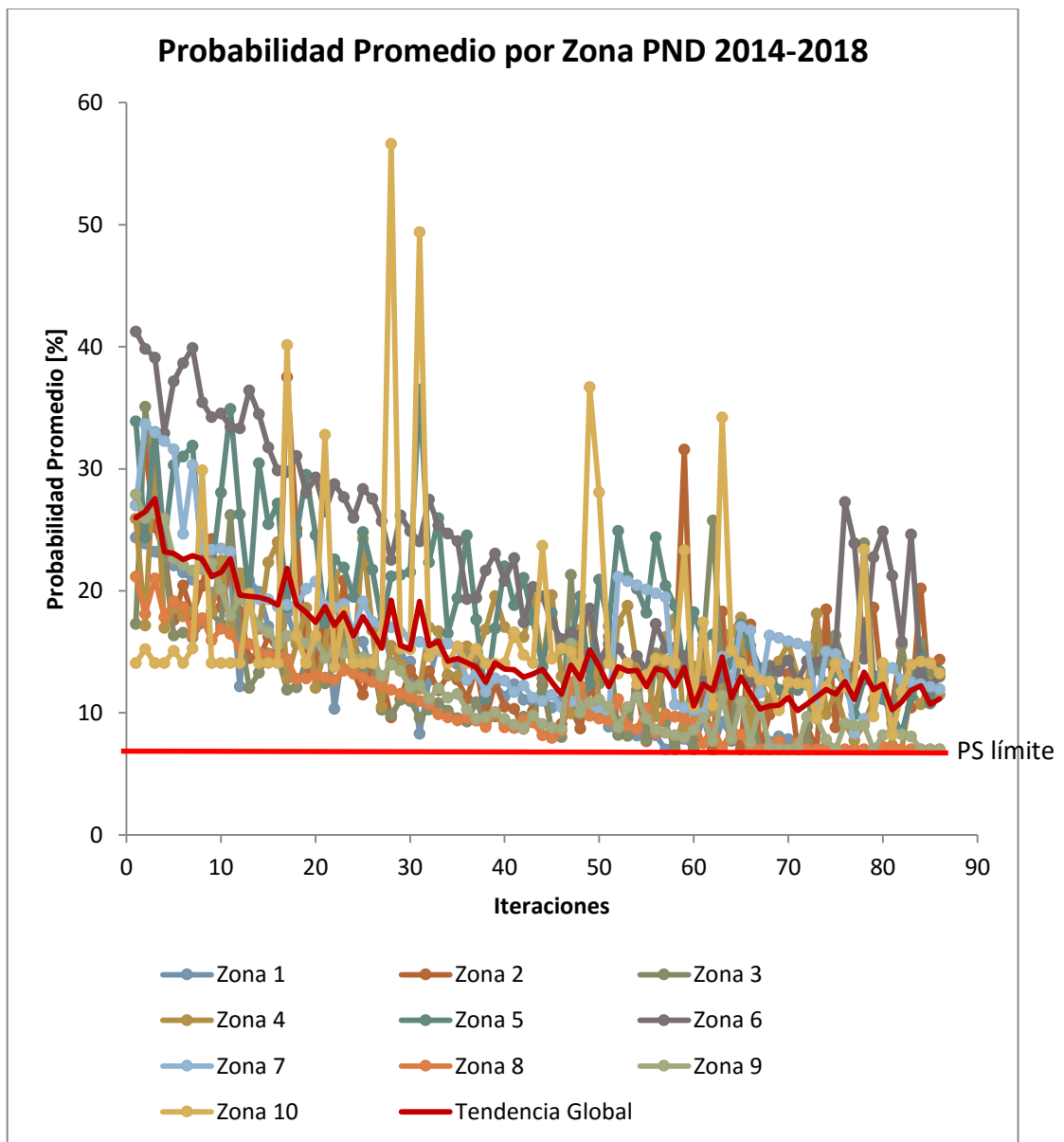


Ilustración 48: Gráfico probabilidad promedio por zona PND 2014-2018

El problema se resolvió con la metodología descrita, logrando controlar el PS en forma global de un 26% al 11%, sin poder llegar al límite establecido producto que este se vuelve infactible en la iteración 85 con una estrategia de disminución de 0.001 en el porcentaje de realización de cada actividad. La causa de que esto suceda, está directamente relacionada a las restricciones impuestas al problema, es decir, es natural que al disminuir considerablemente la velocidad de extracción de un punto, para cumplir con la producción establecida se debiesen abrir cada vez más puntos. Dicha acción

podría verse afectada por la falta de puntos a incorporar o bien porque se sobrepase el límite de puntos que pueden ser incorporados por un periodo determinado.

Es importante notar, que el peligro sísmico en este caso representa a su vez una recomendación en la forma de incorporar los puntos de extracción de manera tal que se controle el peligro existente y además contrastando dicha información con los respectivos planes de producción, incorporación y estrategia de velocidades de extracción en el rango de los 80 [m] iniciales de la explotación de la columna de mineral.

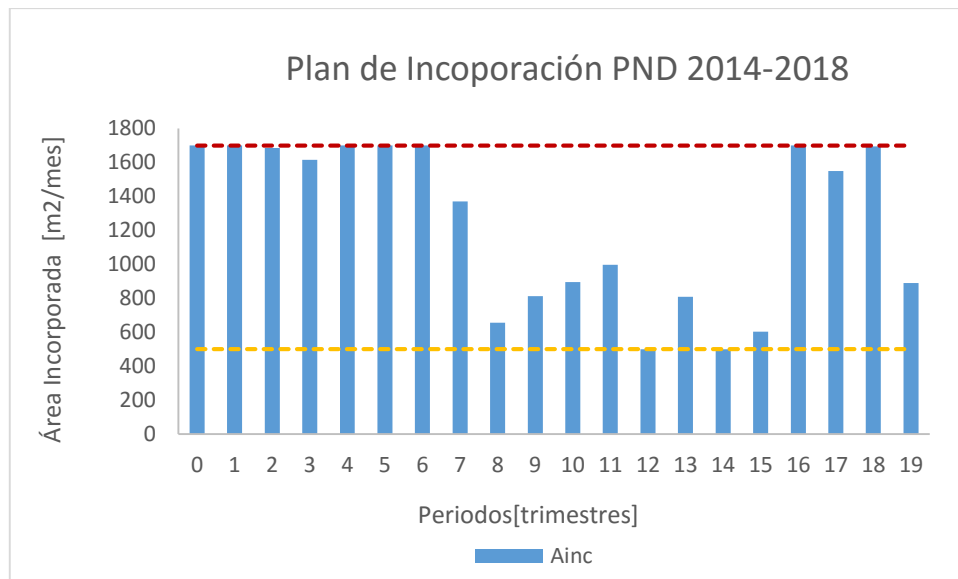


Ilustración 49: Gráfico Plan de Incorporación PND 2014-2018

El plan de incorporación se ajusta en forma evidente a las cotas establecidas por el usuario, en el cual se observan bastantes variaciones en la tasa de incorporación. Esto pudiera ser corregido disminuyendo la variación actual de las cotas de 500-1700 [m2/mes]. Estas variaciones responden exclusivamente a la necesidad de satisfacer el área necesaria para general el tonelaje requerido por el plan de producción dada la velocidades de extracción media definidas para la iteración 85 en la cual el algoritmo finalizó.

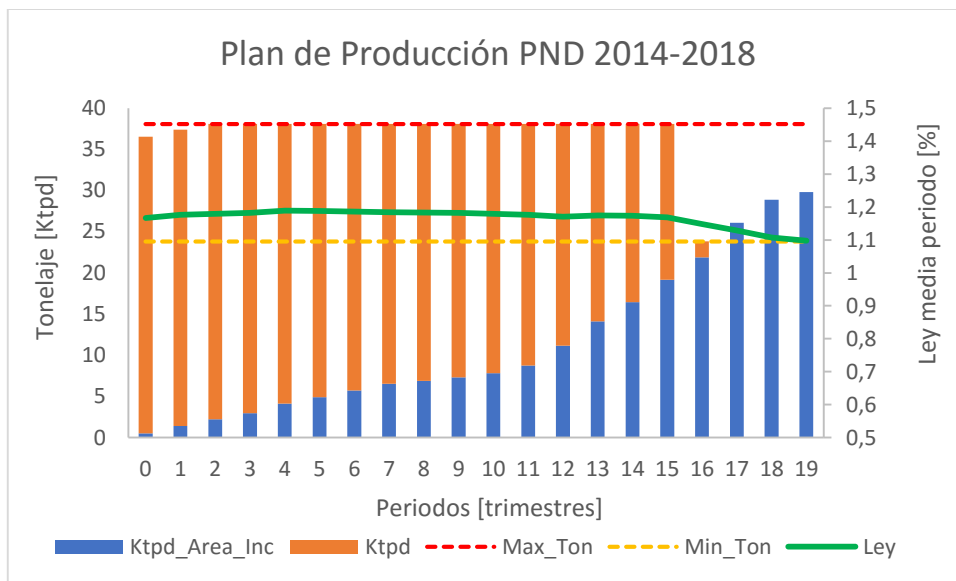


Ilustración 50: Gráfico Plan de Producción PND 2014-2018

Se observa que la producción diaria se mantiene cercana al máximo establecido de 38 [Ktpd] hasta el periodo 15 y disminuye a un valor promedio de 28 [Ktpd] para los periodos 16 al 19 por sobre a la cota mínima establecida de 24 [Ktpd] como se observa en las cotas de línea punteada. En naranja se observa el tonelaje programado del área de 80,000[m²] y en azul el tonelaje perteneciente al área incorporada. De esto se observa como cada vez sube el aporte representando una condición área nueva en quiebre. No se observan variaciones mayores en la ley de Cobre con rango aproximado de 1.09-1.19 [%].

El efecto observado en los últimos periodos donde el efecto del agotamiento de reservas iniciales asociadas al área inicial y el costo de incorporar área dificulta la mantención de un ritmo producción elevada teniendo como objetivo la maximización del VPN y cumplimiento del requerimiento productivo.

El valor presente neto de los plan generado incluyendo producción e incorporación fue de 1042.2 [MMUSD] en la iteración 85 considerando los parámetros económicos definidos.

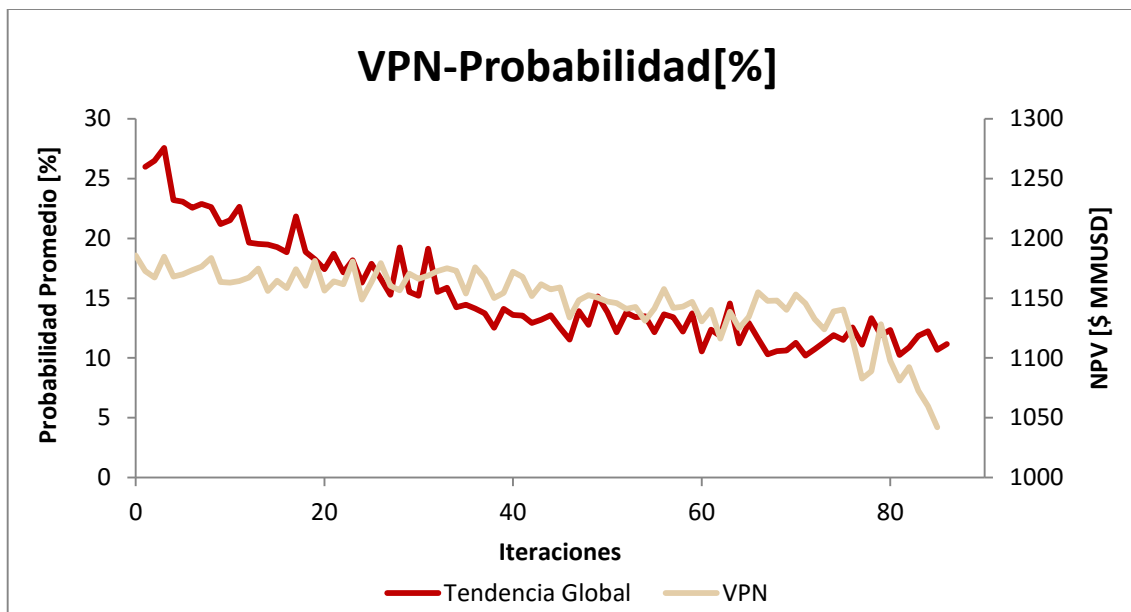


Ilustración 51: Gráfico VPN-Probabilidad Peligro Sísmico Promedio PND 2014-2018

En este gráfico se observa el comportamiento que tiene el valor presente del negocio con respecto a la probabilidad de peligro sísmico media para cada una de las iteraciones realizadas. Las variaciones del VPN en el desarrollo de cada plan se ve influenciado principalmente por la variación de la velocidad de extracción media, la cual es castigada iteración a iteración para el control de la probabilidad de peligro sísmico. Esto exige al modelo la incorporación de mayor cantidad de área para cumplir con las restricciones de producción, por lo tanto, la inversión aumenta y el VPN disminuye.

La variación de dichos parámetros va desde el 25.9 [%] de probabilidad y un VPN 1,185 [MMUSD] hasta el 11.15 [%] de probabilidad con un VPN de 1,042 [MMUSD], lo cual representa una disminución del VPN de un 12.1% aproximadamente. Sin embargo la variación de ambos parámetros en este caso es menos variable que en el caso anterior identificándose un quiebre en la iteración 75. Las dos zonas de comportamiento queda definidas como una primera con menor variación del valor de la iteración 0 (25.9 [%]; 1,185[MMUSD] a la iteración 75 (12.5 [%]; 1,140[MMUSD]) con una variación del VPN de un 3.8 [%] y una zona de mayor variación desde la iteración 75 a la iteración 85 (11.15 [%]; 1,042[MMUSD]) con una variación de VPN de un 8.6 [%]. De esto se desprende que la decisión y consideración de la zona a situarse dependerá del riesgo que se esté

dispuesto a asumir considerando las implicancias que puede generar un estallido de rocas como fue descrito en el capítulo de antecedentes

Se muestra como elemento accesorio del desarrollo del caso, una recomendación de velocidad de extracción por zona. Con esto se busca ahora recrear lo observado en el modelo, para en un futuro incorporar la metodología al proceso de planificación de mediano plazo. De este modo se logra incorporar el peligro sísmico en forma dinámica para un caso real como lo es la mina RENO.

Tabla 16: Velocidad de extracción media por zona –PND 2014-2018

V _{ext} media por zona [tpd/m ²]	
Zona 1	0.229
Zona 2	0.182
Zona 3	0.187
Zona 4	0.162
Zona 5	0.156
Zona 6	0.153
Zona 7	0.151
Zona 8	0.376
Zona 9	0.183

6.2.2 CONCLUSIONES CASO B- PND

- Se observa que es posible generar un plan de producción sin una guía de incorporación previa, incorporando puntos de extracción de acuerdo a los criterios antes definidos para su agendamiento.
- Es posible generar recomendaciones en cuanto al comportamiento y parámetros que debiese tener la operación de un método Panel Caving al utilizar un modelo de peligro sísmico calibrado para dicho sector como lo es la recomendación de velocidades de extracción para cada una de las zonas para los puntos en quiebre.
- Se logra identificar el aporte productivo generado por el área nueva y su comportamiento a lo largo de cada uno de los periodos.
- Se logra establecer para el Caso B o PND 2014-2018 una relación entre la variación de la probabilidad de Peligros Sísmico y el Valor Presente Neto. Dicha

relación tiene un comportamiento en dos zonas; la primera con baja disminución del VPN igual 3.8% y una disminución de probabilidad del 13.4% y la segunda zona en la cual disminuye el VPN alcanza el 8.6% y una disminución de probabilidad de 1.4%

6.3 CASO C - MB RENO

Como fue mencionado en la descripción del Caso C, el cual representa un caso empírico, utilizando como contraste un modelo de bloques real con las variables ya mencionadas.

A continuación se presentan los resultados de cada uno de los ejemplos y un análisis haciendo referencia al comportamiento del peligro sísmico en estos, sin embargo los planes de producción referentes a cada uno de los gráficos mostrados serán adjuntados en la sección de anexos.

6.3.1 DISTINTAS ALTURAS

Los planes generados para la variación de altura además difieren en si fueron preparados mediante la técnica de Fracturamiento Hidráulico (FH) o no. Estos se presentan a continuación sólo en la formulación del peligro sísmico promedio observada por zona en cada iteración.

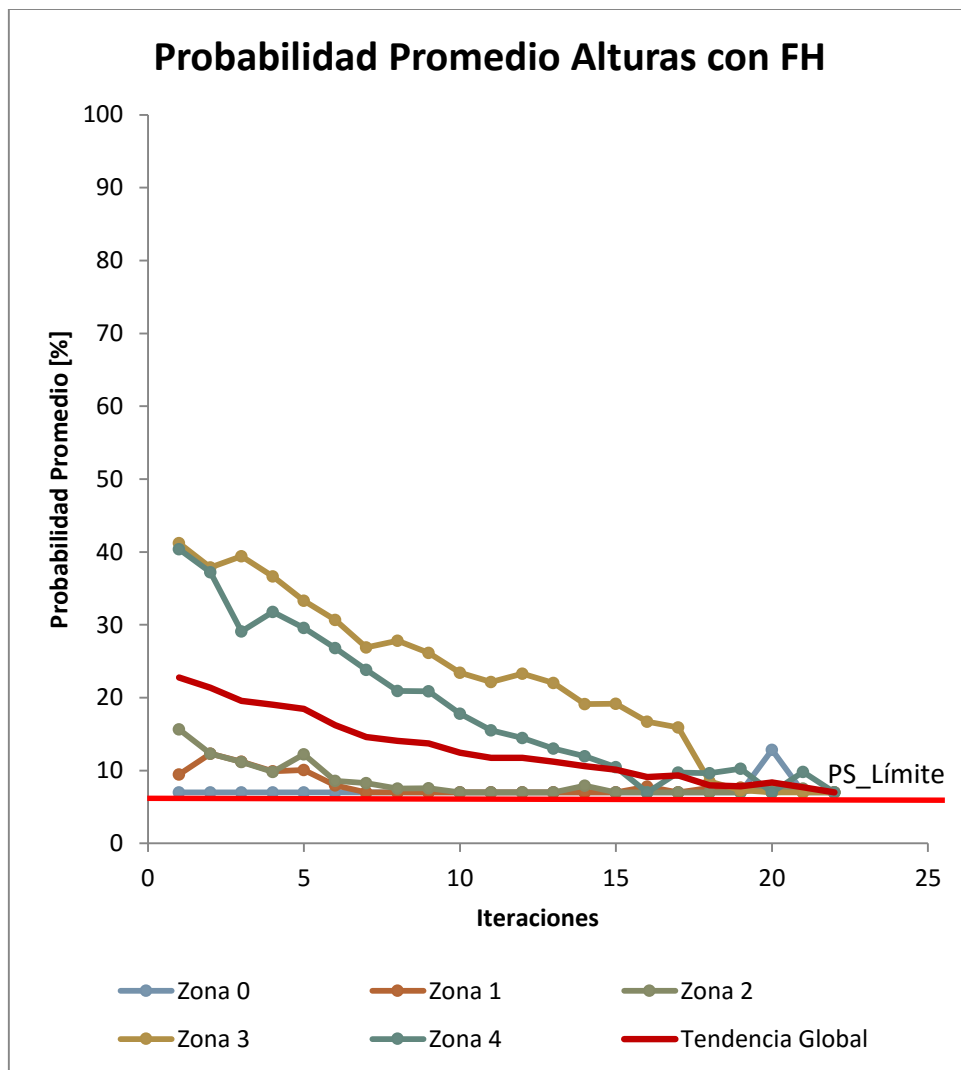


Ilustración 52: Gráfico probabilidad promedio por zona variación de alturas con FH

En el caso del ejemplo con FH, estos en la iteración 22, convergen al PS límite establecido del 7% demostrando así como puede gestionarse el peligro sísmico.

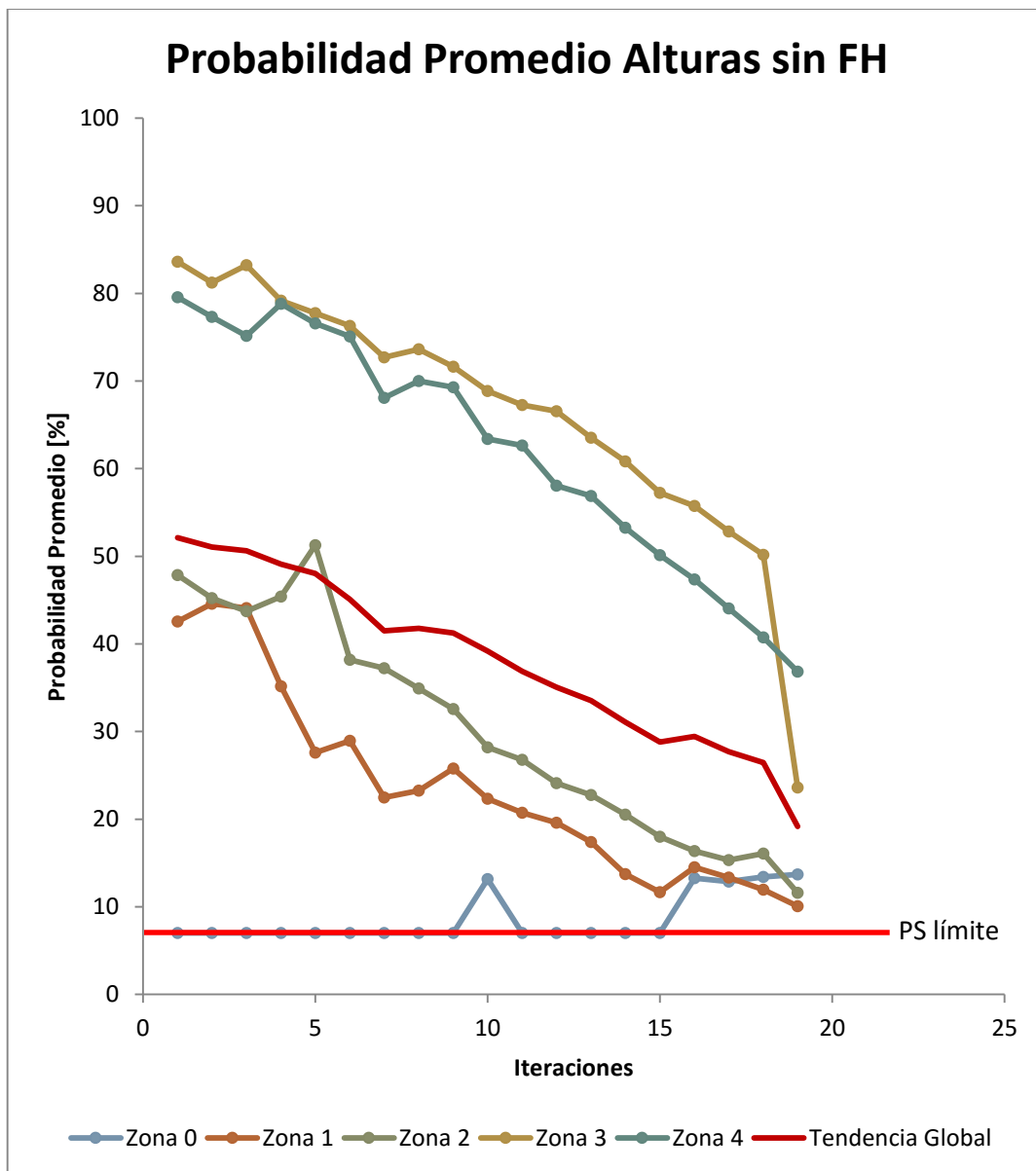


Ilustración 53: Gráfico probabilidad promedio por zona variación de alturas sin FH

En el caso sin FH, sin embargo, los resultados evidentemente demuestran mayor probabilidad de peligro sísmico a tal punto que no es posible controlar este al límite establecido porque en la iteración 19, se vuelve infactible para las restricciones establecidas en el problema de optimización.

En ambos casos es importante notar que aquellas zonas que tienen mayor altura de columna presentan una mayor probabilidad de peligro sísmico. Esto es natural dado que se involucra en forma directa en el esfuerzo vertical presente y su representación como abutment stress en la zona de transición, por lo tanto, quedan demostradas dos cosas en

forma evidente, la altura de columna aumenta la probabilidad del peligro sísmico en forma considerable y en particular la influencia del método FH se confirma, al menos en cuanto resguarda el modelo utilizado, que este disminuye considerablemente la probabilidad de peligro sísmico. A continuación se presenta un gráfico donde se compara la tendencia global en la probabilidad de peligro sísmico observada por zona en ambos casos.

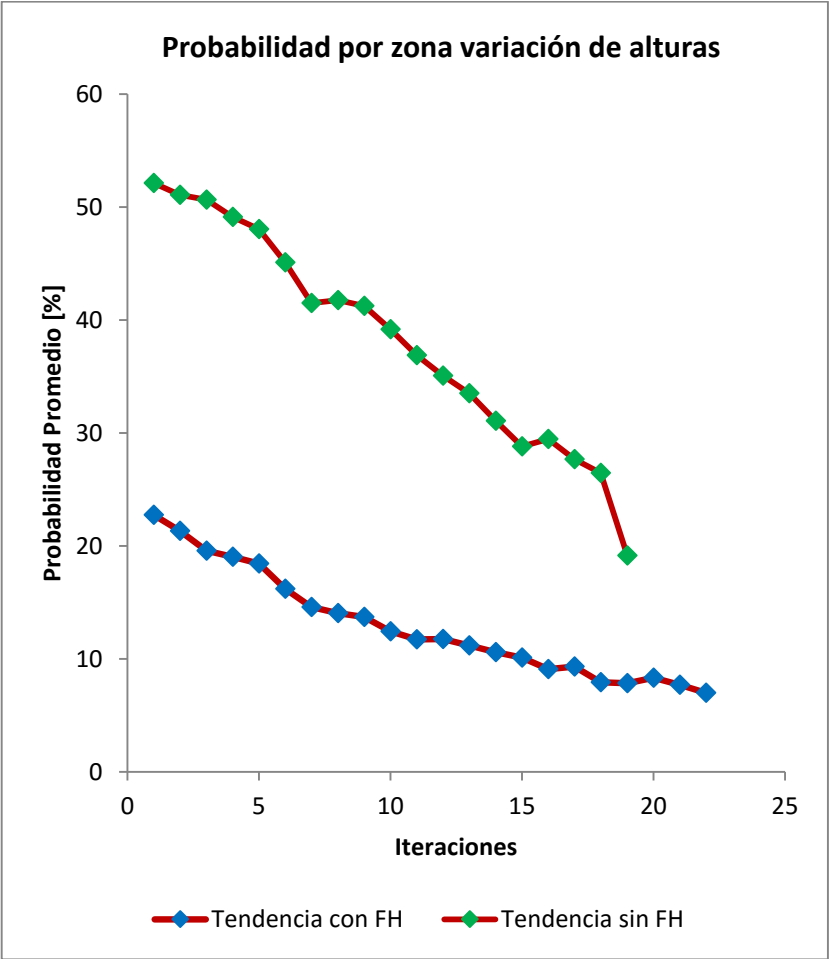


Ilustración 54: Gráfico tendencias globales en casos de variación de altura con y sin FH

Es claro entonces el efecto del FH mencionado anteriormente en la resolución de un problema con las mismas variables y restricciones, sólo modificando la variable FH.

6.3.2 DISTINTO P10

Fueron evaluados los planes obtenidos para cada iteración según las variables y restricciones establecidas anteriormente, donde se obtuvieron los gráficos mostrados a continuación.

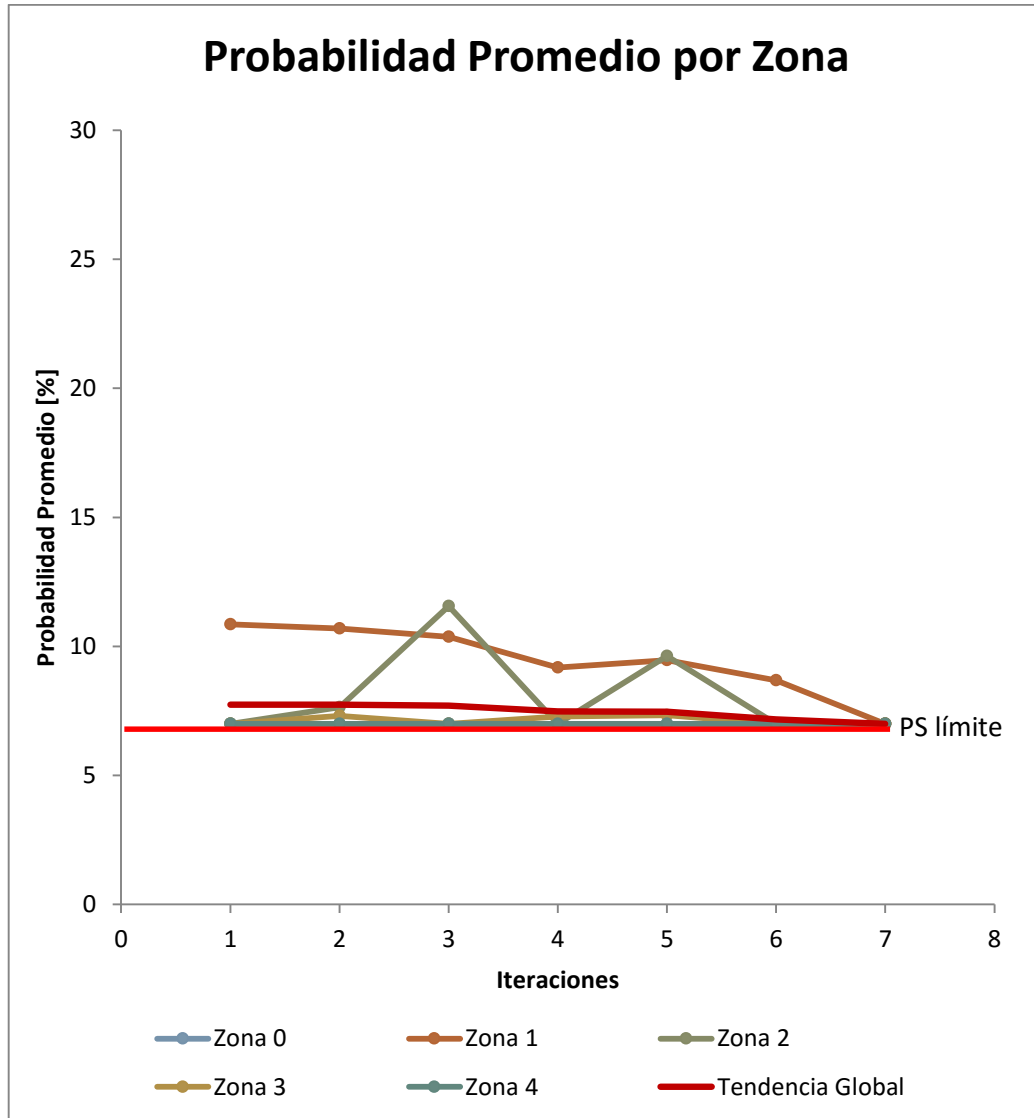


Ilustración 55: Gráfico probabilidad promedio por zona variación de P10 con FH

Se observa que la probabilidad promedio en general es baja y tarda sólo 6 iteraciones en alcanzar la probabilidad de PS límite 7%. Es importante mencionar que la zona 4 no se ve graficada porque en la resolución del problema a pesar de la intensiva incorporación de puntos de esta zona la variable de P10 igual a 9.0 logra disminuir el peligro sísmico al límite del 7% establecido. En el caso de la zona 0, no se observan mayores

consideraciones porque dada la resolución del modelo de planificación se incorpora sólo un punto de esta zona lo cual no logra el efecto de gatillar una alta probabilidad de peligro sísmico.

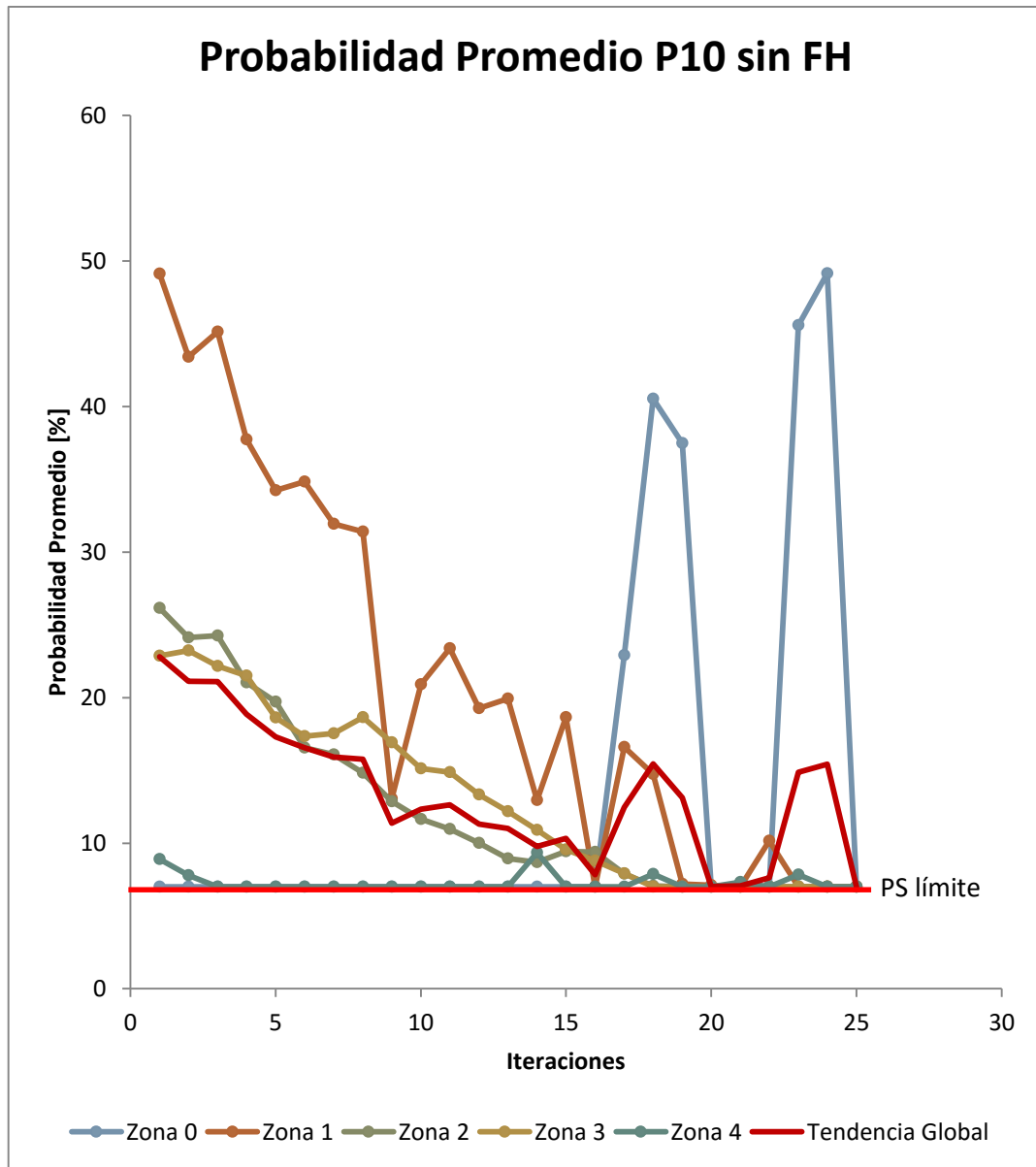


Ilustración 56: Gráfico probabilidad promedio por zona, variación de P10 sin FH

En este caso si se observa mayor probabilidad de peligro sísmico, en particular se detectan dos anomalías en el comportamiento de las curvas. Primero en la zona 4, al igual que el caso anterior debido a su alto P10, se observa una probabilidad estabilidad cerca del mínimo establecido. Segundo, se observa que la zona 0, gatilla su probabilidad

en iteraciones posteriores, este efecto se debe a que el modelo en las primeras iteraciones no privilegia la incorporación de esta zona por el valor que esta aporta en forma directa, pero al avanzar en la iteraciones las distintas zonas han disminuido su velocidad de extracción máxima, lo cual implica en forma directa que deban ser incorporados más puntos de extracción para mantener la producción establecida, incorporando así dicha zona, la cual para el número de iteraciones no logra ser estabilizada en su comportamiento, pero en forma global el problema termina sin problemas estableciendo que no existe detecciones de probabilidad mayores al 7% en las zonas y periodos de la iteración 24.

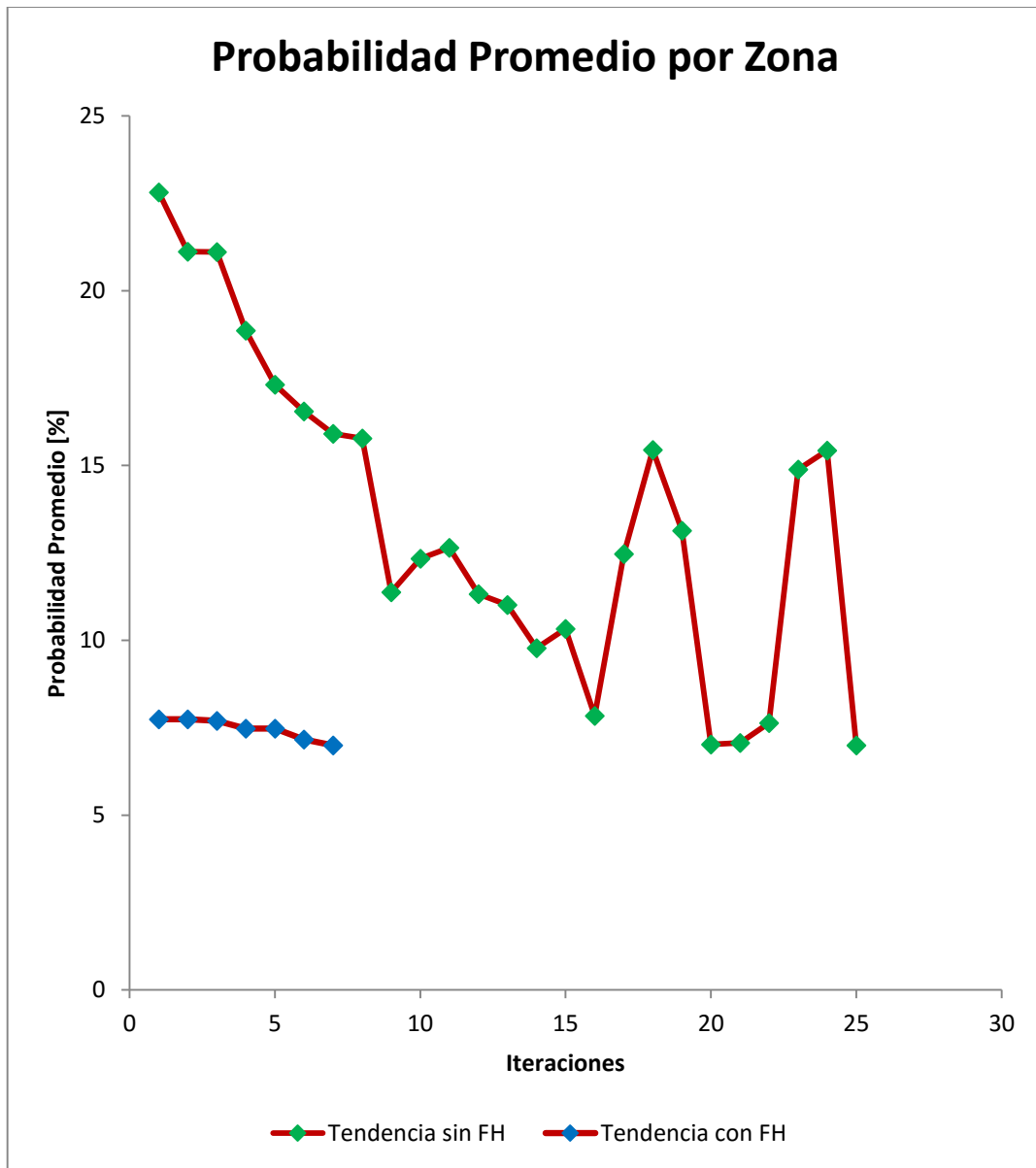


Ilustración 57: Gráfico tendencias globales en casos de variación de altura con y sin FH

Finalmente, se muestra la comparación de ambas tendencias, lo cual reafirma lo propuesto en el análisis de los casos con variación de altura, donde la aplicación de FH disminuye considerablemente la probabilidad de peligro sísmico.

6.3.3 CONCLUSIONES MB_RENO

- Se deja en evidencia que la aplicación de la metodología en los distintos casos estudiados, en los cuales se observa que a pesar del distinto comportamiento observado en base a los parámetros geotécnicos asignados el modelo es

consistente en su resolución y en la consideración de las distintas variables y restricciones del modelo de optimización.

- Se evidencia el impacto que tiene una mayor altura de columna equivalente sobre un punto de extracción, medido este como la distancia entre el punto y su intersección vertical a la topografía.
- Con respecto a la variable P10, se observa la importancia que esta tiene, incluso evitando en forma total la existencia de zonas con probabilidad de PS mayores al 7%, incluso considerando velocidades medias de extracción de 0.65 [tpd/m²].
- Con respecto a la utilización de la técnica de acondicionamiento Fracturamiento Hidráulico (FH), resulta en la disminución drástica del peligro en los casos analizados, sin embargo se debe considerar que el modelo de peligro sísmico fue calibrado principalmente para zonas las cuales en su mayoría fueron preparadas con dicha técnica, por lo tanto, debiese ser objeto de estudio el impacto en zonas sin preparar y la posterior calibración de modelo antes dicho objeto.

CAPITULO 7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Del presente trabajo se desprenden distintas consideraciones las cuales se revisarán siguiendo el mismo orden en el que se organizan las distintas secciones.

7.1 INTERFERENCIAS OPERACIONALES

De la motivación y antecedentes que preceden a la resolución práctica del problema planteado se infiere lo siguiente:

- Queda en evidencia, la relevancia que tienen las interferencias operacionales de origen geotécnico en el proceso de planificación minera de Panel Caving. En este actualmente se incorporan en forma de castigos a la capacidad real de distintos parámetros como el castigo al área incorporada, velocidad de extracción como control de la propagación del caving y otras. Donde resulta de mucha utilidad incorporar estas interferencias en forma directa o dinámica con el objeto de obtener planes con menor incertidumbre y una mayor tasa de éxito tanto en los avances establecidos como los retornos esperados.
- Existen distintas interferencias las cuales resultan vitales estudiar y poder relacionar a variables operacionales las cuales puedan ser incorporadas en modelos actualmente utilizados en la planificación. En particular en este trabajo se presenta la incorporación del peligro sísmico en forma dinámica en la obtención de un plan de producción e incorporación de área con el objetivo de minimizar la dicha interferencia.

7.2 METODOLOGIA

En la siguiente sección se resaltan los puntos más importantes de la metodología realizada:

- Se plantea una metodología en la cual interactúa el modelo de peligro sísmico con el software de planificación minera UDESS, en forma secuencial e iterativa, controlando variables geotécnicas y operacionales. Estas últimas son aquellas

posibles de controlar mediante el problema planteado. Se controló la incorporación de área como la velocidad de avance del frente de extracción y la velocidad de extracción media como la tasa a la cual se extrae en unidades de toneladas por metro cuadrado.

- La metodología, tal y como se aplicó en este caso, puede ser reproducida en la incorporación de otras interferencias operacionales de origen geotécnico las cuales se relacionen a modelos que permitan manejar variables operacionales que influyan directamente en la resolución del programa de producción. Además se deben definir en forma adecuada los criterios de control e iteración para dichos casos.
- La aplicación de la metodología con respecto a la minimización del modelo de Peligro Sísmico depende de la calibración de este, por lo tanto, de ser aplicado en otra Mina este debiese ser ajustado previamente. En este trabajo el modelo fue calibrado para el Sector Reservas Norte, para el cual se planificaron distintos programas de producción

7.3 CASOS DE ESTUDIO

Se describen características comunes para el desarrollo de casos, los cuales se orientan a los lineamientos de planificación establecidos para el Sectores Reservas Norte por parte de la Superintendencia de Planificación de la División El Teniente. En estos casos se logra describir distintos comportamientos que permiten evaluar la utilidad y aplicación de la metodología planteada.

- Caso A o PSPEX, en este se busca representar un programa de producción pasado, en base a la cantidad de punto incorporados en un rango de años, el modelo busca incorporar exactamente dichos puntos pero con una secuencia optimizada en base al valor y el agendamiento de la extracción en base a velocidad de extracción establecida y castigada iteración a iteración. Para la definición de zonas se utilizó la discretización de estos en las zonas definidas de análisis (14).
- Caso B o PND 2014-2018, en este el objetivo fue controlar la probabilidad de peligro al considerar el total de puntos que se registran en los documentos entregados por la Superintendencia de Planificación de la División El Teniente

para el año 2015 y posteriores. En este a pesar que el número de puntos representan el total se mantiene la discretización de estos en las zonas definidas de análisis (14).

- Caso C o MB_RENO, el objetivo de este caso fue en base al modelo de bloques del Sector Reservas Norte, el cual fue diluido y asignado mediante elipsoides y discretización en bancos a puntos de extracción, como parte del diseño del método de extracción Panel Caving, estos fueron tomados como parte de los inputs, pero se modificaron las variables geotécnicas controladas variando la altura de columna equivalente entre los 500-1100[m], el P10 entre 1.0-9.0 y finalmente la presencia o ausencia de pre-acondicionamiento mediante Fracturamiento Hidráulico (FH).

7.4 RESULTADOS Y ANÁLISIS

7.4.1 CASO A O PSPEX:

- Se logra cuantificar en forma directa, el peligro sísmico en cada uno de los planes generados e incluso identificar aquellos donde este se ajusta al límite establecido por el usuario. En ambos caso el Peligro Sísmico es mayor en las zonas 7,8 y 9, lo cual, confirma el correcto comportamiento de la metodología, identificación y minimización del peligro sísmico.
- Los planes de producción e incorporación logran representar la operación de un método panel caving, respetando a las cotas superiores e inferiores definidas para la producción e incorporación.
- Se identifica el aporte productivo generado por el área nueva o incorporada y su comportamiento a lo largo de cada uno de los periodos.
- Se logra establecer para el Caso A1 o PSPEX 2009-2013 una relación entre la variación de la probabilidad de Peligros Sísmico y el Valor Presente Neto. Dicha relación tiene un comportamiento en dos zonas; la primera con baja disminución del VPN de 3% y una disminución de probabilidad del 10.6% y la segunda zona en la cual disminuye el VPN alcanza el 16% y una disminución de probabilidad de 4.8%

7.4.2 CASO B O PND 2014-2018:

- Se obtiene planes de producción e incorporación al igual que en el caso anterior, sin embargo es de interés en este caso, al representar la realización futura de dichas unidades de producción, las especificaciones de las velocidades de extracción media por zona, para las cuales el peligro sísmico fue minimizado.
- Se observa que es posible generar un plan de producción sin una guía de incorporación previa, incorporando puntos de extracción de acuerdo a los criterios antes definidos para su agendamiento.
- Es posible generar recomendaciones en cuanto al comportamiento y parámetros que debiese tener la operación de un método Panel Caving al utilizar un modelo de peligro sísmico calibrado para dicho sector. En este caso se logra generar una recomendación de velocidades de extracción para cada una de las zonas para los puntos en quiebre.
- Se identifica el aporte productivo generado por el área nueva o incorporada y su comportamiento a lo largo de cada uno de los periodos.
- Se logra establecer para el Caso B o PND 2014-2018 una relación entre la variación de la probabilidad de Peligros Sísmico y el Valor Presente Neto. Dicha relación tiene un comportamiento en dos zonas; la primera con baja disminución del VPN igual 3.8% y una disminución de probabilidad del 13.4% y la segunda zona en la cual disminuye el VPN alcanza el 8.6% y una disminución de probabilidad de 1.4%

7.4.3 CASO C O MB_RENO

De la aplicación de la metodología en los distintos casos estudiados, se observa la variabilidad de los resultados correspondientes al comportamiento de los parámetros geotécnicos asignados el modelo, demostrando la consistencia de la metodología en su resolución y en la consideración de variables y restricciones del modelo de optimización.

- Se evidencia el impacto que tiene una mayor altura de columna equivalente sobre un punto de extracción, medido este como la distancia entre el punto y su intersección vertical a la topografía.

- Con respecto a la variable P10, se observa la importancia que esta tiene, incluso evitando en forma total la existencia de zonas con probabilidad de PS mayores al 7%, incluso considerando velocidades medias de extracción de 0.65 [tpd/m²].
- Con respecto a la utilización de la técnica de acondicionamiento Fracturamiento Hidráulico (FH), resulta en la disminución drástica del peligro en los casos analizados, sin embargo se debe considerar que el modelo de peligro sísmico fue calibrado principalmente para zonas las cuales en su mayoría fueron preparadas con dicha técnica, por lo tanto, debiese ser objeto de estudio el impacto en zonas sin preparar y la posterior calibración de modelo antes dicho objeto.

7.4.4 GENERALES A LA RESOLUCIÓN

- La metodología permite generar distintas iteraciones evaluando salidas de datos y modificando las nuevas entradas. Durante este proceso se disminuye o aumentan atributos de las actividades como su tasa de realización. Esto genera que la resolución del plan al estar restringidos por cotas inferiores y/o superiores para el consumo de actividades pueda significar en que el problema no tiene solución.

En este trabajo se disminuyó sucesivamente el parámetro de velocidad de extracción minimizando a su vez la probabilidad de peligro sísmico. En el caso de que este resulte infactible, implica que la última iteración es aquella que brinda el plan de menor peligro para el cual es posible generar un programa productivo de acuerdo a lo requerido

- Con respecto al Valor Presente Neto obtenido para cada iteración a lo largo de la resolución, se puede establecer la relación que tiene este con la disminución de la probabilidad de Peligro Sísmico. De esta forma se generan zonas donde se generan disminuciones considerables de probabilidad con una baja disminución del Valor.

Es importante comprender que a pesar de existir una disminución en el valor, lo que el modelo logra cuantificar es disminución en la probabilidad de generar eventos de Magnitud mayor a 1.5, es decir, eventos que ubicándose cercanos a niveles productivos pudiesen generar pérdida de vidas, daños en galerías, tiempo perdido en aislación y reparación, disminución del tonelaje extraído, cierre

temporal del sector por parte del SERNAGEOMIN e incluso comprometer el crecimiento del sector. La cuantificación del costo que tiene en el valor presente el efecto de cada una de las posibles consecuencias descritas anteriormente no se encuentra dentro de los alcances definidos en este trabajo.

7.5 TRABAJOS FUTUROS

- Profundización en el desarrollo del modelo de Peligro Sísmico, el cual permita una calibración automática y/o extrapolación de este, para su aplicación en otros sectores o minas.
- Utilizar la metodología iterativa para incluir en forma dinámica otras interferencias como colgaduras, sobretamaños y flujo de barro. Además de estudiar la aplicación a problemas de otra índole utilizando las iteraciones como base para generar soluciones más robustas y justificadas cuantitativamente.
- Utilización del software UDESS para la resolución de problemas de corto, mediano y largo plazo, unificando procesos que hoy se calculen en forma separada y así estudiar el real impacto que tiene una actividad sobre otras.

Finalmente el aporte que genera este trabajo de tesis a la planificación minera de Panel Caving consisten en la incorporación del peligro sísmico como interferencia operaciones de origen geotécnico; minimizando y cuantificando la probabilidad de ocurrencia de un evento de determinada magnitud en un espacio temporal. De este modo, se generan recomendaciones al programa productivo y permite tomar decisiones sobre información cuantitativa.

CAPITULO 8 BIBLIOGRAFÍA

- [1] GMT, “Modelo de Peligro Sísmico para el sustento del plan exploratorio”, 2014.
- [2] Delphos Laboratory, *Universal Delphos Sequencer & Scheduler (UDESS)*. 2011.
- [3] SME- Society for Mining, Metallurgy & Exploration, *SME Mining Engineering Handbook*, 3rd ed. 2011.
- [4] A. M. Newman, E. Rubio, R. Caro, A. Weintraub, y K. Eureka, “A Review of Operations Research in Mine Planning”, *Interfaces*, vol. 40, n° 3, pp. 222–245, abr. 2010.
- [5] V. Kazakidis, “Operating Risk: Planning for Flexible Mining Systems”, The University of British Columbia, 2001.
- [6] H. L. Hartman y J. M. Mutmanský, *Introductory Mining Engineering*, 2nd Edition. 2002.
- [7] E. T. Brown, *Block Caving Geomechanics*. Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, The University of Queensland, 2002.
- [8] P. Cavieres, “Evolución de los Métodos de Explotación en la Mina El Teniente”. 1999.
- [9] E. Rubio y T. Diering, “Block cave production planning using operation research tools”, presentado en Massmin, Santiago de Chile, 2004, pp. 141–149.
- [10] D. Bustamante, H. Constanzo, y M. Larraín, “Mine Planning at El Teniente”, presentado en MassMin 2012, 2012.
- [11] J. Hadjigeorgiou, Ed., *Strategic vs tactical approaches in mining: proceedings of the third international seminar on strategic vs tactical approaches in mining : September 28th to October 1st, Quebec City, Canada*. Quebec City: Department of mining, metallurgical and materials engineering, 2008.
- [12] J. L. Maldonado Meza, “Modelo de Planificación Integrado Mina-Transporte-Planta División El Teniente Codelco Chile”, 2009.
- [13] I. Navia, “Análisis del ingreso de agua-barro al sector Diablo Regimiento, División El Teniente, Codelco”, Universidad de Chile, 2014.
- [14] K. Larsson, “Seismicity in Mines”, Lulea University of Technology.
- [15] R. Estay, “Metodología para la evaluación del desempeño de Indicadores Sísmicos en Sismicidad Inducida por la Minería”, Universidad de Chile, 2014.
- [16] T. Hanks y H. Kanamori, “A moment Magnitude Scale”, *JGR*, vol. 84, No. B5, p. 3.

- [17] J. Cornejo, J. Vallejos, X. Emery, y E. Rojas, “Seismic hazard analysis at the El Teniente Mine using a clustering approach”, presentado en Caving 2014, Santiago de Chile, 2014, pp. 575–585.
- [18] J. Cornejo, “Identificación de zonas de peligro mediante análisis de agrupamiento de eventos sísmicos”, Universidad de Chile, 2013.
- [19] C. Hinrichsen, “Planificación Minera de Largo Plazo ¿Táctica o Estratégica?”, *gem-perspectiva.com*, 2010. [En línea]. Disponible en: <http://gem-perspectiva.com/>.
- [20] www.informs.org, “What is Operations Research?”
- [21] R. W. Barbaro y R. V. Ramani, “Generalized multiperiod MIP model for production scheduling and processing facilities selection and location”, *Min. Eng.*, vol. 38, n° 2, pp. 107–114, 1986.
- [22] C. Qinglin, B. Stillborg, C. Li, W. Hennies, L. Ayres da Silva, y A. Chaves, “Optimization of underground mining methods using grey theory and neural networks”, *5th Intern. Symp. Mine Plan. Equip. Sel. MPES Sao Paulo Braz.*, pp. 393–398, 1996.
- [23] E. Rubio, “Long term planning of block caving operations using mathematical programming tools”, University of British Columbia, 2002.
- [24] D. Rahal, M. Smith, G. Van Hout, y A. Von Johannides, “The use of mixed integer linear programming for long-term scheduling in block caving mines”, en *Proceedings APCOM*, 2003, vol. 2003, p. 31st.
- [25] Q. X. Yun, W. W. Guo, Y. F. Chen, C. W. Lu, y M. J. Lian, “Evolutionary algorithms for the optimization of production planning in underground mines”, *Appl. Comput. Oper. Res. Miner. Ind. South Afr. Inst. Min. Metall.*, pp. 311–314, 2003.
- [26] A. M. Newman y M. Kuchta, “Using aggregation to optimize long-term production planning at an underground mine”, *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 176, n° 2, pp. 1205–1218, ene. 2007.
- [27] R. Epstein, M. Goic, A. Weintraub, J. Catalán, P. Santibáñez, R. Urrutia, R. Cancino, S. Gaete, A. Aguayo, y F. Caro, “Optimizing Long-Term Production Plans in Underground and Open-Pit Copper Mines”, *Oper. Res.*, vol. 60, n° 1, pp. 4–17, feb. 2012.
- [28] G. A. Davis y A. M. Newman, “Modern Strategic Mine Planning”, *Aust. Min.*, vol. 129, 2008.
- [29] Y. Pourrahimian, “Mathematical programming for sequence optimization in block cave mining”, University of Alberta, 2013.

- [30] E. A. Vargas Vierling, “Cálculo de envolvente económica para minas de caving bajo incertidumbre geológica”, Universidad de Chile, 2014.
- [31] S. Troncoso, “Simulación del Impacto de Interferencias Operacionales para la Planificación de Producción”, Universidad de Chile, 2006.
- [32] M. Armstrong, A. Galli, y R. Razanatsimba, “Using multistage stochastic optimisation to manage major production incidents”, *Min. Technol.*, vol. 121, n° 3, pp. 125–131, sep. 2012.
- [33] M. Alarcón, “Valorización del aumento de confiabilidad en planes de producción de sistemas mineros subterráneos”, Universidad de Chile, 2014.
- [34] W. Rocher, E. Rubio, y N. Morales, “Eight-Dimensional Planning–Construction of an Integrated Model for Mine Planning Involving Constructability”.
- [35] M. A. Martínez y A. M. Newman, “A solution approach for optimizing long- and short-term production scheduling at LKAB’s Kiruna mine”, *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 211, n° 1, pp. 184–197, may 2011.
- [36] P. Kaiser, L. Cotesta, y A. Dasys, “Planning and Design of Underground Engineering utilizing common earth model and Immersive Virtual Reality”, vol. 25, pp. 1182–1189, 2006.
- [37] P. Kaiser, P. Vasak, y F. Suorineni, “Hazard assesment in burst-prone mines- seismic data interpretation with 3D virtual reality”, presentado en Eurorock, 2005, pp. 239–247.
- [38] W. Rocher, “Secuenciamiento óptimo de preparacion minera subterránea”, 2012.
- [39] Gurobi Optimization, Inc., *Gurobi Optimizer Reference Manual*. 2015.
- [40] *CBC-Coin OR Branch adn Cut*. .
- [41] A. Gómez, “Secuenciamiento multicriterio para minería subterránea selectiva”, *Repos. Académico - Univ. Chile*, 2015.
- [42] F. Arriagada, “Secuenciamiento Optimizado considerando Regla de Mezcla”, Universidad de Chile, 2015.
- [43] T. Tapia, “Metodología de control del riesgo en planes de minería a cielo abierto sujetos a incertidumbre”, *Repos. Académico - Univ. Chile*, 2015.
- [44] Guido Van Rossum, *Python 2.7*

CAPITULO 9

ANEXOS

9.1 SCRIPT PYTHON

El siguiente código es genérico y se utiliza para inicializar UDESS desde comandos Python.

```
# Create an empty dictionary
projectInfo = {}
# Create initial values
projectInfo["Tab"] = None
projectInfo["Name"] = None
projectInfo["Folder"] = None
projectInfo["Project"] = {"Filename": None, "Delimiter": None, "Attributes": None, "Periods": None, "Rate": None}
projectInfo["Precedences"] = {"File": None, "G": None}
projectInfo["Constraints"] = {"OR": None, "GR": None, "MP": None, "AI": None, "SC": None, "SP": None}
projectInfo["Solver"] = {"Solver": None, "Method": None, "sp": None, "Ips": None, "Output": None, "Finish": None,
                        "MIPGap": None, "LPFile": None}

# Tab
projectInfo["Tab"] = 3
# Project Name
projectInfo["Name"] = característica_corrida
# Folderc
projectInfo["Folder"] = carpeta_iteracion
# ~ projectInfo["Folder"] = "..\examples\"
# Activity file path
projectInfo["Project"]["Filename"] = Ruta_actividades
# ActivityFile Delimiter
projectInfo["Project"]["Delimiter"] = ",";
# Activity Attributes
attrs = list()
# Name (required)
attrs.append("ID")
# Length
attrs.append(None)
# Income (required)
attrs.append("INCOME")
# Cost
attrs.append("COST")
# Pre Cost
attrs.append(None)
# Post Cost
attrs.append(None)
# Min Rate
attrs.append("MIN_RATE")
# attrs.append(None)
# Max Rate (required)
attrs.append("MAX_RATE")
# Sub Activity
attrs.append(None)
projectInfo["Project"]["Attributes"] = attrs
# Project Periods and Discount Rates
periods = list()
rates = list()
periods = periodos_udess
rates = [tasa_dscnto for i in xrange(len(periods))]
projectInfo["Project"]["Periods"] = periods
```

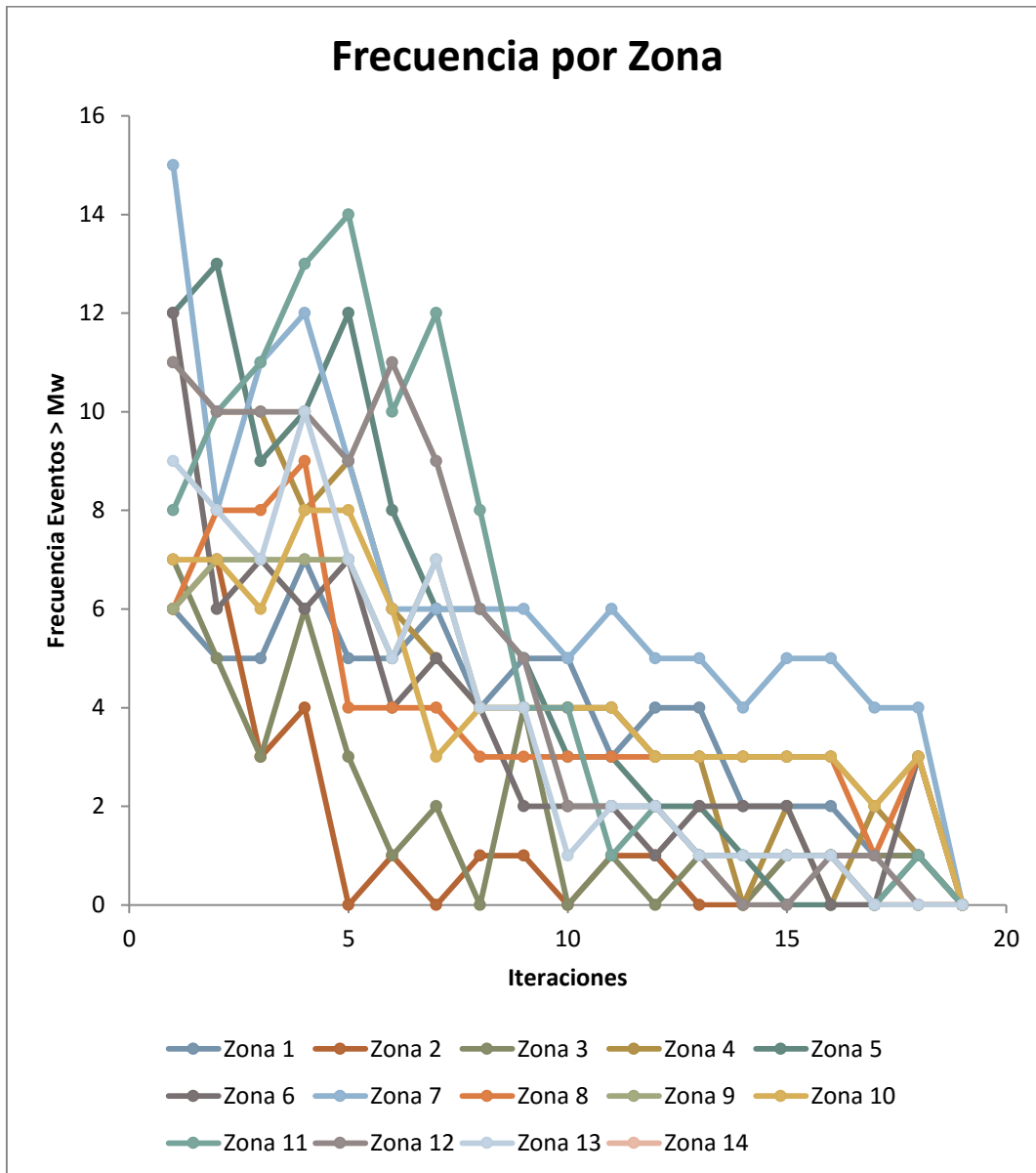
```

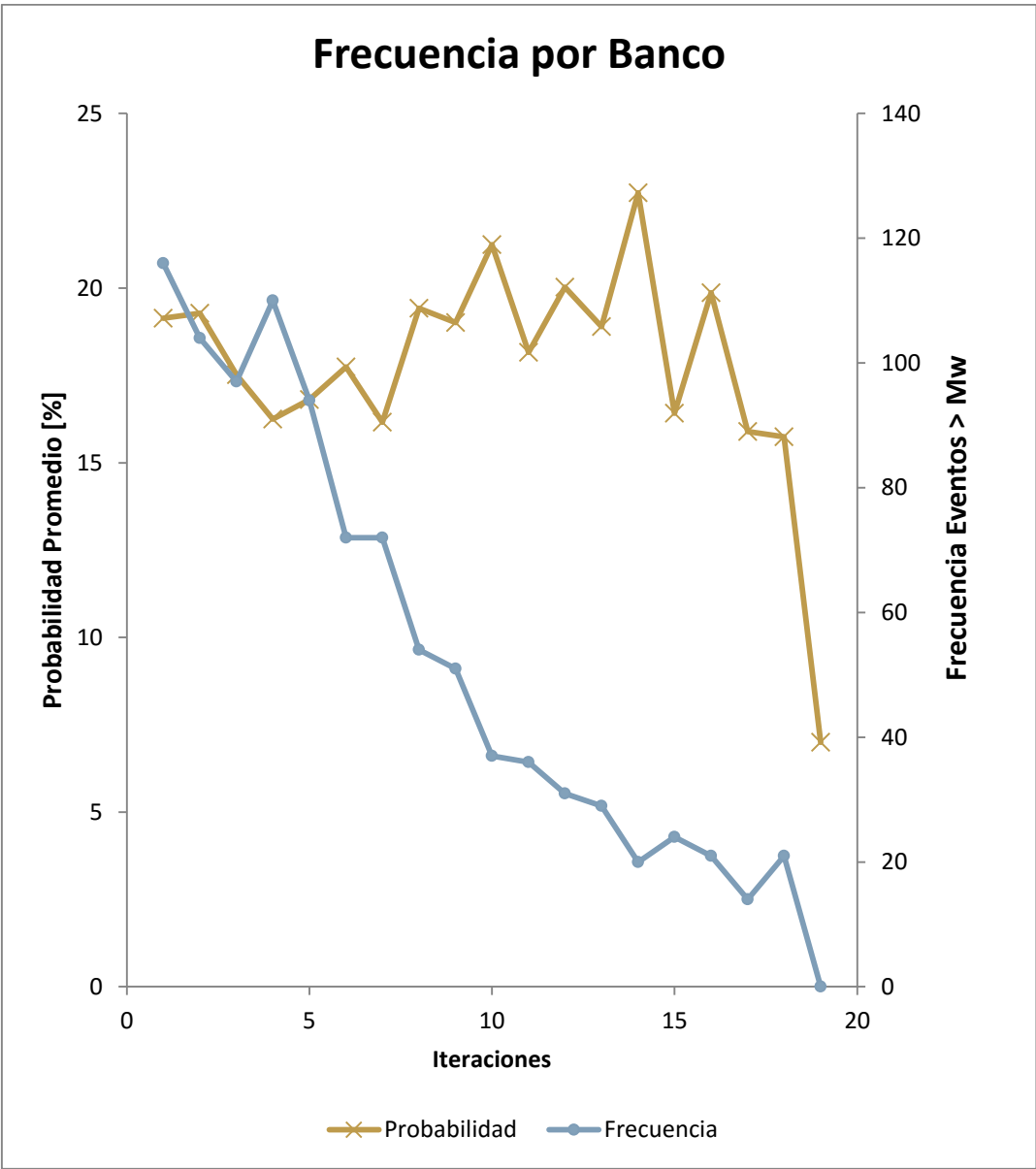
projectInfo["Project"]["Rate"] = rates
# Precedence Settings
projectInfo["Precedences"]["File"] = Ruta_precedencias
projectInfo["Precedences"]["G"] = True
# Creation Constraints
# Resource Constraints
c1 = list()
# restricciones produccion
aux = ["ORC[0]", "TON_BLOQUE", 1, P, round(float(ktpd * meses * dias), 0), round(float(ktpd * meses * dias * 1.6))]
c1.append(aux)
projectInfo["Constraints"] = {}
projectInfo["Constraints"]["OR"] = c1
# Solver Settings
# Solver
projectInfo["Solver"]["Solver"] = "gurobi"
# Method
# projectInfo["Solver"]["Method"] = "full"
projectInfo["Solver"]["Method"] = "heuristic"
if (projectInfo["Solver"]["Method"] == "heuristic"):
    projectInfo["Solver"]["sp"] = 4
    projectInfo["Solver"]["lps"] = 4
projectInfo["Solver"]["MIPGap"] = 5.0
projectInfo["Solver"]["Output"] = Ruta_output
projectInfo["Solver"]["Output"] = outFiles
projectInfo["Solver"]["LPFile"] = False
projectInfo["Solver"]["Finish"] = False
# Create .uds
filename = projectInfo["Name"] + ".uds"
path = str(projectInfo["Folder"] + filename)
f = open(str(path), "w")
f.write(json.dumps(projectInfo))
f.close()

```

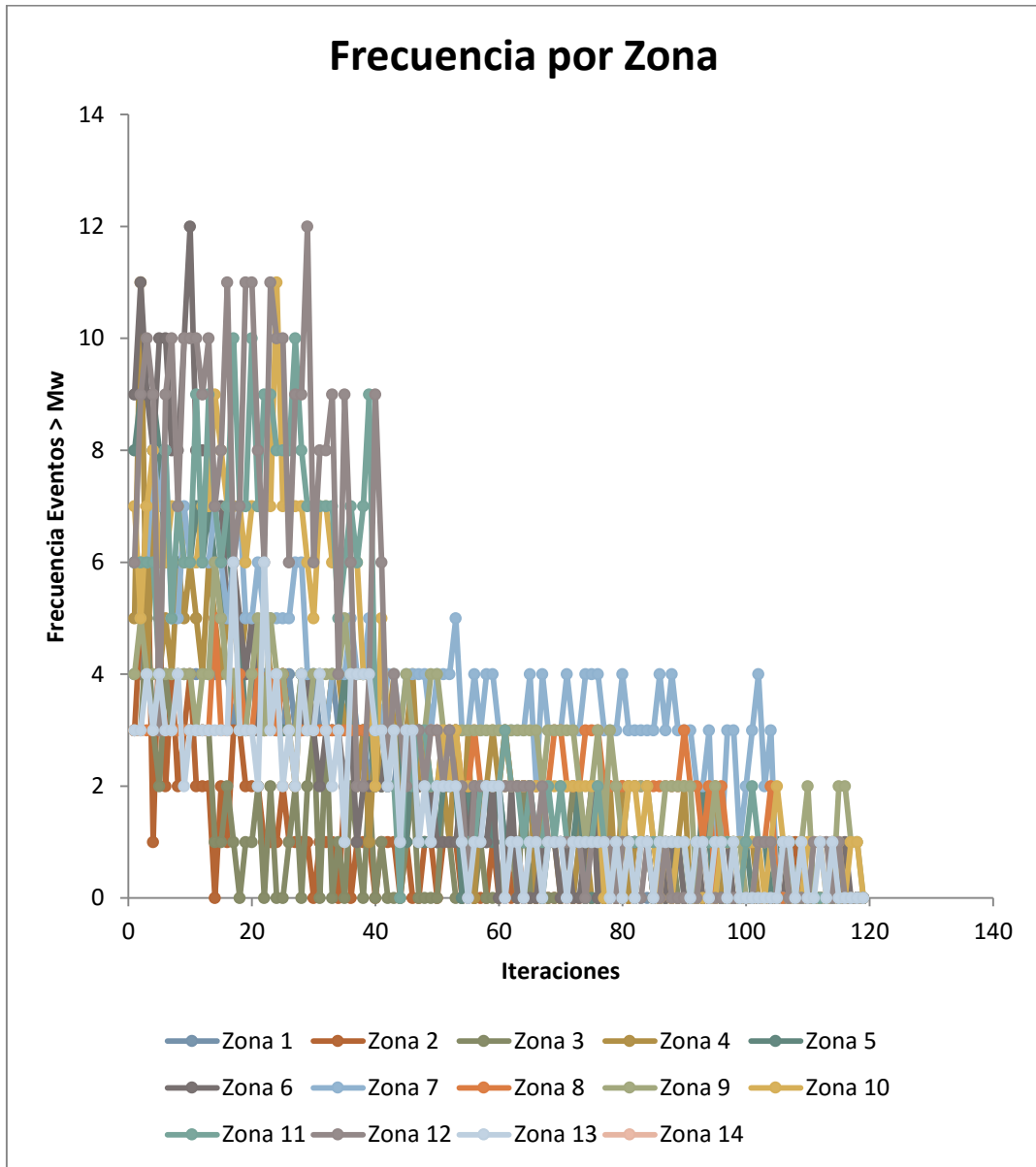
9.2 INFORMACIÓN DE CASOS

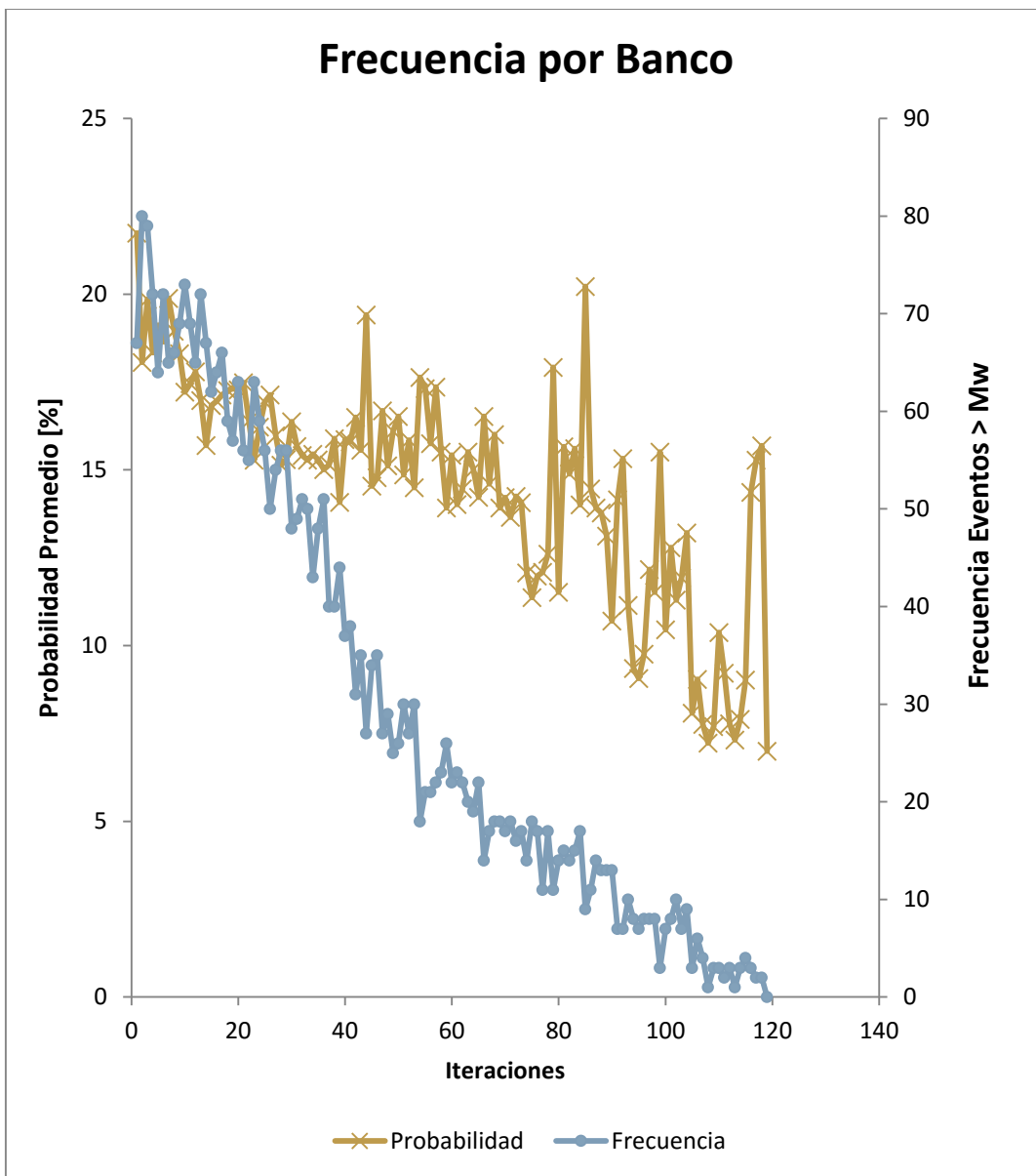
9.2.1 CASO A: PSPEX 2006-2013



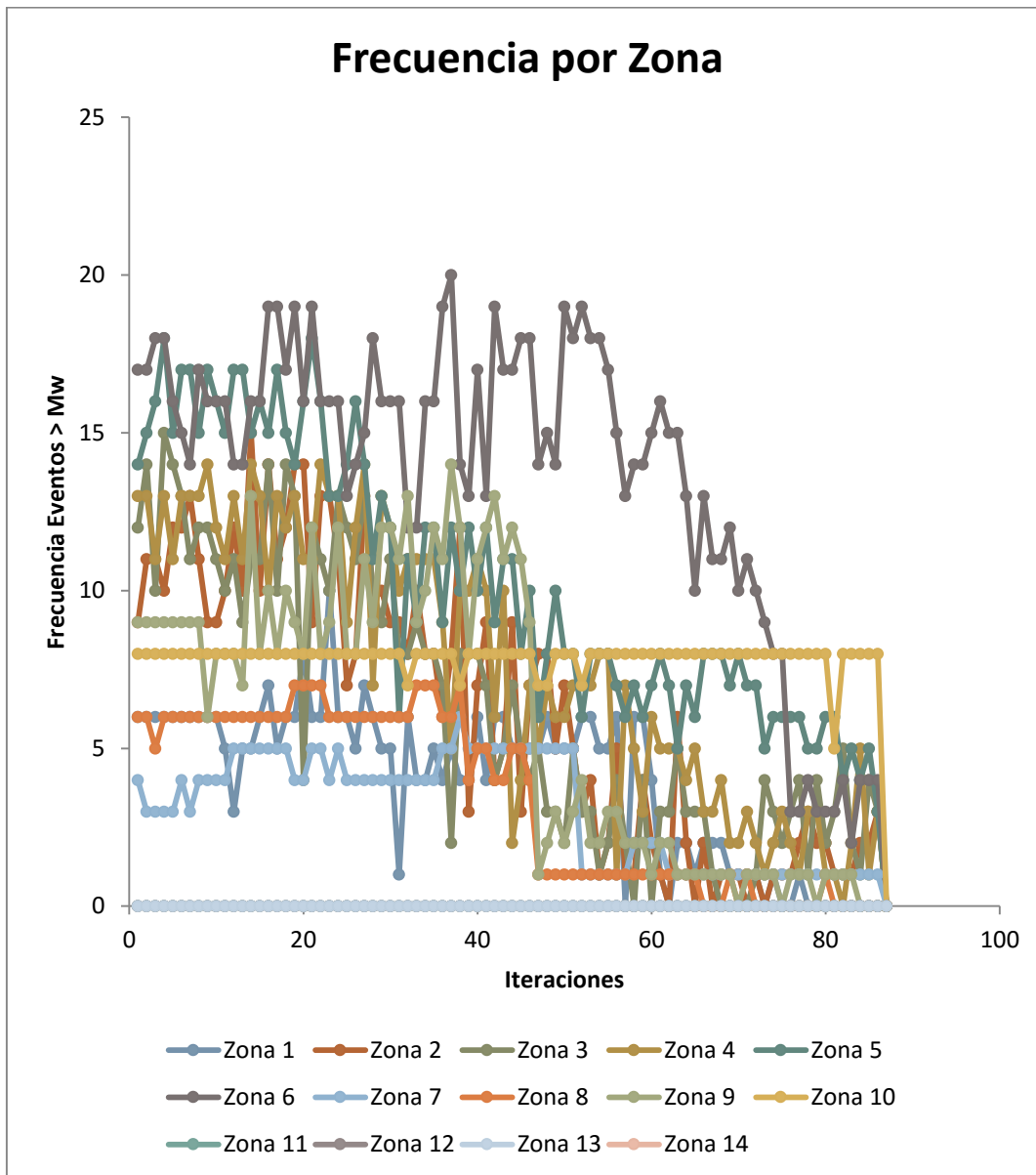


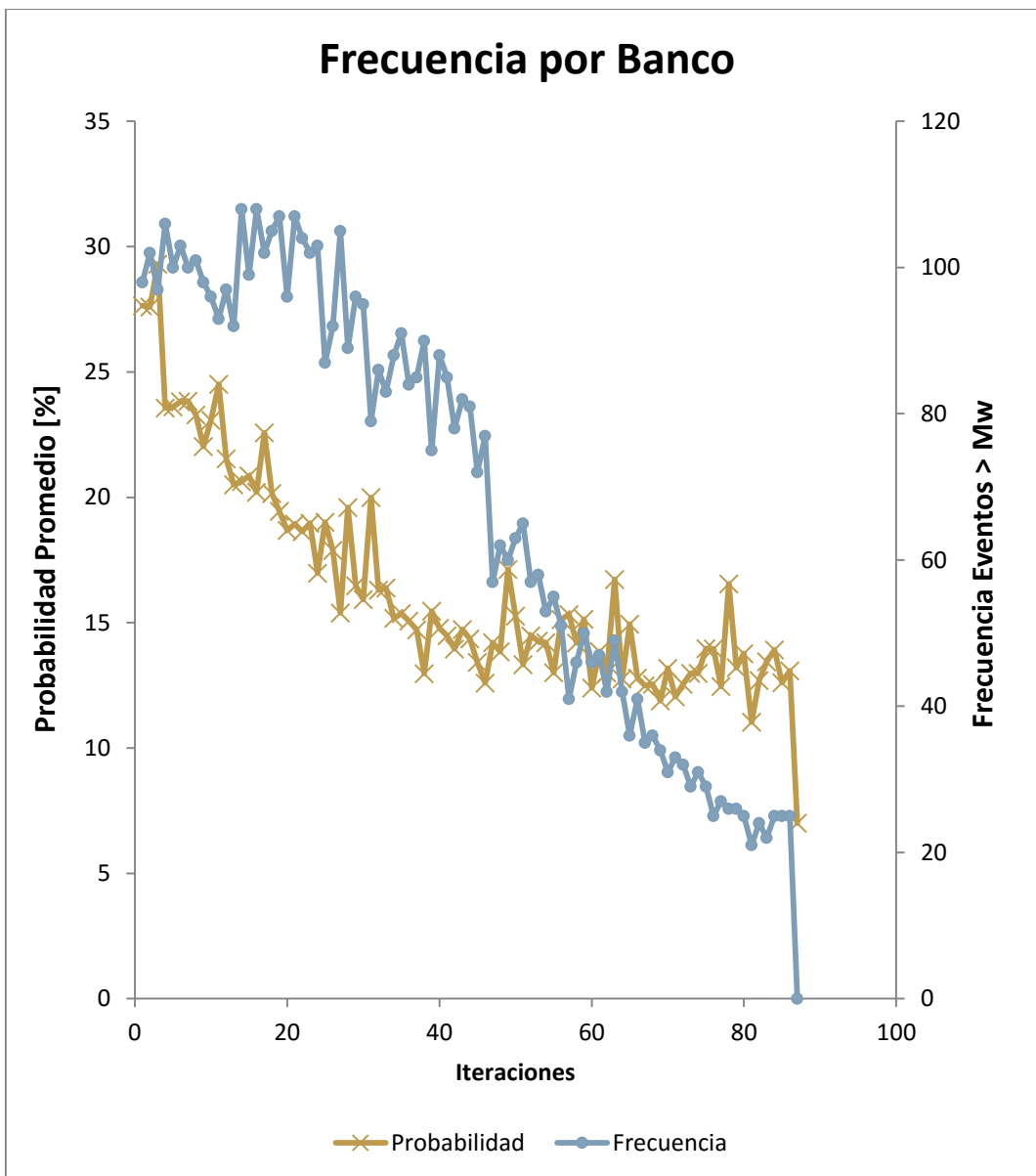
9.2.2 CASO A: PSPEX 2009-2013





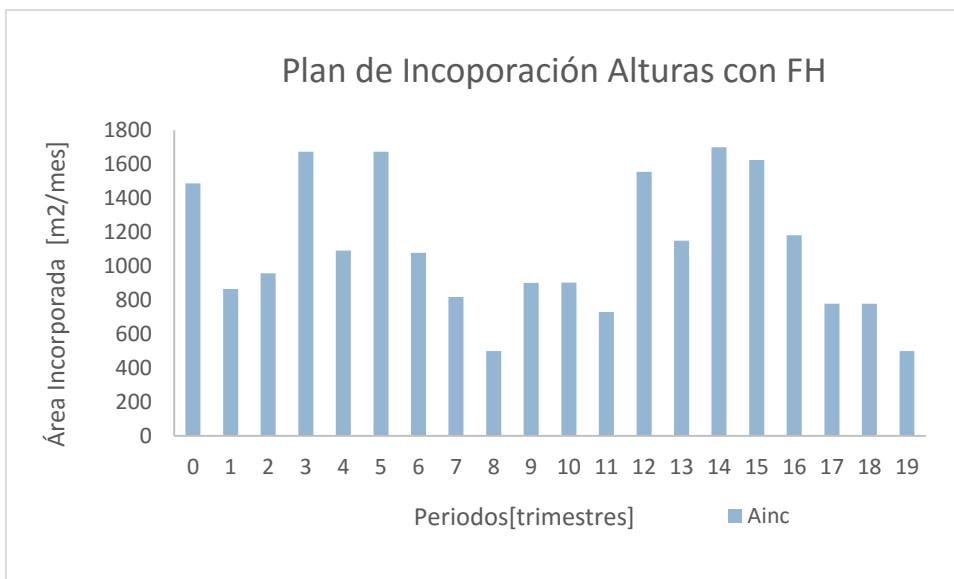
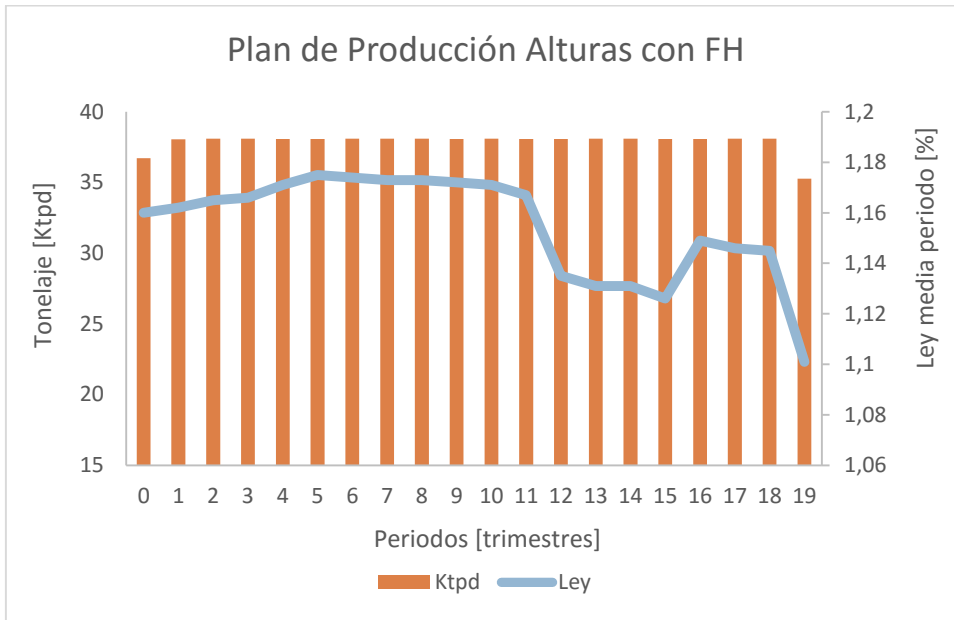
9.2.3 CASO B: PND 2014-2018



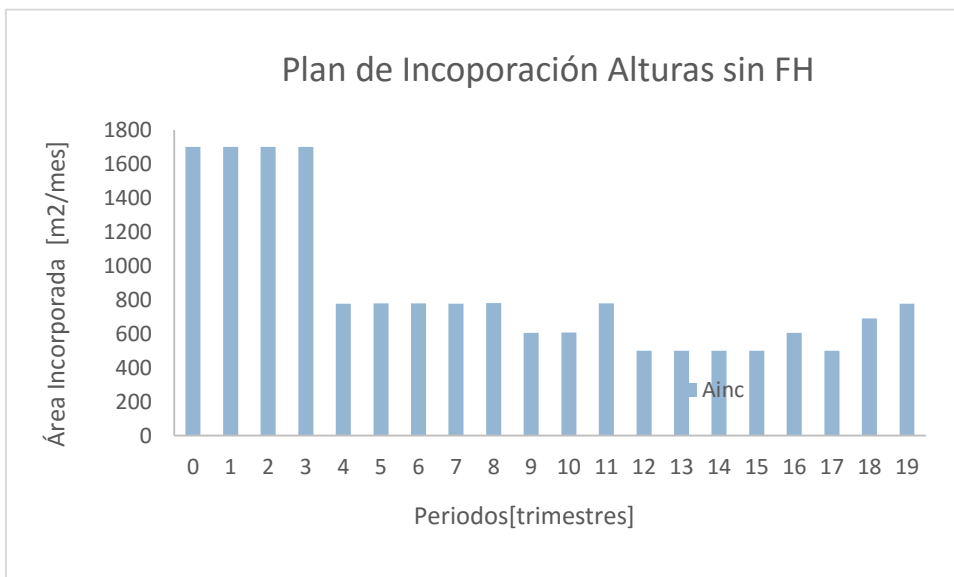
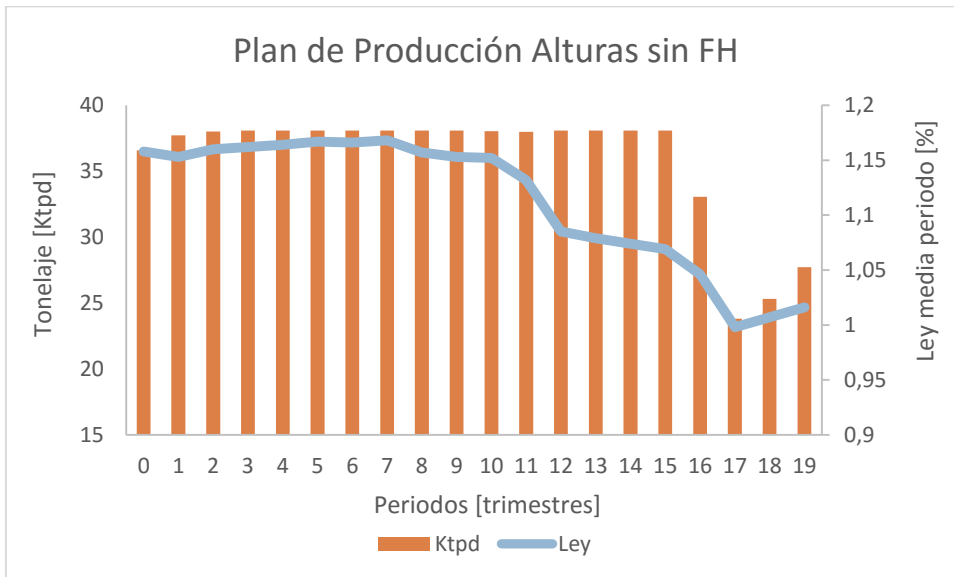


9.2.4 CASO C: MB_RENO

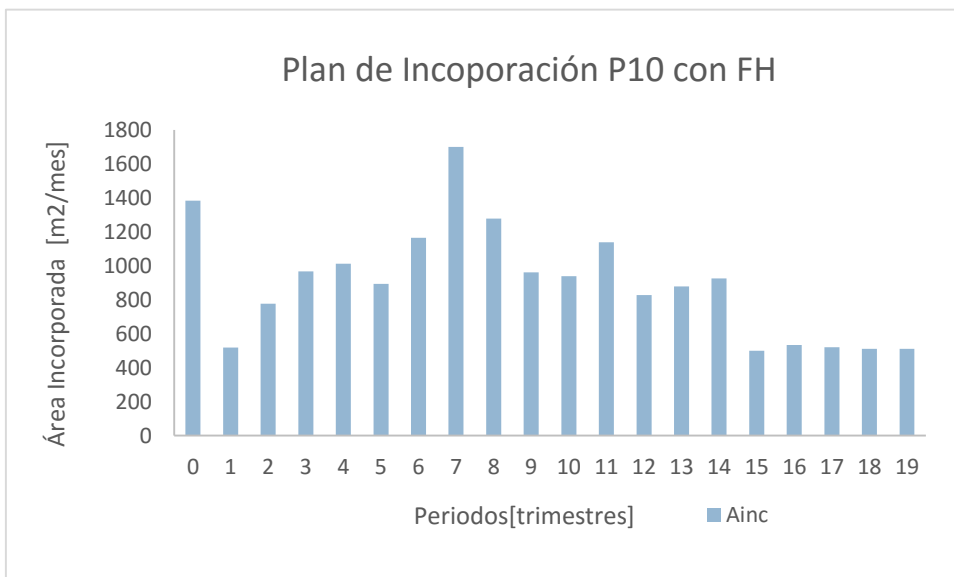
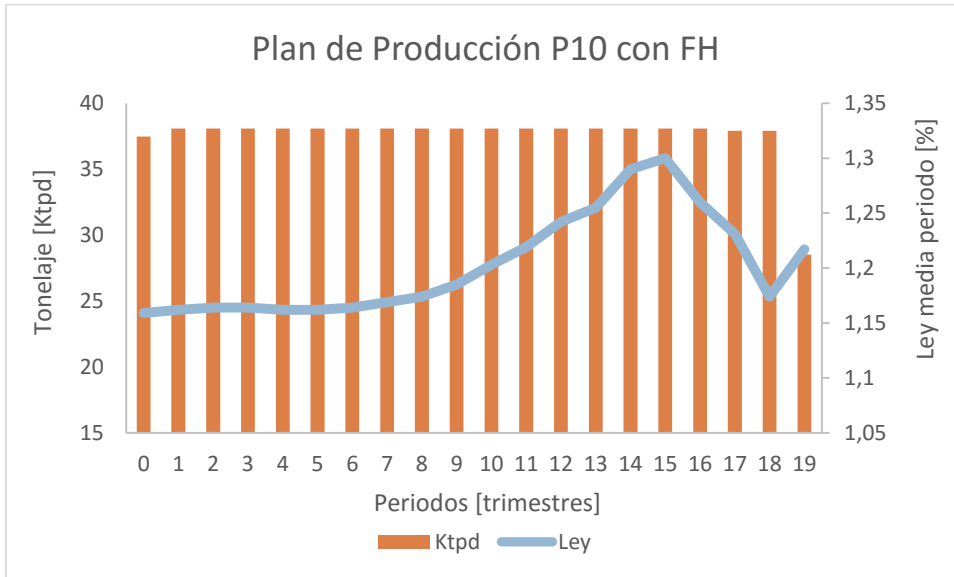
9.2.4.1 PLANES VARIACIÓN ALTURA CON FH



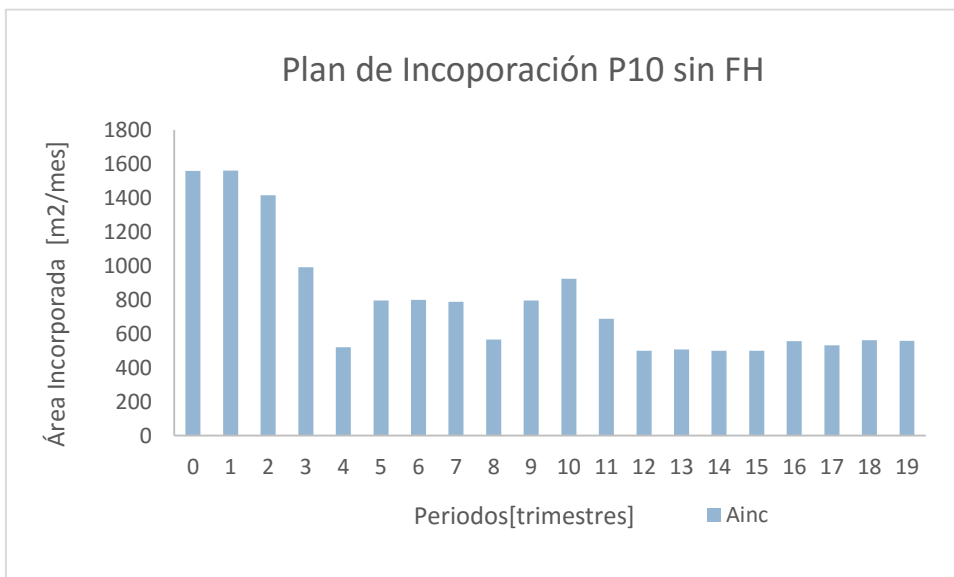
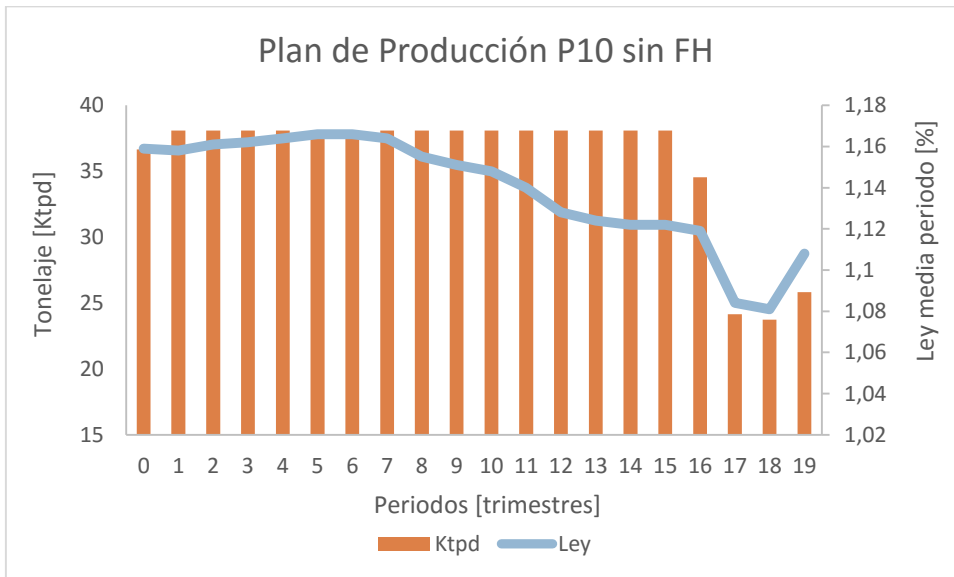
9.2.4.2 PLANES VARIACIÓN ALTURA SIN FH



9.2.4.3 PLANES VARIACIÓN P10 CON FH



9.2.4.4 PLANES VARIACIÓN P10 CON FH



9.3 TIEMPOS DE RESOLUCIÓN

9.3.1 CASO A PSPEX 2009-2013

Iteración	Tiempo[seg]	T_acum[min]	T_prom[min]
0	293.90	4.90	4.90
1	502.33	8.37	3.47
2	747.49	12.46	4.09
3	907.24	15.12	2.66
4	1109.51	18.49	3.37
5	1316.13	21.94	3.44
6	1499.21	24.99	3.05
7	1691.53	28.19	3.21
8	1852.98	30.88	2.69
9	2029.13	33.82	2.94
10	2273.68	37.89	4.08
11	2454.55	40.91	3.01
12	2646.91	44.12	3.21
13	2945.90	49.10	4.98
14	3186.09	53.10	4.00
15	3349.89	55.83	2.73
16	3482.23	58.04	2.21
17	3629.65	60.49	2.46
18	3866.90	64.45	3.95
19	4172.22	69.54	5.09
20	4368.75	72.81	3.28
21	4559.16	75.99	3.17
22	4767.33	79.46	3.47
23	4966.21	82.77	3.31
24	5208.23	86.80	4.03
25	5350.25	89.17	2.37
26	5575.02	92.92	3.75
27	5773.43	96.22	3.31
28	5944.26	99.07	2.85
29	6154.74	102.58	3.51
30	6374.59	106.24	3.66
31	6583.30	109.72	3.48
32	6811.41	113.52	3.80
33	7024.11	117.07	3.54
34	7327.62	122.13	5.06
35	7554.37	125.91	3.78

36	7784.86	129.75	3.84
37	7915.63	131.93	2.18
38	8116.84	135.28	3.35
39	8365.66	139.43	4.15
40	8676.14	144.60	5.17
41	8863.15	147.72	3.12
42	9103.71	151.73	4.01
43	9322.07	155.37	3.64
44	9514.21	158.57	3.20
45	9728.73	162.15	3.58
46	10029.16	167.15	5.01
47	10222.59	170.38	3.22
48	10442.76	174.05	3.67
49	10631.19	177.19	3.14
50	10832.80	180.55	3.36
51	11126.36	185.44	4.89
52	11308.29	188.47	3.03
53	11612.92	193.55	5.08
54	11943.94	199.07	5.52
55	12206.89	203.45	4.38
56	12440.51	207.34	3.89
57	12666.84	211.11	3.77
58	12984.27	216.40	5.29
59	13204.09	220.07	3.66
60	13486.97	224.78	4.71
61	13708.29	228.47	3.69
62	13938.79	232.31	3.84
63	14177.05	236.28	3.97
64	14375.41	239.59	3.31
65	14632.59	243.88	4.29
66	14845.14	247.42	3.54
67	15079.82	251.33	3.91
68	15436.89	257.28	5.95
69	15694.26	261.57	4.29
70	15957.13	265.95	4.38
71	16184.47	269.74	3.79
72	16361.71	272.70	2.95
73	16645.97	277.43	4.74
74	17005.03	283.42	5.98
75	17419.71	290.33	6.91
76	17747.71	295.80	5.47
77	18067.33	301.12	5.33

78	18247.33	304.12	3.00
79	18601.11	310.02	5.90
80	18912.86	315.21	5.20
81	19199.22	319.99	4.77
82	19502.31	325.04	5.05
83	19844.08	330.73	5.70
84	20086.33	334.77	4.04
85	20410.67	340.18	5.41
86	20797.50	346.63	6.45
87	21265.56	354.43	7.80
88	21660.44	361.01	6.58
89	22152.90	369.22	8.21
90	22472.96	374.55	5.33
91	22859.86	381.00	6.45
92	23246.93	387.45	6.45
93	23919.94	398.67	11.22
94	24471.73	407.86	9.20
95	24919.51	415.33	7.46
96	25568.09	426.13	10.81
97	26221.24	437.02	10.89
98	27011.31	450.19	13.17
99	27530.57	458.84	8.65
100	28062.26	467.70	8.86
101	28887.12	481.45	13.75
102	29428.42	490.47	9.02
103	30028.30	500.47	10.00
104	30645.45	510.76	10.29
105	31187.53	519.79	9.03
106	31784.13	529.74	9.94
107	32415.14	540.25	10.52
108	33081.72	551.36	11.11
109	33608.27	560.14	8.78
110	34457.87	574.30	14.16
111	35185.90	586.43	12.13
112	35965.16	599.42	12.99
113	36643.69	610.73	11.31
114	37062.11	617.70	6.97
115	37767.87	629.46	11.76
116	38329.86	638.83	9.37
117	38913.43	648.56	9.73
118	39552.80	659.21	10.66

9.3.2 CASO A PSPEX 2006-2013

Iteración	Tiempo[seg]	Tiempo[min]	T_acum[Hr]	T_prom[hr]
0	5081.29	84.69	1.41	1.41
1	8948.87	149.15	2.49	1.07
2	14033.68	233.89	3.90	1.41
3	18436.54	307.28	5.12	1.22
4	24183.62	403.06	6.72	1.60
5	29448.56	490.81	8.18	1.46
6	36937.19	615.62	10.26	2.08
7	46557.59	775.96	12.93	2.67
8	55536.47	925.61	15.43	2.49
9	62461.50	1041.02	17.35	1.92
10	72848.95	1214.15	20.24	2.89
11	82170.60	1369.51	22.83	2.59
12	99658.58	1660.98	27.68	4.86
13	112105.46	1868.42	31.14	3.46
14	129419.76	2157.00	35.95	4.81
15	146134.43	2435.57	40.59	4.64
16	160631.08	2677.18	44.62	4.03
17	170027.00	2833.78	47.23	2.61

9.3.3 CASO B PND 2014-2018

Iteración	Tiempo[seg]	T_acum[min]	T_prom[min]
0	345.16	5.75	5.75
1	683.89	11.40	5.65
2	1002.96	16.72	11.07
3	1312.66	21.88	10.81
4	1644.30	27.40	16.60
5	1947.57	32.46	15.86
6	2266.05	37.77	21.91
7	2568.10	42.80	20.90
8	2879.09	47.98	27.09
9	3197.89	53.30	26.21
10	3532.07	58.87	32.66
11	3967.76	66.13	33.47
12	4273.29	71.22	37.75
13	4605.36	76.76	39.01

14	4924.23	82.07	43.07
15	5236.98	87.28	44.22
16	5530.80	92.18	47.96
17	5806.13	96.77	48.81
18	6083.80	101.40	52.59
19	6430.11	107.17	54.58
20	6703.72	111.73	57.15
21	7098.89	118.31	61.16
22	7382.31	123.04	61.87
23	7694.64	128.24	66.37
24	8004.88	133.41	67.04
25	8273.36	137.89	70.84
26	8601.00	143.35	72.51
27	8907.09	148.45	75.95
28	9197.40	153.29	77.34
29	9530.86	158.85	81.50
30	9889.83	164.83	83.33
31	10197.10	169.95	86.63
32	10499.42	174.99	88.37
33	10857.45	180.96	92.59
34	11180.87	186.35	93.76
35	11374.32	189.57	95.82
36	11720.79	195.35	99.53
37	12017.12	200.29	100.76
38	12284.57	204.74	103.99
39	12585.94	209.77	105.78
40	12887.26	214.79	109.01
41	13088.77	218.15	109.14
42	13382.63	223.04	113.91
43	13694.74	228.25	114.34
44	13996.26	233.27	118.93
45	14309.08	238.48	119.55
46	14504.50	241.74	122.19
47	14818.70	246.98	124.79
48	15104.46	251.74	126.95
49	15418.30	256.97	130.02
50	15683.34	261.39	131.37
51	15953.99	265.90	134.53
52	16255.33	270.92	136.39
53	16458.22	274.30	137.91
54	16656.95	277.62	139.70
55	16917.04	281.95	142.25

56	17195.53	286.59	144.35
57	17430.43	290.51	146.16
58	17738.19	295.64	149.47
59	18036.01	300.60	151.13
60	18304.95	305.08	153.96
61	18634.58	310.58	156.62
62	18809.50	313.49	156.87
63	19135.96	318.93	162.06
64	19314.88	321.91	159.85
65	19494.79	324.91	165.06
66	19783.36	329.72	164.66
67	19940.48	332.34	167.68
68	20115.60	335.26	167.58
69	20274.48	337.91	170.33
70	20437.86	340.63	170.31
71	20589.36	343.16	172.85
72	20736.21	345.60	172.75
73	20878.37	347.97	175.22
74	21036.72	350.61	175.39
75	21182.99	353.05	177.66
76	21346.30	355.77	178.11
77	21496.10	358.27	180.15
78	21641.46	360.69	180.54
79	21787.86	363.13	182.59
80	21925.80	365.43	182.84
81	22069.47	367.82	184.99
82	22215.07	370.25	185.26
83	22346.53	372.44	187.18
84	22480.07	374.67	187.49
85	22625.70	377.10	189.61