

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Descripción del problema.....	4
1.2 Objetivos.....	6
1.2.1 Objetivo general.....	6
1.2.2 Objetivos específicos.....	6
1.3 Alcances.....	6
1.4 Metodología.....	7
CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES GENERALES.....	9
2.1 Preparación minera en <i>block caving</i>	9
2.2 Excavaciones horizontales.....	11
2.3 Investigación de operaciones en preparación minera.....	13
2.3.1 Modelo de agendamiento de actividades de preparación minera de largo plazo.....	13
2.3.2 Modelo de asignación de equipos en preparación minera de block o panel caving.....	14
2.3.3 Modelo de simulación de excavaciones horizontales.....	14
2.4 Herramientas computacionales para optimización.....	15
2.4.1 Python 2.7.....	15
2.4.2 PuLP.....	16
CAPÍTULO 3. MINA EL TENIENTE.....	18
3.1 Generalidades.....	18
3.2 Preparación Minera en El Teniente.....	18
3.2.1 Modelo de Negocios.....	19
3.2.2 Planificación de la Preparación Minera.....	20
3.3 Caso base: Esmeralda Sur.....	21

3.3.1	Actividades	24
3.3.2	Equipos	26
3.3.3	Restricciones operativas.....	26
CAPÍTULO 4. MODELO PROPUESTO DE AGENDAMIENTO DE EXCAVACIONES HORIZONTALES		28
4.1	Consideraciones del modelo propuesto	28
4.2	Modelo de programación lineal entero	30
4.2.1	Notación	30
4.2.2	Parámetros.....	30
4.2.3	Variables	31
4.2.4	Restricciones.....	32
4.2.5	Función objetivo	34
CAPÍTULO 5. IMPLEMENTACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO		36
5.1	Implementación del modelo	36
5.2	Ejemplo de aplicación del modelo	40
5.3	Validación por inspección visual.....	41
5.3.1	Detenciones autorizadas	42
5.3.2	Actividades simultáneas	42
5.3.3	Precedencias de actividades	43
5.3.4	Otros reportes	43
CAPÍTULO 6. COMPARACIÓN DE ESTRATEGIAS DE AGENDAMIENTO		44
6.1	Aplicación en caso real – Mina Esmeralda	44
6.2	Resultados.....	46
6.2.1	Estrategia de agendamiento 1	46
6.2.2	Estrategia de agendamiento 2.....	46
6.2.3	Comparación de estrategias.....	47
6.2.4	Comparación con programación manual	47

6.2.5	Modificaciones del modelo propuesto.....	48
CAPÍTULO 7.	OTRAS APLICACIONES	50
7.1	Evaluación de horarios de tronadura.....	50
7.2	Análisis de sensibilidad de equipos.....	51
7.3	Análisis de sensibilidad de duración de actividades	51
CAPÍTULO 8.	CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.....	52
8.1	Conclusiones	52
8.2	Trabajo futuro.....	53
CAPÍTULO 9.	BIBLIOGRAFÍA.....	55

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA I. DESCRIPCIÓN DE ÁREAS DE OBRA DE PREPARACIÓN MINERA. (CAMHI, 2012).....	10
TABLA II. GALERÍAS NIVEL DE PRODUCCIÓN.....	21
TABLA III. PROGRAMA DE REV. B 2015 DE DESARROLLOS HORIZONTALES NIVEL DE PRODUCCIÓN MINA ESMERALDA SUR CORRESPONDIENTE AL MES DE DE OCTUBRE POR FRENTE DE AVANCE Y SECCIÓN DE GALERÍAS Y METROS A DESARROLLAR.....	23
TABLA IV. ACTIVIDADES Y SUB-ACTIVIDADES DEL CICLO DE AVANCE DE DESARROLLOS HORIZONTALES PARA EL NIVEL DE PRODUCCIÓN DE MINA ESMERALDA EL TENIENTE. PROPUESTA DE EMPRESA GEOVITA.....	25
TABLA V. FLOTA TOTAL DE EQUIPOS PARA DESARROLLOS HORIZONTALES DE LA EMPRESA CONTRATISTA EN MINA ESMERALDA.....	26
TABLA VI. FLOTA DE EQUIPOS PARA DESARROLLOS HORIZONTALES DEL NIVEL DE PRODUCCIÓN DE MINA ESMERALDA.....	26
TABLA VII. DURACIÓN DE ACTIVIDADES Y EQUIPOS DISPONIBLES POR ACTIVIDAD PARA UTILIZAR COMO INPUT EN EL MODELO.....	41
TABLA VIII. DURACIÓN DE ACTIVIDADES MODIFICADA PARA INPUT DEL MODELO.....	44
TABLA IX. NÚMERO DE EQUIPOS ASIGNADOS PARA CADA ACTIVIDAD.....	45
TABLA X. NÚMERO DE DÍAS DEL PROGRAMA Y TRONADURAS POR DÍA.....	47
TABLA XI. UTILIZACIÓN DE EQUIPOS POR PROGRAMAS DE DESARROLLOS HORIZONTALES....	48
TABLA XII. UTILIZACIÓN DE EQUIPOS POR PROGRAMA DE DESARROLLOS HORIZONTALES PARA MODELO PROPUESTO MEJORADO.....	49
TABLA XIII. TRONADURAS POR HORARIO DE QUEMADA.....	50
TABLA XIV. FORMA DEL ARCHIVO PARA CARGAR ASIGNACIÓN EN MODELO DE SIMULACIÓN CON PRO-MODEL.....	60

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. GASTO ANUAL EN PREPARACIÓN MINERA DEL PROYECTO NNM DE EL TENIENTE. FUENTE: AGUSTÍN ARCE, 2015.	1
FIGURA 2. CUMPLIMIENTO DE PREPARACIÓN MINERA VERSUS CUMPLIMIENTO DE PRODUCCIÓN ENTRE LOS AÑOS 2000 Y 2004, MINA EL TENIENTE. (MORALES, ET AL., 2008).	2
FIGURA 3. DESGLOSE DE TIEMPOS PERDIDOS EN OBRAS DE CONSTRUCCIÓN MINERA DENTRO RESPECTO A UNA JORNADA LABORAL. (CDT, 2015).	2
FIGURA 4. DESGLOSE FACTORES DE TIEMPO NO UTILIZADO. FUENTE: CDT, 2015.	3
FIGURA 5. DESGLOSE POR OBRAS DEL PRESUPUESTO DE PREPARACIÓN DE MINAS EL TENIENTE PARA EL AÑO 2015.	3
FIGURA 6. ESQUEMA DE LA METODOLOGÍA DEL TRABAJO A REALIZAR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	8
FIGURA 7. DISEÑOS DE MALLAS DE EXTRACCIÓN EN BLOCK O PANEL CAVING. A LA IZQUIERDA SE MUESTRA LA MALLA HERRINGBONE DEL NIVEL DE PRODUCCIÓN DE NORTH PARKES MINE. A LA DERECHA SE MUESTRA LA MALLA TENIENTE DEL NIVEL DE PRODUCCIÓN DE HENDERSON MINE. (BRANNON, ET AL., 2011).	10
FIGURA 8. ACTIVIDADES DEL CICLO DE AVANCE EN DESARROLLOS HORIZONTALES.	11
FIGURA 9. MODELO DE ASIGNACIÓN DE EQUIPOS PARA DESARROLLOS HORIZONTALES. FUENTE: DAVID LAVADO, 2014.	14
FIGURA 10. LAYOUT MODELO DE SIMULACIÓN DE DESARROLLOS HORIZONTALES. FUENTE: CAMILA CONTRERAS, 2015.	15
FIGURA 11. SECTORES PRODUCTIVOS MINA EL TENIENTE.	18
FIGURA 12. MODELO DE NEGOCIO PREPARACIÓN DE MINAS EL TENIENTE. FUENTE: AGUSTÍN ARCE, 2016.	20
FIGURA 13. PROGRAMA DE REV. B DEL AÑO 2015 EN NIVEL DE PRODUCCIÓN MINA ESMERALDA SUR.	22
FIGURA 14. PROGRAMA REV. B DEL AÑO 2015 DE DESARROLLOS HORIZONTALES NIVEL DE PRODUCCIÓN MINA ESMERALDA SUR CORRESPONDIENTES AL MES DE OCTUBRE.	23
FIGURA 15. PROGRAMA DE DESARROLLOS HORIZONTALES CON POLÍGONO DE AISLACIONES POR TRONADURA.	24
FIGURA 16. PORCENTAJE DE DURACIÓN DE CADA ACTIVIDAD DEL CICLO DE EXCAVACIÓN HORIZONTAL.	25
FIGURA 17. ESQUEMA DE TIEMPOS DISPONIBLES EN JORNADA LABORAL DE EE.CC. EL TENIENTE.	27
FIGURA 18. ESQUEMA DEL FUNCIONAMIENTO DEL MODELO DE AGENDAMIENTO DE EXCAVACIONES HORIZONTALES.	28
FIGURA 19. VISUALIZACIÓN DE LAS CARTAS GANTT GENERADAS POR EL MODELO.	29
FIGURA 20. LEYENDA DE CARTAS GANTT GENERADAS POR EL MODELO PROPUESTO.	30
FIGURA 21. ESQUEMA DE ACTIVIDADES DE DESARROLLO HORIZONTAL EN UN FRENTE DE AVANCE.	30
FIGURA 22. VALORES DE LAS VARIABLES DE INICIO (S) Y TÉRMINO (E) DE ACTIVIDADES.	32
FIGURA 23. IMPORTACIÓN DE PAQUETES DE OPTIMIZACIÓN E INGRESO DE ACTIVIDADES, SUS DURACIONES, EQUIPOS POR ACTIVIDAD Y FRENTE DE AVANCE.	37
FIGURA 24. INGRESO DE PRECEDENCIA DE FRENTE, FRENTE AFECTADOS POR AISLACIÓN Y EL ESTADO INICIAL DE CADA FRENTE.	37
FIGURA 25. INGRESO DE PRECEDENCIAS, NÚMERO DE DISPARO EN PROGRAMA POR FRENTE, HORAS POR DÍA, DETENCIONES PROGRAMADAS Y HORARIO DISPONIBLE PARA TRONADURA.	38

FIGURA 26. GENERACIÓN DE PARÁMETROS DE HORARIO DE TRONADURA, DETENCIONES PROGRAMADAS, GENERACIÓN DE CARTA GANTT.	38
FIGURA 27. CREACIÓN ARCHIVO DE MODELO EN PULP, GENERACIÓN DE VARIABLES DE DECISIÓN Y DE FUNCIONES OBJETIVO.....	39
FIGURA 28. GENERACIÓN DE RESTRICCIONES.....	39
FIGURA 29. RESOLUCIÓN DEL MODELO Y EXPORTACIÓN DE ARCHIVO CON SOLUCIÓN.....	40
FIGURA 30. LAYOUT DEL EJEMPLO DE APLICACIÓN PARA VALIDACIÓN DEL MODELO.....	40
FIGURA 31. ESQUEMA DEL TURNO DE TRABAJO, DETENCIONES AUTORIZADAS Y TIEMPO DISPONIBLE PARA AGENDAMIENTO DE ACTIVIDADES.....	41
FIGURA 32. DETENCIONES PROGRAMADAS VALIDACIÓN.....	42
FIGURA 33. CARTA GANTT PARA VERIFICACIÓN DE AGENDAMIENTO.....	43
FIGURA 34. CARTA GANTT PARA VERIFICACIÓN DE AGENDAMIENTO.....	43
FIGURA 35. TIEMPO DISPONIBLE PARA AGENDAR ACTIVIDADES EN UN TURNO DE 10 HORAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	45
FIGURA 36. TRONADURAS DE FRENTE POR DÍA PARA ESTRATEGIA DE AGENDAMIENTO 1.....	46
FIGURA 37. TRONADURAS DE FRENTE POR DÍA PARA ESTRATEGIA DE AGENDAMIENTO 2.....	47
FIGURA 38. TRONADURAS DE FRENTE POR DÍA CON ACOPLADO DE MESES.....	49
FIGURA 39. ESQUEMA DEL FUNCIONAMIENTO DEL MODELO CON CONSIDERACIONES ADICIONALES.....	53
FIGURA 40. ACTIVIDADES DE SISTEMA DE TRASPASO.....	54
FIGURA 41. DIAGRAMA DE DISPARO GALERÍAS DEL NIVEL DE PRODUCCIÓN DE MINA ESMERALDA.....	57
FIGURA 42. DIAGRAMA DE DISPARO GALERÍAS DEL NIVEL DE PRODUCCIÓN DE MINA ESMERALDA.....	58
FIGURA 43. EVALUACIÓN DE CUMPLIMIENTO DE UN PLAN MEDIANTE EL SIMULADOR.....	60