

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Planificación minera	1
1.2. Incertidumbre en planificación minera	2
1.3. Incertidumbre geológica	4
1.3.1. Generación de las simulaciones geoestadísticas	6
1.3.2. Evaluación de la incertidumbre en las simulaciones	9
1.3.3. Incorporación de la incertidumbre en planificación de la producción minera	9
1.4. Organización de la tesis	12
2. Problema de planificación de la producción de largo plazo en minas de rajo abierto	14
2.1. Antecedentes	14
2.1.1. Ángulo de talud y precedencias de extracción	15
2.1.2. Modelos de valorización de bloques	17
2.2. Problema de pit final	20
2.3. Problema de selección de fases	22
2.4. Problema de agendamiento	23
2.5. Comentarios al problema de planificación de la producción bajo incertidumbre geológica	26
3. Objetivos de la investigación	28
3.1. Objetivo general	28
3.2. Objetivos específicos	28
3.3. Alcances	28
4. Revisión bibliográfica	29

4.1.	Planificación de la producción de minas a rajo abierto: caso determinista	29
4.2.	Planificación de la producción de minas a rajo abierto bajo incertidumbre geológica	31
4.2.1.	Enfoque heurístico	33
4.2.2.	Enfoque metaheurístico	36
4.2.3.	Enfoque estocástico	38
5.	Metodología	46
5.1.	Etapa 1: definición de pit final basado en gestión del beneficio-riesgo	46
5.2.	Etapa 2: Selección automática de fases a partir de pits anidados estocásticos	50
5.2.1.	Introducción a la generación de pits anidados	50
5.2.2.	Formulación del problema de selección automática de fases	52
5.3.	Etapa 3: Agendamiento de la producción	57
5.3.1.	Notación	58
5.3.2.	Sobre el costo de la incertidumbre	59
5.3.3.	Modelos de agendamiento	61
5.3.4.	Estrategias de resolución de los modelos de agendamiento	67
6.	Caso de estudio sintético	70
6.1.	Antecedentes	70
6.1.1.	Modelo de bloques	70
6.1.2.	Modelo de valorización	73
6.1.3.	Parámetros para el control del talud	74
6.1.4.	Recurso computacional	74
6.2.	Etapa 1: Pit final	74
6.3.	Etapa 2: Selección automática de pushbacks	81
6.4.	Etapa 3: Agendamiento de la producción	88

6.4.1.	Modelo de agendamiento fase a fase: implementación y resultados	90
6.4.2.	Modelo de agendamiento equilibrado de fases: implementación y resultados	94
7.	Caso de estudio	98
7.1.	Antecedentes	98
7.1.1.	Sobre el modelo de bloques	98
7.1.2.	Modelo económico de bloques	101
7.1.3.	Parámetros para el control del talud	101
7.1.4.	Sobre el recurso computacional	101
7.2.	Etapa 1: Pit final	102
7.2.1.	Implementación y resultados	102
7.2.2.	Comparación de pit final con la metodología tradicional	107
7.3.	Etapa 2: Selección automática de pushbacks	110
7.3.1.	Implementación y resultados	110
7.3.2.	Comparación de selección automática de pushbacks con la metodología tradicional	117
7.4.	Etapa 3: Agendamiento de la producción	120
7.4.1.	Modelo de agendamiento equilibrado de fases: implementación y resultados	120
7.4.2.	Comparación del agendamiento estocástico con la metodología tradicional	126
8.	Conclusiones y trabajo futuro	132
8.1.	Discusión	132
8.2.	Conclusiones	134
8.2.1.	Etapa 1: Pit final	135
8.2.2.	Etapa 2: Selección de pushbacks	135
8.2.3.	Etapa 3: Agendamiento de bloques	136

8.3. Trabajo futuro	136
Bibliografía	138
9. Anexos	I
9.1. Anexo A: Fundamentos de Programación Lineal	I
9.1.1. Conceptos y Formulaciones	I
9.1.2. Relajación en Programación Lineal Entera	III
9.1.3. Métodos en Programación Entera: <i>Branch & Bound</i>	VI
9.2. Anexo B1: Resultados fronteras eficientes variando el nivel de confianza	XVI
9.3. Anexo B2: Geometrías de pit final para BM-Pórfido	XVIII
9.4. Anexo C: Formulación alternativa al problema de selección de pushbacks.	XXII