

## A. Tabla de contenido

1.	Introducción.....	1
1.1	Planteamiento del problema .....	2
1.2	Objetivos .....	3
1.2.1	Objetivo general .....	3
1.2.2	Objetivos específicos .....	3
1.3	Contexto .....	4
1.3.1	Ubicación geográfica.....	4
1.3.2	Categorización de recursos .....	5
1.3.3	Operaciones .....	5
1.3.4	Planta SAG .....	8
1.4	Alcances .....	12
1.5	Metodología .....	13
2.	Marco teórico .....	14
2.1	Procesos de conminución .....	14
2.1.1	Objetivos de la conminución .....	14
2.1.2	Leyes de la conminución.....	15
2.1.3	Material particulado y pulpas mineralúrgicas .....	17
2.2	Molienda .....	17
2.2.1	Liberación .....	19
2.3	Flotación .....	20
2.3.1	Flotación de pórfidos cupríferos enriquecidos con molibdeno .....	21
2.3.2	Efecto del tamaño de partícula .....	23
2.4	Balances de material.....	25
2.5	Planificación minera-metalúrgica .....	27
2.5.1	Metodología de planificación.....	28
2.5.2	Plan presupuesto 2018.....	29
2.6	Sectores que alimentan a la planta SAG.....	31
2.6.1	Zonas calidad de mineral.....	31
2.6.2	Mineralogía y moliendabilidad.....	32
2.7	Muestreo .....	34
2.8	Pruebas y procesos de laboratorio.....	34
2.8.1	Test de molienda batch en laboratorio .....	34
2.8.2	Test de flotación colectiva en laboratorio.....	34
2.8.3	Tamizado.....	35

2.9	Técnicas analíticas de caracterización.....	36
2.9.1	Análisis químico.....	36
3.	Análisis estadístico planta SAG y benchmarking operacional.....	37
3.1	Análisis estadístico anual.....	37
3.1.1	Tonelaje, leyes, $P_{80}$ y recuperación.....	37
3.2	Análisis estadístico diario.....	39
3.2.1	Eventos operacionales.....	41
3.3	Benchmarking.....	43
4.	Diseño experimental.....	44
4.1	Escenarios de estudio.....	44
4.2	Pruebas de laboratorio.....	45
4.2.1	Test de molienda batch.....	45
4.2.2	Test de flotación colectiva rougher.....	46
4.3	Preparación del mineral.....	47
4.3.1	Protocolo de muestreo.....	48
4.3.2	Generación de compuestos de estudio.....	49
4.4	Plan de pruebas.....	50
4.4.1	Cinética de molienda.....	50
4.4.2	Recuperación rougher.....	51
4.4.3	Escalamiento de recuperación.....	51
5.	Resultados experimentales.....	53
5.1	Cinética de molienda.....	53
5.2	Recuperación rougher.....	54
5.2.1	Ley de cabeza y error de pruebas.....	54
5.2.2	Leyes de concentrados y colas.....	55
5.2.3	Recuperación.....	57
5.3	Escalamiento de resultados.....	58
5.3.1	Flotación.....	59
5.3.2	Análisis granulométrico.....	59
5.3.3	Estimación de parámetros.....	60
6.	Análisis económico P02018 plantas concentradoras.....	64
6.1	P02018 plantas concentradoras.....	65
6.1.1	Línea SAG.....	65
6.1.2	Línea Convencional.....	71
6.1.3	Línea Sewell.....	73
6.1.4	Línea de retratamiento.....	73

6.1.5	Promedio mineral total.....	73
6.2	Beneficio .....	77
6.2.1	Ingresos.....	77
6.2.2	Costos .....	78
6.2.3	Beneficio total .....	80
6.3	VAC Po2018 plantas concentradoras.....	81
7.	Análisis y discusiones .....	82
7.1	Trabajo experimental .....	82
7.1.1	Cinética de molienda .....	82
7.1.2	Recuperación .....	82
7.1.3	Escalamiento de resultados .....	84
7.1.4	Reproducibilidad de los resultados .....	85
7.2	Análisis económico Po2018.....	85
7.2.1	Simulación del tonelaje.....	85
7.2.2	Plan Po218 .....	86
7.2.3	Análisis económico total .....	87
7.3	Procesos aguas abajo .....	90
7.3.1	Efecto en el transporte de pulpas .....	91
7.3.2	Efecto en la etapa de flotación selectiva .....	91
7.3.3	Efecto en la separación sólido-líquido.....	91
8.	Conclusiones .....	93
9.	Recomendaciones .....	96
10.	Bibliografía.....	97
	Anexos .....	100
A.	Manejo de materiales.....	101
B.	Criterios de operación planta SAG .....	102
C.	Simulación geometalúrgica integrada (IGS) .....	106
D.	Zonas calidad de mineral.....	109
E.	Análisis estadístico planta SAG .....	112
F.	Análisis operacional línea SAG-bolas.....	113
G.	Riesgos y medidas de seguridad para las pruebas de laboratorio .....	114
H.	Resultados cinética de molienda .....	116
I.	Resultados experimentales.....	117
J.	Resultados experimentales escalamiento.....	121
K.	Po2018 plantas concentradoras. ....	123
L.	Análisis económico .....	135

## B. Índice de ecuaciones

Ecuación 2.1: Ecuación de Rittinger. ....	15
Ecuación 2.2: Ecuación de Kick. ....	15
Ecuación 2.3: Ecuación de Bond.....	16
Ecuación 2.4: Ecuación general del consumo de energía.....	16
Ecuación 2.5: Fracción retenida. ....	17
Ecuación 2.6: Fracción acumulada bajo tamaño.....	17
Ecuación 2.7: Fracción acumulada sobre tamaño. ....	17
Ecuación 2.8: Grado de liberación.....	19
Ecuación 2.9: Ecuación general del balance.....	25
Ecuación 2.10: Ecuación de balance en estado estacionario.....	25
Ecuación 2.11: Ecuación de balance en estado transiente.....	25
Ecuación 2.12: Ecuación de balance en régimen batch. ....	25
Ecuación 2.13: Flujo másico.....	26
Ecuación 2.14: Flujo volumétrico. ....	26
Ecuación 2.15: Densidad. ....	26
Ecuación 2.16: Concentración de sólidos en volumen. ....	26
Ecuación 2.17: Concentración de sólidos en peso. ....	26
Ecuación 2.18. Humedad en base seca. ....	26
Ecuación 2.19: Humedad en base húmeda.....	26
Ecuación 2.20: Balance de sólidos.....	26
Ecuación 2.21: Balance de finos.....	26
Ecuación 2.22: Balance por tamaños.....	27
Ecuación 2.23: Recuperación metalúrgica. ....	27
Ecuación 2.24: Recuperación de cobre línea SAG.....	29
Ecuación 2.25: Recuperación de molibdeno línea SAG. ....	29
Ecuación 2.26: Ley de cobre en el concentrado línea SAG.....	29
Ecuación 2.27: Recuperación de cobre línea Convencional. ....	30
Ecuación 2.28: Recuperación de molibdeno línea Convencional. ....	30
Ecuación 2.29: Ley de cobre en el concentrado línea Convencional.....	30
Ecuación 2.30: Porcentaje -325#.....	30
Ecuación 4.1: Escalamiento recuperación rougher de laboratorio. ....	52
Ecuación 5.1: Cálculo del $P_{80}$ por medio del porcentaje acumulado y el tamaño. ....	53
Ecuación 5.2: Ley de cabeza calculada.....	54
Ecuación 5.3: Ley ponderada en el concentrado/relave para cada escenario. ....	56

Ecuación 5.4: Peso por escenario.....	57
Ecuación 5.5: Recuperación rougher ponderada para cada escenario. ....	57
Ecuación 5.6: Expresión para el cálculo de la recuperación de cobre.....	61
Ecuación 5.7: Expresión para el cálculo de la recuperación de cobre.....	62
Ecuación 6.1: Ingresos por fino para cada caso.....	77

## C. Índice de ilustraciones

Ilustración 1.1: Ubicación geográfica (Turismo Virtual, 2017).....	4
Ilustración 1.2: Minas actuales en explotación (Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo, 2017).....	6
Ilustración 1.3: Esquema general procesos planta (Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo, 2017).....	8
Ilustración 1.4: Diagrama de procesos SAG 1.....	9
Ilustración 1.5: Diagrama de procesos SAG 2.....	10
Ilustración 1.6: Diagrama de procesos flotación colectiva.....	11
Ilustración 2.1: Relación entre energía y tamaño de partícula (Walker et al., 1937).....	16
Ilustración 2.2: Movimiento de un molino de bolas a una velocidad normal de rotación (Austin & Concha, 1994).....	18
Ilustración 2.3: Molino de bolas (izquierda) y molino SAG (derecha) (Austin & Concha, 1994).....	19
Ilustración 2.4: Representación esquemática del proceso de flotación (Lobos, 2015)....	20
Ilustración 2.5: A. Colector disuelto en la fase acuosa, B. Adsorción del colector en la superficie del mineral y C. Formación del agregado partícula burbuja a través de la superficie hidrofóbica (Gupta & Yan, 2006).....	21
Ilustración 2.6: Flotación de un pórfido cuprífero enriquecido con molibdeno (Adaptado de Gupta, 1992).....	22
Ilustración 2.7: Recuperación de cobre según el tamaño de partícula (Bulatovic, 2007).....	23
Ilustración 2.8: Flotación batch de calcopirita a pH 11 variando la densidad de la pulpa, cantidad de mineral y tamaño de distribución de partículas (Trahar, 1981).....	24
Ilustración 2.9: Esquema de flujos de balance de material.....	27
Ilustración 2.10: Decisiones de planificación.....	28
Ilustración 2.11: Riffle (izquierda) y cortador rotatorio (derecha).....	34
Ilustración 2.12: Molino de laboratorio (izquierda) y celda de flotación de laboratorio (derecha).....	35
Ilustración 2.13: Ro-Tap.....	36
Ilustración 3.1: Distribución granulométrica de cabeza línea de molienda SAG.....	43
Ilustración 4.1: Metodología de preparación de muestras de 1 kg.....	49
Ilustración 4.2: Esquema prueba de molienda-flotación rougher para muestras Reno/Esmeralda.....	51
Ilustración 6.1: Esquema general de transporte de mineral plantas Colón.....	64
Ilustración A.1: Manejo de materiales (Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo, 2015).....	101
Ilustración C.1: Esquema SAG simulador IGS.....	108

Ilustración D.1: Modelo de bloques diluido en zonas calidad de mineral (Gerencia de Recursos Míneros y Desarrollo, 2015).....	109
Ilustración D.2: Recuperación de cobre según calidad del mineral (Geología de Producción, 2016). .....	110
Ilustración D.3: Aporte relativo diario de mezclas (Geología de Producción, 2016).....	111
Ilustración E.1: Gráficos leyes anuales planta SAG. ....	112
Ilustración H.1: Gráficos tamaño versus pasante acumulado bajotamaño.....	116

## D. Índice de gráficos

Gráfico 2.1: Porcentaje en peso base sulfuros sectores productivos (Superintendencia de Ingeniería de Procesos, 2017). .....	33
Gráfico 3.1: Procesamiento promedio anual planta SAG. ....	38
Gráfico 3.2: Recuperación promedio anual planta SAG.....	38
Gráfico 3.3: P <sub>80</sub> promedio anual molienda SAG.....	39
Gráfico 3.4: Box-plot recuperación diaria planta SAG. ....	39
Gráfico 3.5: Box-plot P <sub>80</sub> diario molienda SAG. ....	40
Gráfico 3.6: Incremento de la granulometría del producto de molienda SAG durante el año 2017. ....	40
Gráfico 3.7: Histogramas de distribución de P <sub>80</sub> SAG.....	41
Gráfico 3.8: Procesamiento diario planta SAG.....	42
Gráfico 5.1: Cinética de molienda compuestos especiales.....	53
Gráfico 5.2: Variación de las leyes de concentrados y colas. ....	55
Gráfico 5.3: Recuperación rougher de cobre versus P <sub>80</sub> .....	57
Gráfico 5.4: Recuperación rougher de molibdeno versus P <sub>80</sub> . ....	58
Gráfico 5.5: Distribución granulométrica cabeza fresca rougher.....	60
Gráfico 5.6: Recuperación Cu real vs. recuperación Cu estimada. ....	61
Gráfico 5.7: Recuperación Mo real vs. recuperación Mo estimada. ....	62
Gráfico 6.1: Procesamiento P <sub>02018</sub> SAG.....	68
Gráfico 6.2: Recuperación promedio P <sub>02018</sub> SAG. ....	68
Gráfico 6.3: Producción de cobre fino concentrado P <sub>02018</sub> SAG. ....	69
Gráfico 6.4: Tonelaje cobre fino relave P <sub>02018</sub> SAG. ....	69
Gráfico 6.5: Producción molibdeno fino concentrado P <sub>02018</sub> SAG.....	70
Gráfico 6.6: Tonelaje molibdeno fino relave P <sub>02018</sub> SAG.....	70
Gráfico 6.7: Recuperación P <sub>02018</sub> mineral total. ....	74
Gráfico 6.8: P <sub>80</sub> P <sub>02018</sub> mineral total. ....	74
Gráfico 6.9: Fino concentrado P <sub>02018</sub> mineral total.....	75
Gráfico 6.10: Leyes relave P <sub>02018</sub> mineral total.....	75
Gráfico 6.11: Leyes relave P <sub>02018</sub> mineral total. ....	76
Gráfico 6.12: Ingreso total anual P <sub>02018</sub> . ....	78
Gráfico 6.13: Distribución de costos P <sub>02018</sub> .....	79
Gráfico 6.14: Costo total anual P <sub>02018</sub> . ....	80
Gráfico 6.15: VAC total por escenario P <sub>02018</sub> (recuperación SAG promedio). ....	81
Gráfico 6.16: VAC total por escenario P <sub>02018</sub> . ....	81
Gráfico 7.1: Promedio recuperación rougher de laboratorio.....	83

Gráfico 7.2: VAC con respecto a la distribución de tonelaje SAG y Convencional. ....	87
Gráfico 7.3: VAC P02018 SAG (recuperación promedio). ....	88
Gráfico 7.4: VAC modificado P02018. ....	89
Gráfico 7.5: VAC con procesamiento máximo P02018.....	89

## E. Índice de tablas

Tabla 1.1: Recursos y reservas.....	5
Tabla 2.1: Aporte de sectores productivos al tren de finos.....	31
Tabla 2.2: Aporte de sectores productivos al tren de gruesos.....	31
Tabla 2.3: Zonas calidad de mineral.....	32
Tabla 2.4: Resultados Test de Starkey y $W_i$ .....	33
Tabla 2.5: Clasificación de tamices.....	36
Tabla 3.1: Días sin operación planta SAG.....	42
Tabla 3.2: Benchmarking operacional.....	43
Tabla 4.1: Escenarios de estudio.....	44
Tabla 4.2: Muestra especial “zona calidad de mineral”.....	48
Tabla 4.3: Tiempo de molienda.....	51
Tabla 5.1: Coeficiente de correlación entre el $P_{80}$ obtenido gráficamente y el $P_{80}$ obtenido de la Ecuación 5.1.....	54
Tabla 5.2: Resultados análisis químico de cabezas.....	54
Tabla 5.3: Fecha y hora de muestreo.....	58
Tabla 5.4: Características muestras de cabeza fresca rougher.....	59
Tabla 5.5: Resultados análisis químico de cabeza fresca rougher.....	59
Tabla 5.6: $P_{80}$ y recuperación muestras frescas de cabeza rougher.....	60
Tabla 5.7: Muestras de estudio para la determinación del parámetro B, caso cobre.....	61
Tabla 5.8: Muestras de estudio para la determinación del parámetro B, caso molibdeno.....	62
Tabla 5.9: Recuperación ajustada.....	63
Tabla 6.1: Leyes de entrada P02018 SAG.....	65
Tabla 6.2: Variables P02018 SAG.....	66
Tabla 6.3: Valores para la corrección de la recuperación del caso base P02018.....	66
Tabla 6.4: Capacidad operativa P02018 SAG.....	67
Tabla 6.5: Leyes de entrada P02018 Convencional.....	71
Tabla 6.6: Parámetros y variables P02018 Convencional.....	71
Tabla 6.7: Capacidad operativa P02018 Convencional.....	72
Tabla 6.8: Precio de los metales y descuento concentrado mineral total.....	77
Tabla 6.9: Costos fijos y variables.....	79
Tabla 6.10: Beneficio anual por escenario P02018.....	80
Tabla 7.1: Índice de dureza Plan Mina P02018.....	86
Tabla 7.2: Requerimiento de agua molienda SAG.....	90
Tabla B.1: Criterios de operación molienda SAG.....	102

Tabla B.2: Dimensiones y potencias de molinos. ....	103
Tabla B.3: Criterios de operación flotación colectiva. ....	104
Tabla B.4: Características equipos flotación colectiva. ....	105
Tabla F.1: Periodos críticos de operación. ....	113
Tabla I.1: Condiciones experimentales pruebas de flotación rougher. ....	117
Tabla I.2: Masas pruebas de molienda+flotación rougher.....	118
Tabla I.3: Resultados análisis químico de concentrados y colas de flotación de compuestos especiales. ....	119
Tabla I.4: Leyes y recuperación ponderada para pruebas de flotación de compuestos especiales.....	120
Tabla J.1: Condiciones experimentales pruebas de flotación de cabeza fresca rougher..	121
Tabla J.2: Resultados masas y análisis químico de concentrados y colas de flotación de cabeza fresca rougher.....	122
Tabla J.3: Leyes y recuperación ponderada para pruebas de flotación de cabeza fresca rougher. ....	122
Tabla K.1: Plan Mina P02018.....	123
Tabla K.2: Valores pendiente de entrada IGS.....	123
Tabla K.3: Capacidad operativa P02018 SAG. ....	124
Tabla K.4: Capacidad operativa P02018 Convencional. ....	125
Tabla K.5: Plan metalúrgico SAG $P_{80}=140 \mu\text{m}$ (R promedio). ....	126
Tabla K.6: Plan metalúrgico SAG 2018 $P_{80}=180 \mu\text{m}$ (R promedio). ....	127
Tabla K.7: Plan metalúrgico Convencional 2018 $P_{80}=140 \mu\text{m}$ . ....	128
Tabla K.8: Plan metalúrgico convencional 2018 $P_{80}=180 \mu\text{m}$ . ....	129
Tabla K.9: Plan metalúrgico Sewell 2018. ....	130
Tabla K.10: Plan metalúrgico Retratamiento 2018 $P_{80}=140 \mu\text{m}$ .....	131
Tabla K.11: Plan metalúrgico Retratamiento 2018 $P_{80}=180 \mu\text{m}$ . ....	132
Tabla K.12: Plan metalúrgico mineral total 2018 $P_{80}=140 \mu\text{m}$ . ....	133
Tabla K.13: Plan metalúrgico mineral total 2018 $P_{80}=180 \mu\text{m}$ . ....	134
Tabla L.1: Costos fijos planta SAG. ....	135
Tabla L.2: Costos variables planta SAG. ....	135