

TABLA DE CONTENIDO

1. Introducción	1
1.1. Objetivos generales.....	3
1.2. Objetivos específicos	3
1.3. Alcances.....	4
1.4. Estructura	4
2. Revisión bibliográfica	5
2.1. Molibdeno y mineral molibdenita; estructura y procesamiento	5
2.2. Antecedentes de la compañía.....	6
2.3. El proceso de Flotación.....	7
2.3.1. Colectores y depresores	9
2.3.2. Circuitos de flotación	12
2.3.3. Flotación de molibdenita como sub-producto	13
2.3.4. Proceso de flotación de Minera los Pelambres	16
2.4. Lixiviación	20
2.4.1. Lixiviación de concentrados en Minera los Pelambres	22
2.5. Cementación	23
2.5.1. Proceso de cementación en Minera los Pelambres	25
2.6. Cloración.....	26
2.6.1. Proceso de cloración en Minera los Pelambres	26
2.7. Optimización de plantas.....	27
2.8. Estudios anteriores de Minera los Pelambres	28
3. Metodología	29
3.1. Metodología general	29
3.2. Metodología de laboratorio.....	31
4. Resultados y discusión	33
4.1. Entrevistas.....	33
4.1.1. Planta de flotación	33
4.1.2. Planta de lixiviación férrica.....	40
4.2. Resultados de Laboratorio	45
4.2.1. Diseño de técnica de medición de Xantato en solución	45
4.2.2. Cinética de adsorción.....	46
4.2.3. Fase experimental: Referencia y Limpieza en Exceso	47

4.3.	Análisis histórico de datos de planta.....	48
4.3.1.	Flotación	48
4.3.2.	Planta de lixiviación Férrica.....	84
4.4.	Integración de procesos	96
5.	Conclusiones	101
5.1.	Flotación	101
5.2.	Planta de Lixiviación Férrica.....	102
6.	Recomendaciones.....	103
7.	Bibliografía.....	105
	Anexos.....	108
	Anexo A: Tabla de Potenciales de electrodo para distintas reacciones	108
	Anexo B: Preguntas utilizadas para entrevistas	109
	Anexo C: Pasos Experimentales	109
	C.1. Acondicionamiento de pulpa.....	109
	C.2. Calibración UV-Visible.....	110
	C.3. Determinación de xantato en exceso	110
	C.4. Determinación de Cinética de Adsorción.....	111
	C.5. Experimento 1: Referencia	111
	C.6. Experimento 2: Limpieza en exceso.....	112
	C.7. Experimento 3: Limpieza pelambres.....	112
	Anexo D: Cálculo de recuperación selectiva	114
	Anexo E: Cálculo de recirculaciones MLP y propuesta	115
	Anexo F: Histogramas de variables de flotación	116
	Anexo G: Gráficos de correlación de variables de flotación importantes	121
	Anexo H: Gráficos de tiempo para variables de flotación.....	123
	Anexo I: Histogramas de variables de PLF	126
	I.1. General.....	126
	I.2. Preparación	127
	I.3. Lixiviación	128

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Estructura de Molibdenita. Fuente: (Habashi, 1998)	5
Figura 2: Diagrama de bloques de Minera los Pelambres.	6
Figura 3: Componentes de flotación.	8
Figura 4: Relación de concentración vs pH especies de H ₂ S.	11
Figura 5: Posible circuito de flotación (Adaptado de Fuerstenau et al., 2009).	13
Figura 6: Circuito de separación Cu-Mo típico.	14
Figura 7: Circuito de Flotación Selectiva Minera los Pelambres (MLP).	16
Figura 8: Circuito de Flotación Selectiva simplificado.	17
Figura 9: Circuito de PLF, Minera los Pelambres.	22
Figura 10: Esquema de reacción de cementación. Fuente: Havlik (2014)	24
Figura 11: Diagrama explicativo general de metodología.	29
Figura 12: Espectros de absorbancia para soluciones 550, 500, 400, 350, 270, 200, 110, 55, 27,5, 11, 5,5 y 0,55 mg/L de xantato utilizando agua destilada como solvente.	45
Figura 13: Curva de calibración colector.	46
Figura 14: Cinética de adsorción de xantato.	46
Figura 15: Circuito simplificado de flotación rougher (Fuente propia).	48
Figura 16: Gráfico 3D de Recuperación selectiva vs Recuperaciones de primera y segunda limpieza para Recuperación Rougher de 90%.	50
Figura 17: Gráfico 3D de Recuperación selectiva vs Recuperaciones de primera y segunda limpieza para Recuperación Rougher de 40%.	50
Figura 18: (A) Histograma de recuperación rougher 2015 por grupo. (B) Histograma de recuperación selectiva 2015 por grupo.	51
Figura 19: Histograma de recirculación por grupo.	51
Figura 20: Comparación de promedios de recuperación rougher de circuito de flotación selectiva.	52
Figura 21: Comparación de desviaciones estándar de recuperación rougher de circuito de flotación selectiva.	53
Figura 22: Comparación de promedios para recuperación selectiva de circuito de flotación selectiva.	53
Figura 23: Comparación de promedios de Recirculación Rougher calculada según propuesta del presente estudio.	54
Figura 24: Comparación de promedios de flujo NaSH Total en circuito de flotación selectiva. ...	54
Figura 25: Gráfico de comparación entre la recirculación calculada en la planta selectiva de Los Pelambres usando la Ecuación 30 y la recirculación sugerida usando la Ecuación 31 durante enero de 2015.	56
Figura 26: Correlación entre RCC Pelambres vs RCC (2).	57
Figura 27: Histograma de RCC (2) por grupo.	57
Figura 28: Histograma comparativo %Mo Alimentación Rougher por grupo.	58
Figura 29: Histograma comparativo %Mo en alimentación fresca (CONCOL) por grupo.	59
Figura 30: Histograma comparativo %Cu en alimentación fresca (CONCOL) por grupo.	59
Figura 31: Histograma comparativo %Mo en Concentrado de primera limpieza por grupo.	60
Figura 32: Gráfico de comparación de promedios de porcentaje de molibdeno en etapa de primera limpieza.	60

Figura 33: Gráficos de comparación de promedios para Alim TMS y %Mo Alim. Compuesta. .	61
Figura 34: Gráfico de comparación de promedios de %Mo Relave Rougher.....	61
Figura 35: Gráfico de comparación de promedios de pH en primera limpieza.....	63
Figura 36: Correlación %Mo Relave Rougher vs %Mo Conc. Rougher.	64
Figura 37: Correlación %Sólidos (Set-Point vs Real Medido)	65
Figura 38: Correlación entre RCC (2) vs Recuperación Rougher.....	65
Figura 39: Principales efectos de variables Modelo 1 (Rec. Selectiva).	66
Figura 40: Optimización 1 Modelo 1.	67
Figura 41: Optimización 2 Modelo 1.	68
Figura 42: Optimización 3 Modelo 1.	68
Figura 43: Optimización 4 Modelo 1.	69
Figura 44: Principales efectos de variables Modelo 2 (Rec. Rougher).	70
Figura 45: Gráfico de superficie RCC (2) vs %Mo relave rougher vs Rec. rougher.	71
Figura 46: Optimización 1 Modelo 2.	71
Figura 47: Gráfico de contorno RCC (2) vs %Mo Relave Rougher para Modelo 2 (Rec. Rougher).	72
Figura 48: Histograma comparativo consumo NaSH total por grupo.	74
Figura 49: Análisis de promedios para las alturas de espuma para el segundo banco de flotación Rougher.	75
Figura 50: Comparación de colchón de espuma (Valor absoluto).	76
Figura 51: Gráfico de comparación de promedios de nivel de espuma en primera limpieza.....	76
Figura 52: Gráfico de comparación de promedios de nivel de espuma en segunda limpieza.	77
Figura 53: Correlación %O ₂ vs Flujo N ₂	77
Figura 54: Principales efectos de variables Modelo 3.....	79
Figura 55: Gráfico de interacción %Mo Relave vs %Mo Alim. Compuesta Rougher.	79
Figura 56: Principales efectos de variables Modelo 4.....	81
Figura 57: Comparación de variables en el tiempo (Mes de Abril).	82
Figura 58: Gráfico de comparación de promedios de %Mo en DR-15.	84
Figura 59: Histograma comparativo %Mo Concentrado Final (DR-15) por grupo.	85
Figura 60: Gráfico de comparación de desviaciones estándar %Mo en DR-15.....	85
Figura 61: Gráfico de %Cu Alim. Preparación grupo 1, mayo 2015.	87
Figura 62: Correlación comparativa %Cu Alim. Preparación.....	88
Figura 63: Gráfico de comparación de promedios de tiempo lixiviación.	91
Figura 64: Nube de correlación Tiempo de Lixiviación vs T° Final.....	91
Figura 65: Comparación de promedios de salida de cúprico de cementación.....	93
Figura 66: Gráfico de comparación de promedios de eficiencia de cementación.	93
Figura 67: Gráfico de comparación de promedios de tiempo de cloración.....	95
Figura 68: Gráfico de comparación de promedios de ORP en cloración.	95
Figura 69: Gráfico de comparación de promedios de eficiencia de cloración.	96
Figura 70: Nube de correlación %Mo DR15 vs Rec. rougher.....	96
Figura 71: Comparación de distribuciones por grupo para la multiplicación de Alimentación (TMS estimada) y la recuperación rougher.....	97
Figura 72: Análisis de promedios para multiplicación entre Alimentación (TMS estimada) y la recuperación rougher por grupo.	97
Figura 73: Resumen de variables y efectos en la recuperación rougher (Naranja) y recuperación selectiva (Azul) según modelos estadísticos. “Variables medidas (in situ)” representa variables no	

ingresadas al sistema PI-System. Variables marcadas con asterisco no fueron consideradas en modelos estadísticos.	98
Figura 74: Resumen de variables en la Planta de Lixiviación Férrica. “Variables medidas (in situ)” representa variables no ingresadas al sistema PI-System.	100
Figura 75: Circuito de flotación simplificado (Recomendación).	104
Figura 76: (A) Histograma comparativo de Alimentación TMS por grupo. (B) Histograma comparativo de %Mo Conc. De primera limpieza por grupo.	116
Figura 77: (A) Histograma comparativo de %Cu Concentrado de primera limpieza por grupo. (B) Histograma comparativo de %Mo Relave de primera limpieza por grupo.	116
Figura 78: (A) Histograma comparativo de %Mo Relave Rougher por grupo. (B) Histograma comparativo de %Mo Conc. Rougher por grupo.	116
Figura 79: (A) Histograma comparativo de pH TK-15/16 por grupo. (B) Histograma comparativo de pH Rougher por grupo.	117
Figura 80: (A) Histograma comparativo de pH de etapa de primera limpieza por grupo. (B) Histograma comparativo de pH de etapa de segunda limpieza por grupo.	117
Figura 81: (A) Histograma comparativo de %Sólidos por Grupo. (B) Histograma comparativo de ORP Rougher por grupo.	117
Figura 82: (A) Histograma comparativo de ORP de etapa de primera limpieza por grupo. (B) Histograma comparativo de ORP segunda limpieza por grupo.	118
Figura 83: (A) Histograma comparativo de %Cu Concentrado de etapa de primera limpieza por grupo. (B) Histograma comparativo de %Mo Relave de etapa de primera limpieza por grupo.	118
Figura 84: (A) Histograma comparativo de Nivel de espuma Rougher por grupo. (B) Histograma comparativo de Nivel de espuma de etapa de primera limpieza por grupo.	118
Figura 85: (A) Histograma comparativo de nivel de espuma de segunda limpieza por grupo. (B) Histograma comparativo de Flujo de Nitrógeno por grupo.	119
Figura 86: (A) Histograma comparativo de presión de nitrógeno por grupo. (B) Histograma comparativo de %Oxígeno por grupo.	119
Figura 87: (A) Histograma comparativo de Espumante por grupo. (B) Histograma comparativo de consumo NaSH Rougher, Línea 1 por grupo.	119
Figura 88: (A) Histograma comparativo de consumo NaSH Rougher, Línea 2 por grupo. (B) Histograma comparativo de consumo NaSH Rougher, Línea 3 por grupo.	120
Figura 89: (A) Histograma comparativo de consumo NaSH Rougher Total por grupo. (B) Histograma comparativo de consumo NaSH de etapa de primera limpieza, Línea 1 por grupo.	120
Figura 90: (A) Histograma comparativo de consumo NaSH de etapa de primera limpieza, Línea 2 por grupo. (B) Histograma comparativo de consumo NaSH de etapa de primera limpieza Total por grupo.	120
Figura 91: Histograma comparativo de consumo NaSH Total en segunda limpieza por grupo.	121
Figura 92: (A) Nube de correlación Rec. Rougher vs %Mo Relave Rougher. (B) Nube de correlación Rec. Selectiva vs %Mo Relave Rougher.	121
Figura 93: (A) Nube de correlación ORP de etapa de primera limpieza vs pH de etapa de primera limpieza. (B) Nube de correlación %Mo Concentrado de primera limpieza vs %Cu concentrado de primera limpieza.	122
Figura 94: Nube de correlación RCC (2) vs %Mo concentrado rougher.	122
Figura 95: Histograma de variables de flotación por tiempo (marzo-abril 2015).	123
Figura 96: Histograma de variables de flotación por tiempo (mayo-junio 2015).	124
Figura 97: Histograma de variables de flotación por tiempo (julio-agosto 2015).	125

Figura 98: (A) Histograma comparativo de %Cu Concentrado final (DR-15). (B) Histograma comparativo de %Fe Concentrado final (DR-15).....	126
Figura 99: (A) Histograma comparativo de %Cl concentrado final (DR-15). (B) Histograma comparativo de %As concentrado final (DR-15).	126
Figura 100: (A) Histograma comparativo de Humedad concentrado final (DR-15). (B) Histograma comparativo de %Ca Concentrado final (DR-15).	126
Figura 101: (A) Histograma comparativo de Fe^{+3} resultante preparación. (B) Histograma comparativo de Cu^{+2} resultante preparación.	127
Figura 102: (A) Histograma comparativo de Fe^{+2} Resultante preparación. (B) Histograma comparativo de Razón Fe/Cu preparación.....	127
Figura 103: Histograma comparativo de %Exceso Fe/Cu.....	127
Figura 104: (A) Histograma comparativo de T $^{\circ}$ Inicial Lixiviación. (B) Histograma comparativo de T $^{\circ}$ Media Lixiviación.....	128
Figura 105: (A) Histograma comparativo de T $^{\circ}$ Final Lixiviación. (B) Histograma comparativo de Tiempo de Lixiviación.....	128
Figura 106: Histograma comparativo de Tiempo Total Lixiviación.....	128

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Parámetros operacionales para espesadores de alimentación.....	18
Tabla 2: Parámetros operacionales para Flotación Rougher.	19
Tabla 3: Parámetros operacionales para etapa de primera limpieza.....	19
Tabla 4: Parámetros operacionales para etapa de segunda limpieza.	19
Tabla 5: Energía libre de Gibbs de las reacciones (13) y (14).	21
Tabla 6: Parámetros operacionales de etapa de preparación.	22
Tabla 7: Parámetros operacionales de etapa de Lixiviación.....	23
Tabla 8: parámetros operacionales de etapa de Cementación	25
Tabla 9: Parámetros operacionales de etapa de cloración.	26
Tabla 10: Rangos operacionales para la razón Fe^{+3}/Fe^{+2} para distintas etapas de la PLF.....	28
Tabla 11: Resultados de entrevistas a operadores Flotación.	33
Tabla 12: Resumen de entrevista Grupo 1 Flotación.	34
Tabla 13: Resumen de entrevista Grupo 2 Flotación.	36
Tabla 14: Resumen de entrevista Grupo 3 Flotación.	38
Tabla 15: Resumen de entrevista Grupo 4 Flotación.	39
Tabla 16: Resultados de entrevistas a operadores Planta de lixiviación Férrica.....	40
Tabla 17: Resumen de entrevista Jefe de PLF.....	41
Tabla 18: Resumen de entrevista Grupo 1 PLF.....	42
Tabla 19: Resumen de entrevista Grupo 2 PLF.....	43
Tabla 20: Resumen de entrevista Grupo 3 PLF.....	44
Tabla 21: Resultados de entrevista Grupo 4 PLF.....	44
Tabla 22: Resultados finales de consumo de colector para distintos experimentos.....	47
Tabla 23: Resultados estadísticos de variables de eficiencia Flotación.	51
Tabla 24: Comparación entre las dos formas de calcular RCC.....	56
Tabla 25: Resultados estadística valores de control Flotación.	58
Tabla 26: Variables Primarias de control Flotación.	62
Tabla 27: Correlación entre variables base de flotación.....	63
Tabla 28: Coeficientes de variables Modelo 1 (Rec. Selectiva).....	66
Tabla 29: Optimización 1 Modelo 1.....	67
Tabla 30: Optimización 2 Modelo 1.....	67
Tabla 31: Optimización 3 Modelo 1.....	68
Tabla 32: Optimización 4 Modelo 1.....	69
Tabla 33: Coeficientes de variables Modelo 2 (Rec. Rougher).....	70
Tabla 34: Optimización 1 Modelo 2.....	71
Tabla 35: Variables secundarias de Flotación.	73
Tabla 36: Correlación entre variables primarias y secundarias de flotación.....	74
Tabla 37: Coeficientes de variables Modelo 3 (Rec. rougher).	78
Tabla 38: Coeficientes de Variables Modelo 4 (Rec. Selectiva).....	80
Tabla 39: Resultados estadísticos de variables de eficiencia PLF.....	84
Tabla 40: Índices estadísticos básicos de alimentación a Preparación.	86
Tabla 41: Índices estadísticos básicos de Plantilla Excel Preparación.....	86
Tabla 42: Resultados de Análisis de Varianza Promedio %Cu alim. Medido vs Aproximación.	88
Tabla 43: Diferencia entre %Cu Medido vs Aproximado.....	89
Tabla 44: Correlación variables de Eficiencia PLF vs Alimentación Preparación.	89

Tabla 45: Resultados estadística Lixiviación.	90
Tabla 46: Resultados estadística cementación.....	92
Tabla 47: Resultados Índices básicos estadísticos cloración.....	94
Tabla 48: Potencial de electrodo para distintas reacciones. Fuente: Habashi F. (1999)	108
Tabla 49: Configuración de peso y concentración para curva de calibración.	110