

Tabla de Contenidos

1. Introducción	1
1.1. Presentación del tema	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo general	2
1.2.2. Objetivos específicos	2
1.3. Alcances del trabajo	3
2. Antecedentes de procesamiento de minerales	4
2.1. Antecedentes de la etapa de molienda	4
2.1.1. Material particulado	4
2.1.2. Operaciones de conminución	5
2.1.3. Electroquímica de molienda	6
2.2. Antecedentes de la etapa de Flotación	8
2.2.1. Fases presentes en el sistema de flotación	8
2.2.2. Reactivos usados en el proceso de flotación	10
2.2.3. Teorías de adsorción	12
2.2.4. Especies de interés y su flotabilidad	14
2.2.5. Cinética de flotación	16
3. Antecedentes de especies, análisis de solución y superficie	18
3.1. Sistemas heterogéneos: Equilibrios en dos fases	18
3.1.1. Solubilidad en sólido - líquido	18
3.1.2. Velocidad de reacción o tasa de disolución en sistemas sólido - líquido	21
3.2. Análisis de especies en solución	22
3.2.1. Valoración complexométrica	22
3.2.2. Espectroscopía de emisión atómica con plasma (ICP - OES)	28
3.3. Análisis de especies en superficie	28
3.3.1. Espectroscopía de fotoelectrones por rayos X (XPS)	28
3.3.2. Microscopía electrónica de barrido (SEM - EDS)	33
4. Trabajo experimental	34
4.1. Análisis con minerales de alimentación	35
4.1.1. Preparación y análisis de minerales de alimentación	35
4.1.2. Cinética de molienda	39
4.1.3. Análisis de elementos en solución	41
4.1.4. Análisis de especies en sólido	45
4.1.5. Medición de parámetros fisicoquímicos	45

4.1.6.	Flotación	46
4.2.	Análisis con concentrados	47
4.2.1.	Preparación y análisis de muestra	47
4.2.2.	Medición de parámetros fisicoquímicos	49
4.2.3.	Microflotación	51
4.2.4.	Análisis de especies en superficie	52
5.	Resultados experimentales	53
5.1.	Resultados para minerales de alimentación	53
5.1.1.	Tiempos de molienda	53
5.1.2.	Elementos en solución	53
5.1.3.	Parámetros fisicoquímicos	57
5.1.4.	Elementos en superficie	60
5.1.5.	Flotación	62
5.2.	Resultados con muestras de concentrado	64
5.2.1.	Parámetros fisicoquímicos	64
5.2.2.	Microflotación	67
5.2.3.	Elementos en superficie	70
6.	Discusiones	80
6.1.	Discusiones para minerales de alimentación	80
6.1.1.	Elementos en solución	80
6.1.2.	Elementos en superficie	82
6.1.3.	Parámetros fisicoquímicos	83
6.1.4.	Flotación	83
6.2.	Discusiones para concentrados	83
6.2.1.	Microflotación y parámetros fisicoquímicos	84
7.	Conclusiones	87
	Bibliografía	88
A.	Protocolos	91
A.1.	Procedimiento para cinética de molienda	91
B.	Análisis granulométrico	93
B.1.	Tamizaje en húmido de mineral UGM1	93
B.2.	Tamizaje en seco de mineral UGM1	94
B.3.	Tamizaje en húmido de mineral UGM2	96
B.4.	Tamizaje en seco de mineral UGM2	97
C.	Análisis de solución y superficie	100
C.1.	Propiedades fisicoquímicas de la solución	100
C.2.	Valoración complexométrica	102
C.2.1.	Corroboración para Mg^{2+}	102
C.3.	Valoración de Mg^{2+} y Ca^{2+}	104
C.4.	Análisis SEM para diferentes muestras de concentrado	107
C.4.1.	Análisis SEM para concentrado de molibdeno obtenido de microflotación	107

C.4.2.	Análisis SEM para relave de molibdeno obtenido de microflotación	109
C.4.3.	Análisis SEM para concentrado de cobre obtenido de microflotación	110
C.4.4.	Análisis SEM para relave de cobre obtenido de microflotación	112
D.	Flotación de minerales	114
D.1.	Resultados de ajuste de modelos para mineral UGM1	114
D.2.	Resultados de ajuste de modelos para mineral UGM2	115
D.3.	Microflotación de concentrado de molibdeno	115
D.4.	Microflotación de concentrado de cobre	116

Índice de Tablas

2.1.1.Potencial mixto de algunos minerales sulfurados	7
3.1.1.Constantes de producto de solubilidad.	20
4.1.1.Análisis químico elemental para muestras de mineral.	36
4.1.2.Análisis microscópico de minerales metálicos.	36
4.1.3.Análisis microscópico de ganga no metálica.	36
4.1.4.Principales especies metálicas mineral UGM1.	37
4.1.5.Principales especies metálicas mineral UGM2.	38
4.1.6.Análisis granulométrico muestra UGM1.	39
4.1.7.Análisis granulométrico muestra UGM2.	40
4.1.8.P ₈₀ para muestras de minerales en función del tiempo.	41
4.1.9.Especificación de soluciones requeridas para complexometría.	42
4.1.10.Condiciones Operación para proceso de Flotación.	46
4.2.1.Composición elemental superficial de muestra de molibdeno.	49
4.2.2.Composición elemental superficial de muestra de cobre.	49
4.2.3.Detalle de concentraciones de elementos para solución dopada.	50
4.2.4.Condiciones de operación para proceso de Microflotación.	51
5.1.1.Tiempos de molienda de muestras de minerales.	53
5.1.2.Concentración de elementos en función del tiempo de molienda para mineral UGM1.	54
5.1.3.Concentración de elementos en función del tiempo de molienda para mineral UGM2.	54
5.1.4.Parámetros fisicoquímicos en función del tiempo de molienda para mineral UGM1.	57
5.1.5.Parámetros fisicoquímicos en función del tiempo de molienda para mineral UGM2.	58
5.1.6.Recuperación de cobre de mineral UGM1.	62
5.1.7.Parámetros cinéticos de recuperación de cobre de mineral UGM1.	62
5.1.8.Recuperación de cobre de mineral UGM2.	63
5.1.9.Parámetros cinéticos de recuperación de cobre de mineral UGM2.	63
5.2.1.Parámetros fisicoquímicos de muestra de molibdeno en función del pH.	64
5.2.2.Parámetros fisicoquímicos de muestra de cobre en función del pH.	64
5.2.3.Recuperación metalúrgica de molibdeno en microflotación.	67
5.2.4.Recuperación metalúrgica de cobre en microflotación.	68
5.2.5.SEM para concentrado de molibdeno producido en microflotación en función del pH.	70
5.2.6.SEM para relave de molibdeno producido en microflotación en función del pH.	72
5.2.7.SEM para concentrado de cobre producido en microflotación en función del pH.	75
5.2.8.SEM para relave de cobre producido en microflotación en función del pH.	77
A.1.1 Resumen para construcción de distribución granulométrica.	92

B.1.1.Cálculo de mineral -200# presente en mineral UGM1.	93
B.2.1.Resultados Intermedios Análisis granulométrico muestra UGM1 a tiempo 0 min. . .	94
B.2.2.Resultados Intermedios Análisis granulométrico muestra UGM1 a tiempo 4 min. . .	94
B.2.3.Resultados Intermedios Análisis granulométrico muestra UGM1 a tiempo 6 min. . .	95
B.2.4.Resultados Intermedios Análisis granulométrico muestra UGM1 a tiempo 8 min. . .	95
B.2.5.Resultados Intermedios Análisis granulométrico muestra UGM1 a tiempo 10 min. . .	96
B.3.1.Cálculo de mineral -200# presente en mineral UGM2.	96
B.4.1.Resultados Intermedios Análisis granulométrico muestra UGM2 a tiempo 0 min. . .	97
B.4.2.Resultados Intermedios Análisis granulométrico muestra UGM2 a tiempo 4 min. . .	97
B.4.3.Resultados Intermedios Análisis granulométrico muestra UGM2 a tiempo 6 min. . .	98
B.4.4.Resultados Intermedios Análisis granulométrico muestra UGM2 a tiempo 8 min. . .	98
B.4.5.Resultados Intermedios Análisis granulométrico muestra UGM2 a tiempo 10 min. . .	99
B.4.6.Parámetros de Rosin - Rammler para cálculo de superficie total de UGM1.	99
B.4.7.Parámetros de Rosin - Rammler para cálculo de superficie total de UGM2.	99
C.1.1.Parámetros fisicoquímicos de mineral UGM1.	100
C.1.2.Parámetros fisicoquímicos de mineral UGM2.	100
C.1.3.Parámetros fisicoquímicos de concentrado de molibdeno en agua destilada.	101
C.1.4.Parámetros fisicoquímicos de concentrado de cobre en agua destilada.	101
C.2.1.Corroboración para concentración 200 mg/L.	102
C.2.2.Corroboración para concentración 220 mg/L.	102
C.2.3.Corroboración para concentración 240 mg/L.	102
C.2.4.Corroboración para concentración 260 mg/L.	103
C.2.5.Corroboración para concentración 280 mg/L.	103
C.2.6.Corroboración para concentración 300 mg/L.	103
C.2.7.Resumen de corroboración de valoración.	103
C.3.1.Valoración complexométrica para mineral UGM1 a tiempo 4 min.	104
C.3.2.Valoración complexométrica para mineral UGM1 a tiempo 7 min.	104
C.3.3.Valoración complexométrica para mineral UGM1 a tiempo 10 min.	104
C.3.4.Valoración complexométrica para mineral UGM1 a tiempo 12 min.	105
C.3.5.Valoración complexométrica para mineral UGM1 a tiempo 15 min.	105
C.3.6.Valoración complexométrica para mineral UGM2 a tiempo 4 min.	105
C.3.7.Valoración complexométrica para mineral UGM2 a tiempo 7 min.	105
C.3.8.Valoración complexométrica para mineral UGM2 a tiempo 10 min.	105
C.3.9.Valoración complexométrica para mineral UGM2 a tiempo 12 min.	106
C.3.10. Valoración complexométrica para mineral UGM2 a tiempo 15 min.	106
C.4.1.Distribución elemental de partículas de Mo en el concentrado para pH 4.	107
C.4.2.Distribución elemental de partículas de Mo en el concentrado para pH 6.	107
C.4.3.Distribución elemental de partículas de Mo en el concentrado para pH 8.	107
C.4.4.Distribución elemental de partículas de Mo en el concentrado para pH 10.	108
C.4.5.Distribución elemental de partículas de Mo en el concentrado para pH 12.	108
C.4.6.Distribución elemental de partículas de Mo en el relave para pH 8.	109
C.4.7.Distribución elemental de partículas de Mo en el relave para pH 10.	109
C.4.8.Distribución elemental de partículas de Mo en el relave para pH 12.	109
C.4.9.Distribución elemental de partículas de Cu en el concentrado para pH 4.	110
C.4.10.Distribución elemental de partículas de Cu en el concentrado para pH 6.	110
C.4.11.Distribución elemental de partículas de Cu en el concentrado para pH 8.	111

C.4.12	Distribución elemental de partículas de Cu en el concentrado para pH 10.	111
C.4.13	Distribución elemental de partículas de Cu en el concentrado para pH 12.	111
C.4.14	Distribución elemental de partículas de Cu en el relave para pH 4.	112
C.4.15	Distribución elemental de partículas de Cu en el relave para pH 6.	112
C.4.16	Distribución elemental de partículas de Cu en el relave para pH 8.	113
C.4.17	Distribución elemental de partículas de Cu en el relave para pH 10.	113
C.4.18	Distribución elemental de partículas de Cu en el relave para pH 12.	113
D.1.1	Recuperación según modelos para mineral UGM1.	114
D.1.2	Suma error cuadrático según modelos para mineral UGM1.	114
D.2.1	Recuperación según modelos para mineral UGM2.	115
D.2.2	Suma error cuadrático según modelos para mineral UGM2.	115
D.3.1	Primera ronda de microflotaciones de concentrado de molibdeno.	115
D.3.2	Segunda ronda de microflotaciones de concentrado de molibdeno.	116
D.4.1	Primera ronda de microflotaciones de concentrado de cobre.	116

Índice de Ilustraciones

2.1.1. Esquema de la distribución de tamaño.	5
2.1.2. Esquema de la distribución acumulada bajo tamaño.	5
2.1.3. Esquema de reacción entre mineral sulfurado y medios de molienda	7
2.2.1. Interacción de las fases en el proceso de flotación.	9
2.2.2. Celda de flotación y agregado partícula - burbuja.	9
2.2.3. Interacción partícula - colector.	11
2.2.4. Interacción burbuja - espumante.	11
2.2.5. Teoría química de adsorción.	12
2.2.6. Curva flotabilidad - potencial para CuFeS_2 en ausencia de colector.	14
2.2.7. Curva flotabilidad - potencial para CuFeS_2 en presencia de colector	14
2.2.8. Representación de estructura cristalina de MoS_2	15
2.2.9. Curva flotabilidad - potencial para MoS_2 en ausencia de colector	16
3.1.1. Valores de pH para precipitación de especies.	21
3.2.1. Esqueleto del EDTA.	23
3.2.2. Función de distribución de especies de EDTA en función de pH.	25
3.2.3. Esqueleto del EBT.	26
3.2.4. Esqueleto de murexida.	27
3.3.1. Proceso de fotoemisión para un átomo aislado.	30
3.3.2. Efecto fotoeléctrico en un sólido.	31
3.3.3. Penetración de la fotoemisión en un sólido.	32
4.1.1. Distribución de tamaño acumulada mineral UGM1.	39
4.1.2. Distribución de tamaño acumulada mineral UGM2.	40
4.1.3. Curva P_{80} vs t para determinación tiempo de molienda.	41
4.1.4. Validación de valoración complexométrica de Mg^{2+}	44
4.2.1. Análisis SEM para muestra de molibdeno.	48
4.2.2. Análisis SEM para muestra de cobre.	49
5.1.1. Comparación de Mg^{2+} entre muestras de mineral.	54
5.1.2. Comparación tasa de disolución de Mg^{2+} entre muestras de mineral.	55
5.1.3. Comparación de Ca^{2+} entre muestras de mineral.	55
5.1.4. Comparación tasa de disolución de Ca^{2+} entre muestras de mineral.	56
5.1.5. Comparación de Al^{3+} entre muestras de mineral.	56
5.1.6. Comparación tasa de disolución de Al^{3+} entre muestras de mineral.	57
5.1.7. Comparación de potencial entre muestras de mineral.	58
5.1.8. Comparación de OD entre muestras de mineral.	58
5.1.9. Comparación de pH entre muestras de mineral.	59

5.1.10. Valores de pH para precipitación de especies.	59
5.1.11. Espectros XPS de mineral UGM1.	60
5.1.12. Espectros XPS de mineral UGM2.	61
5.1.13. Recuperación de cobre en el tiempo de mineral UGM1.	62
5.1.14. Recuperación de cobre en el tiempo de mineral UGM2.	63
5.2.1. Potencial de pulpa de muestra de molibdeno en función del pH.	65
5.2.2. Oxígeno disuelto de muestra de molibdeno en función del pH.	65
5.2.3. Potencial de pulpa de muestra de cobre en función del pH.	66
5.2.4. Oxígeno disuelto de muestra de cobre en función del pH.	66
5.2.5. Recuperación metalúrgica de molibdeno en microflotación.	67
5.2.6. Recuperación de molibdeno en microflotación en función del potencial.	68
5.2.7. Recuperación metalúrgica de cobre en microflotación.	69
5.2.8. Recuperación de cobre en microflotación en función del potencial.	69
5.2.9. Recuperación metalúrgica de diferentes elementos en microflotación.	70
5.2.10. SEM de partículas de concentrado de molibdeno posterior a microflotación.	71
5.2.11. Distribución para concentrado de molibdeno en función del pH.	71
5.2.12. SEM de partículas de relave de molibdeno posterior a microflotación.	72
5.2.13. Distribución para relave de molibdeno en función del pH.	73
5.2.14. SEM de partículas de molibdeno posterior a microflotación.	74
5.2.15. SEM de partículas de concentrado de cobre posterior a microflotación.	75
5.2.16. Distribución para concentrado de cobre en función del pH.	76
5.2.17. SEM de partículas de relave de cobre posterior a microflotación.	77
5.2.18. Distribución para relave de cobre en función del pH.	78
5.2.19. SEM de partículas de cobre posterior a microflotación.	79
C.1.1. Relación de potencial usando electrodo Ag/AgCl con la temperatura.	101