

ÍNDICE

RESUMEN.....	i
ABSTRACT	ii
AGRADECIMIENTOS.....	iii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Antecedentes y motivaciones	1
1.2. Descripción del problema	2
1.3. Objetivos	4
1.4. Alcances y limitaciones.....	5
2. MARCO TEÓRICO	7
2.1. Flotación.....	7
2.1.2. Flotación de Calcopirita	11
2.2. Ozono.....	15
2.2.1. Flotación con ozono.....	17
2.2.2. Efectos del ozono en la salud	23
2.3. Metaloides	26
2.3.1. Efectos en la salud	28
2.3.2. Procesos depresante de arsénico.....	28
3.1. Preparación de muestras.....	35
3.2. Análisis de distribución granulométrico	37
3.3. Análisis de composición química	37
3.4. Ozonización del material.....	38
3.5. Flotación.....	39
3.6. Preparación de material para análisis	40
3.7. Indicadores metalúrgicos de calidad.....	40
3.8. Análisis de burbuja y flujo de gas.....	42

4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	45
4.1.	Granulometría.....	45
4.2.	Ozonización de material a pH variable.....	46
4.3.	Flotación.....	55
5.	CONCLUSIONES	79
6.	REFERENCIAS	83
7.	ANEXO	88

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Potenciales de reducción (Bataller et al., 2010)	16
Tabla 2: Guía de calidad del aire de la Organización Mundial de la Salud y objetivo intermedio para el ozono: concentraciones de ocho horas (OMS, 2005)	24
Tabla 3: Efectos del ozono en la salud según su concentración (Top Ozono, 2020).....	25
Tabla 4: Granulometría de la muestra estudiada	45
Tabla 5: Leyes porcentuales del material a ozonizar sin usar reguladores de pH	47
Tabla 6: Leyes porcentuales del material ozonizado sin el uso de reguladores de pH.....	48
Tabla 7: Leyes porcentuales liquido residual del material ozonizado sin el uso de reguladores de pH	48
Tabla 8: Ozonizado de 5 minutos.....	50
Tabla 9: Ozonizado de 10 minutos.....	51
Tabla 10: Ozonizado de 15 minutos.....	51
Tabla 11: Tasa de caída del pH en material ozonizado (pH/s), regulado con HCl y NaOH	54
Tabla 12: Recuperación metalúrgica acumulada de cobre en el tiempo, para flotación a pH 3	57
Tabla 13: Recuperación metalúrgica acumulada de cobre en el tiempo, para flotación a pH 7	58
Tabla 14: Recuperación metalúrgica acumulada de cobre en el tiempo, para flotación a pH 12	58
Tabla 15: Razón de enriquecimiento de cobre a pH 3, para flotaciones de distinto uso de gases.....	59
Tabla 16: Razón de enriquecimiento de cobre a pH 7, para flotaciones de distinto uso de gases.....	60
Tabla 17: Razón de enriquecimiento de cobre a pH 12, para flotaciones de distinto uso de gases.....	60
Tabla 18: Selectividad de cobre a pH 3, para flotaciones de distinto uso de gases.....	62
Tabla 19: Selectividad de cobre a pH 7, para flotaciones de distinto uso de gases.....	62
Tabla 20: Selectividad de cobre a pH 12, para flotaciones de distinto uso de gases.....	62
Tabla 21: Recuperación metalúrgica acumulada modelada de arsénico, obtenida por los formatos de flotación distintos a pH 3	66

Tabla 22: Recuperación metalúrgica acumulada modelada de arsénico, obtenida por los formatos de flotación distintos a pH 7	67
Tabla 23: Recuperación metalúrgica acumulada modelada de arsénico, obtenida por los formatos de flotación distintos a pH 12	67
Tabla 24: Razón de enriquecimiento de arsénico a pH 3, para flotaciones de distinto uso de gases	68
Tabla 25: Razón de enriquecimiento de arsénico a pH 7, para flotaciones de distinto uso de gases	68
Tabla 26: Razón de enriquecimiento de arsénico a pH 12, para flotaciones de distinto uso de gases	68
Tabla 27: Selectividad de arsénico a pH 3, para flotaciones de distinto uso de gases	70
Tabla 28: Selectividad de arsénico a pH 7, para flotaciones de distinto uso de gases	70
Tabla 29: Selectividad de arsénico a pH 12, para flotaciones de distinto uso de gases ...	70
Tabla 30: Resultados análisis de burbuja y flujo de gas en la celda de flotación para diferentes gases y pH	72
Tabla 31: Potenciales <i>redox</i> durante la flotación de diferentes gases a pH 3.....	73
Tabla 32: Potenciales <i>redox</i> durante la flotación de diferentes gases a pH 7.....	73
Tabla 33: Potenciales <i>redox</i> durante la flotación de diferentes gases a pH 12.....	73
Tabla 34: Tazas de caída de pH para flotación con Ozono en el tiempo a diferentes pH.	74
Tabla 35: Concentraciones porcentuales de cobre y arsénico en las diferentes flotaciones y momentos realizados a pH 3.....	75
Tabla 36: Concentraciones porcentuales de cobre y arsénico en las diferentes flotaciones y momentos realizados a pH 7.....	75
Tabla 37: Concentraciones porcentuales de cobre y arsénico en las diferentes flotaciones y momentos realizados a pH 12.....	76

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Esquema representativo de una celda de flotación (Marco Zapata y Jaime Zapata, 2004)	10
Figura 2: Flotabilidad de calcopirita en función del pH a varias concentraciones de colector etil xantato de potasio (Cabrera Tejada, 2005)	12
Figura 3: Curva de potencial vs recuperación de enargita y calcopirita (Senior et al., 2006)	13
Figura 4: Resultados de concentración del proceso de rougher y cleaner (Long et al., 2014)	¡Error! Marcador no definido.
Figura 5: Estado químico de la pulpa durante la flotación rougher (Long et al., 2014)	14
Figura 6: Estado químico de la pulpa durante la flotación cleaner (Long et al., 2014) ...	15
Figura 7: Tabla de potenciales de reducción (Bataller, Fernández y Véliz; 2010)	16
Figura 8: Efecto del tiempo de acondicionamiento de ozono en flotación de una etapa para muestra de calcopirita/molibdenita a pH 7 y con pre acondicionamiento con 0,4 kg/ton de keroseno (Ye et al., 1990)	19
Figura 9: Efecto de la cantidad de xantato usada en la flotación de sulfuro de cobre a granel (Iwasaki et al., 1985)	20
Figura 10: Efecto del tiempo de acondicionamiento para la flotación diferencial de material tratado con ozono y remolido, utilizando colector xantato a pH natural (Iwasaki et al., 1985).....	21
Figura 11: Efecto del tiempo de acondicionamiento para la flotación diferencial de material remolido y tratado con ozono, utilizando colector xantato a pH natural (Iwasaki et al., 1985).....	22
Figura 12: Efecto del pH en la recuperación de cobre al flotar con ozono (Iwasaki et al., 1985)	22
Figura 13: Guía de calidad del aire de la OMS y objetivo intermedio para el ozono: concentraciones de ocho horas (OMS, 2005)	¡Error! Marcador no definido.
Figura 14: Tabla periódica destacando los elementos considerados metaloides (Lombi et al., 2010).....	26
Figura 15: Diagrama de formación en base a potencial (Eh) y pH (Pourbaix, M. (1974), Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions (2nd English Edition). National Association of Corrosion Engineers, pag. 520.)	31

Figura 16: Grafica del radio de solubilidad del ozono en función del pH (Lozano, 2018).	32
Figura 17: Deposición del material sobre lona (creación propia).....	35
Figura 18: Esquema de roleo (elaboración propia)	36
Figura 19: Cuarteo y selección de material (elaboración propia).....	36
Figura 20: Esquema propuesto para análisis de ozonización (elaboración propia)	38
Figura 21: Esquema de celda de flotación utilizada (elaboración propia)	39
Figura 22: Grafica de respuesta del material a ozonización de 15 minutos a diferentes pH sin uso de reguladores.....	46
Figura 23: Grafica de cambio de leyes porcentuales del cobre en el proceso de ozonizado sin uso de reguladores de pH	49
Figura 24: Grafica de cambio de leyes porcentuales del arsénico en el proceso de ozonizado sin uso de reguladores de pH	49
Figura 25: Grafico de variación de leyes de cobre para muestras con y sin uso de reguladores de pH en el proceso de ozonizado de 15 minutos	52
Figura 26: Grafico de variación de leyes de arsénico para muestras con y sin uso de reguladores de pH en el proceso de ozonizado de 15 minutos	52
Figura 27: Potencial de oxido reducción a diferentes pH en el tiempo de ozonización....	53
Figura 28: Grafico de recuperación de cobre en el tiempo para en flotación cinética a pH 3	55
Figura 29: Grafico de recuperación de cobre en el tiempo para en flotación cinética a pH 7	56
Figura 30: Grafico de recuperación de cobre en el tiempo para en flotación cinética a pH 12	56
Figura 31: Grafica la razón de enriquecimiento de cobre en pH variado, para flotaciones de distinto uso de gases	61
Figura 32: Grafica de selectividad de cobre en pH variado, para flotaciones de distinto uso de gases	63
Figura 33: Grafica de recuperación metalúrgica acumulada modelada de arsénico, obtenida por los formatos de flotación distintos a pH 3	64
Figura 34: Grafica de recuperación metalúrgica acumulada modelada de arsénico, obtenida por los formatos de flotación distintos a pH 7	65
Figura 35: Grafica de recuperación metalúrgica acumulada modelada de arsénico, obtenida por los formatos de flotación distintos a pH 12	65

Figura 36: Grafica la razón de enriquecimiento de arsénico en pH variado, para flotaciones de distinto uso de gases	69
Figura 37: Grafica de selectividad de arsénico en pH variado, para flotaciones de distinto uso de gases	71

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1: Descomposición del ozono en agua	17
Ecuación 2: Potencial de óxido reducción del ozono al reaccionar en pH ácido (1) y pH básico (2) (Otgón et al., 2016)	29
Ecuación 3: Ecuaciones oxidación del arsénico al ser sometido al ozono (Otgón et al., 2016)	30
Ecuación 4: Ecuaciones de reacción del ozono en solución con arsénico (Lozano, 2018)	32
Ecuación 5: Recuperación metalúrgica porcentual.	40
Ecuación 6: Ecuación de 1° orden propuesto por García y Zúñiga; con “ R^∞ ” y “ k ” variables empíricas, “ R_t ”, la recuperación parcial en un momento “ t ”.	41
Ecuación 7: Error para recuperación metalúrgica acumulada en el tiempo	41
Ecuación 8: Razón de enriquecimiento	41
Ecuación 9: Índice de selectividad	42
Ecuación 10: Cálculo de flujo de área de superficie de burbuja de gas.....	43