

TRATAMIENTO POR FLOTACIÓN DEL DRENAJE ÁCIDO DE MINA GRANDE DEL COBRE

BEATRIZ RAMÍREZ SERRANO*

ALFREDO LÁZARO COELLO VELÁZQUEZ **

JUAN MARÍA MENÉNDEZ AGUADO***

**Doctor en Ciencias Técnicas. Ingeniero en Metalurgia. Profesor Auxiliar del Departamento de Metalurgia del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez". Moa, Holguín. Cuba.. bramirez@ismm.edu.cu.*

***Doctor en Ciencias Técnicas. Ingeniero en Minas. Profesor Titular del Departamento de Metalurgia del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez".*

****Doctor en Ciencias Técnicas. Ingeniero en Minas. Profesor Titular del Departamento de Minas. Campus Mieres. Universidad de Oviedo, España.*

RESUMEN

Para el tratamiento del drenaje ácido de Mina Grande del Cobre ubicada en la provincia cubana de Santiago de Cuba, se realiza un estudio en columnas de flotación con la utilización del amilxantato de potasio como reactivo colector. La investigación se lleva a cabo con el objetivo de demostrar la aplicabilidad de esta técnica en la descontaminación de dichas soluciones residuales que en este momento constituyen un foco de contaminación ambiental. Durante el desarrollo se utilizan métodos empíricos tales como las técnicas de muestreo, la observación, la estadística matemática y el diseño factorial.

La combinación de estos métodos permiten evaluar el efecto de las variables relación colector: metal, velocidad superficial del gas y concentración de espumante en el proceso de flotación, fueron establecidos los modelos matemático- estadísticos que caracterizan comportamiento de los elementos que encuentran en mayor proporción en las aguas residuales de la mina. Los resultados alcanzados permiten concluir que la flotación es una técnica adecuada para el tratamiento del drenaje ácido de Mina Grande del Cobre, su aplicación permite obtener soluciones con concentraciones de iones metálicos por debajo de los valores máximos admisibles según las normas cubanas.

Palabras claves: drenaje ácido de mina, medio ambiente, residuales líquidos, flotación iónica, cobre amilxantato.

ABSTRACT

For the treatment of the acid drainage of Mina Grande del Cobre located in the Cuban province of Santiago de Cuba, a study is made in flotation columns with the use of potassium amyloxanthate as a collector reagent. The research is carried out with the objective of demonstrating the applicability of this technique in the decontamination of these residual solutions that at the moment constitute a focus of environmental contamination. During the development, empirical methods such as sampling techniques, observation, mathematical statistics and factorial design are used.

The combination of these methods allows to evaluate the effect of the collector: metal, gas superficial velocity and foam concentration variables in the flotation process. The mathematical-statistical models that characterize the behavior of the elements found in a greater proportion were established. wastewater from the mine. The results obtained allow us to conclude that flotation is an adequate technique for the treatment of acid drainage from Mina Grande del Cobre, its application allows solutions with metal ion concentrations below the maximum admissible values according to Cuban standards.

Keywords: acid mine drainage, environment, liquid residuals, ionic flotation, copper amyloxanthate.

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los principales problemas ambientales que causa la minería es la generación del drenaje ácido de mina (AMD). El mismo se caracteriza por un valor de pH inferior a 5 y altos niveles de elementos tóxicos disueltos. Los elementos y la concentración de los elementos tóxicos presentes varía de acuerdo con el tipo de depósito aunque de forma general pueden incluirse As, Pb, Cd, Fe, Cu, Zn y en algunos casos, Tl o Se (Romero *et al.*, 2010). Durante la neutralización del AMD la concentración de los elementos tóxicos disueltos puede ser reducido, como consecuencia de las reacciones de precipitación y sorción, de forma permanente o temporal (Levy *et al.*, 1997; Holmstrom *et al.*, 2001; Sánchez *et al.*, 2005). Sin embargo, en ocasiones la contaminación de corrientes fluviales como es el caso de los ríos Tinto y Odiel o la acumulación en represas del AMD implica que su tratamiento requiere del procesamiento de grandes volúmenes de soluciones donde los métodos tradicionales que se aplican para el tratamiento de

residuales contaminados con iones metálicos como la precipitación de combinaciones poco solubles, extracción por solvente, intercambio iónico, entre otros, enfrentan mayores inconvenientes en la medida que las soluciones son más diluidas y los volúmenes de efluentes son mayores (Kurniawan *et al.*, 2006; www.ecoamerica.cl/mayo, 2007).

Ante esta disyuntiva, la flotación que en las últimas décadas ha extendido su campo de aplicación a la separación iones, la flotación iónica (Sebba, 1959), constituye una nueva alternativa. Se reportan, varios trabajos que demuestran la factibilidad de la aplicación de esta técnica en el tratamiento de aguas (Eccles, 1999; Carissimi *et al.*, 2007), drenajes ácidos de minas (Nenov *et al.*, 2008; Mahiroglu *et al.*, 2009; Silva y Rubio, 2009; Silveira *et al.*, 2009), así como el tratamiento de residuales industriales (Barakat, 2010). De aquí que, en el presente trabajo se estudia el tratamiento por flotación iónica con amilxantato de potasio de soluciones sintéticas que simulan el AMD de Mina Grande del cobre, Cuba.

2. UBICACIÓN DEL YACIMIENTO

El yacimiento sulfuroso de cobre Mina Grande se encuentra a unos 200 m del poblado El cobre y está situado a 21 km al oeste de la ciudad de Santiago de Cuba. Actualmente se encuentra fuera de explotación pero las actividades mineras dieron lugar a la degradación de la vegetación y los suelos que presentan un alto grado de deterioro y meteorización. La limitada actividad de conservación y el desarrollo de procesos erosivos dieron lugar a la formación del drenaje ácido que se caracterizan por un pH igual a 4,5 unidades y la presencia de diferentes especies metálicas como el cobre, cadmio, plomo, zinc, manganeso y aluminio entre otros, aunque se manifiesta el predominio de los

iones cobre (Rey, 2010), el cual sobrepasa los valores máximo admisible según la norma cubana 27 (NC-27, 1999). Durante la explotación de la mina dicho drenaje constituía una de las fuentes principales de contaminación del río El cobre (Pérez *et al.*, 2002), a partir del cierre de la misma en lo que con anterioridad constituía la cantera, se acumulan alrededor de 4 millones de m³ de aguas residuales (www.ecured.cu, 2011). Dicha medida redujo la contaminación del río (González *et al.*, 2009; Marañón *et al.*, 2009) sin embargo se mantiene latente el riesgo potencial de dañar el manto freático y las aguas subterráneas, lo cual implica la necesidad de buscar alternativas para el tratamiento de dichas soluciones.

3. ANTECEDENTES DE LA FLOTACIÓN IÓNICA CON XANTATOS

En la flotación iónica, por aire disuelto, de iones cobre(II), zinc y arsénico(V), a partir de soluciones sintéticas de iones individuales y de mezclas, se emplean como colectores el etilxantato y dietilxantato de sodio (Stalidis *et al.*, 1989; Matis y Mavros, 1991). De acuerdo con estos autores el pH no afecta la remoción de iones cobre en el

rango de pH entre 2,5 y 5,5 unidades pero se requiere de un exceso de reactivo colector del 10 %. Es significativo que en ambos trabajos se muestran resultados satisfactorios sin embargo, para pH inferior a 4,7 unidades se verifica la descomposición parcial del etilxantato (Iwasaki y Cooke, 1958; Rao, 1971; Tipman y Leja, 1975; Sun

y Forsling, 1997) y no se hace alusión al efecto que provoca en la eficiencia del proceso. El dietilxantato de sodio, a pesar de exhibir propiedades similares y mostrar buenos resultados en la colección de cobre y zinc, su utilización como colector se limita por el costo que representa su obtención (Leja, 1982).

Lazaridis *et al.* (1992), reportaron la aplicación de la misma técnica de flotación con etilxantato en sistemas de cobre, hierro y níquel, de forma independientes y en sus mezclas. Los resultados mostraron que el níquel se mantiene en solución para condiciones ácidas, mientras que las especies cobre e hierro flotan de forma conjunta y se incrementa gradualmente su recuperación hasta alcanzar valores máximos a partir de pH 6. De acuerdo con los autores, si el pH del sistema es igual a 2 unidades, los valores de recuperación se encuentran asociados con la concentración inicial de cobre, si su magnitud es baja la recuperación de cobre se reduce al 50 % y el hierro al 25 %, en caso contrario se remueve cerca del 80 %. Es posible que el resultado se asocie con la descomposición del etilxantato; su tiempo de vida media a pH 2,5 es de 120 segundos (Kakovsky, 1957). Lo cual coincide con los resultados alcanzados durante la flotación iónica de cobre a partir de aguas residuales de minas (Lazaridis *et al.*, 2004), según las condiciones establecidas Stalidis *et al.* (1989) que implican alta acidez. Se obtienen resultados favorables sólo cuando se utiliza el doble de la cantidad estequiométrica de etilxantato.

Los trabajos (Stalidis *et al.*, 1989; Lazaridis *et al.*, 1992) sobre la separación de iones cobre con etilxantato por medio de la flotación, muestran una contradicción en cuanto al valor de pH en el cual se alcanzan los valores óptimos de recuperación. Stalidis *et al.* (1989) plantearon que dicho resultado se alcanza en condiciones ácidas, donde el proceso es eficiente e independiente del pH,

4. DESARROLLO EXPERIMENTAL

4.1. Instalación experimental

Se dispuso de una instalación de flotación en columnas con características de prueba piloto. La columna de 5,5 m de alto y 9,4 cm de diámetro interno es de metacrilato transparente, figura 1.a, en la cual se determinaron las mejores condiciones para

mientras que Lazaridis *et al.* (1992), plantean que sólo es posible lograr resultados similares para pH superiores a 6 unidades.

En el tratamiento por flotación con colectores xantogenados de soluciones que contienen cobre y otros iones como zinc, hierro, cadmio, manganeso, magnesio, aluminio entre otros (Stalidis *et al.*, 1989; Matis y Mavros, 1991; Lazaridis *et al.*, 1992; Lazaridis *et al.*, 2004) se verifica la separación de otros iones en condiciones ácidas, aunque en todos los casos la remoción de cobre es superior con respecto de los demás elementos presentes. Los trabajos analizados indican la posibilidad de utilizar compuestos xantogenados como reactivo colector en el tratamiento por flotación de soluciones contaminadas con cobre y otros metales, aunque se refleja una dispersión en cuanto al valor de pH en el cual se alcanzan resultados favorables, cuando se utiliza etilxantato.

Es conocido además, que el incremento de la longitud de la cadena carbonada conduce a la formación de compuestos con menor producto de solubilidad (Rao, 1971), dado por el aumento de la fuerza de enlace del grupo aniónico y el catión metálico (Ignatkina *et al.*, 2009); elemento esencial durante la flotación iónica para garantizar la estabilidad del precipitado que se forma, en aras de lograr su separación del medio acuoso. Este elemento sugiere que para xantatos de cadenas carbonadas más largas se puedan lograr mejores resultados. Además, según de Donato *et al.* (1989) de acuerdo con el estudio comparativo de la cinética de descomposición entre el etilxantato y el amilxantato la cinética de hidrólisis en medios ácidos es más rápida para el etilxantato, lo cual limita su utilización si se considera que la descomposición del ión etílico ocurre en menor tiempo para dichas condiciones.

llevar a cabo el proceso de flotación con amilxantato de potasio, en la figura 1.b se muestra un esquema de la instalación.

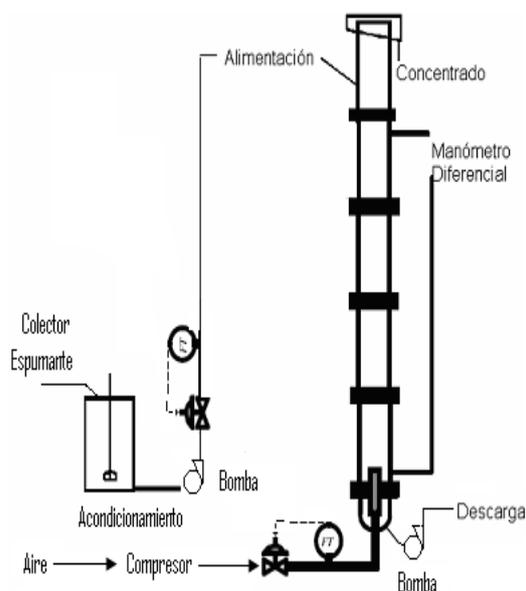


Figura 1. Esquema de la instalación de flotación

4.2. Metodología para la operación de la instalación

En un recipiente con agitación constante se prepara un volumen de solución no menor de 2-3 veces al de la columna y se ajusta el pH de trabajo. Se añade el

4.3. Análisis de la composición del AMD de Mina Grande y preparación de la solución sintética para la flotación

En la tabla 1 se relacionan los valores de concentración de los elementos que están presentes en el AMD de Mina Grande, las cuales tienen un pH igual a 4,5.

Tabla 1. Composición química del AMD de Mina Grande

Concentración de los iones, mg/L											
Zn	Ni	Fe	Mn	Mg	Pb	Al	Cd	Cu	Cr	Mo	V
3,9	0,05	0,06	26,	222,	0,20	7,4	0,05	62,	0,03	0,09	0,00
6	7	6	6	7	6	8	1	0	6	3	8

Como resultado del análisis comparativo de los valores de concentración de los elementos contenidos en dicho drenaje, con relación de los valores referenciados en la norma cubana 27 (NC-27, 1999) que regula el vertimiento de residuales a las aguas terrestres y al alcantarillado aunque sólo el cobre supera los valores máximos admisibles, en la preparación de las soluciones sintéticas se tuvieron en consideración además del cobre otros elementos como el cadmio, plomo,

colector en correspondencia con la relación colector: metal y se homogeneiza durante 10 minutos, posteriormente se agrega el espumante y se mezcla durante otros 10 minutos.

Se llena la columna de flotación y se fijan las variables operacionales: flujo de líquido y de gas que tributan a los valores de velocidad superficial del gas y del líquido. Se comienza a suministrar el flujo de aire por la parte inferior de la columna, de acuerdo con el principio a contracorriente, hasta lograr la estabilización de los flujos de gas y de líquido, la altura de la cama de espuma, y que no se manifiesten señales de turbulencia y recirculación de los flujos en el seno de la columna; en dicho intervalo de tiempo las corrientes de cola y concentrado se vierten en el recipiente de alimentación. Posteriormente se separan las corrientes y se toma la primera muestra de alimentación, colas y concentrado; simultáneamente se realiza la medición de la presión diferencial para determinar la fracción de gas retenida.

manganeso, aluminio cuyos valores se encuentran por encima de los valores estipulados en las normas cubanas 93-02 y 251 para agua potable y vertimiento de residuales a las aguas marinas respectivamente (NC-93-02, 1986; NC-251, 2007), se incluyen además el zinc que aunque no supera el valor establecido, excede la concentración máxima deseable y el hierro cuya concentración en los análisis químicos realizados no indican se encuentra fuera

del rango establecido pero debe tenerse en cuenta por las características de los minerales presentes en la región. Independientemente de la presencia de otras especies en el drenaje ácido de Mina Grande, desde el punto de vista cuantitativo los elementos seleccionados son los más representativos, el resto de las especies constituyen trazas.

La utilización de soluciones sintéticas sin considerar la totalidad de los componentes presentes en el AMD de Mina Grande no invalida la aplicación de los resultados obtenidos en el tratamiento del mismo, se sientan las bases para la implementación de la flotación con amilxantato de potasio si se considera que ha sido demostrado que la tendencia de los iones es a permanecer en solución (Palasantzas, 1997; Yu *et al.*, 2000; Markin y Volkov, 2002), estos no se adhieren a la interfase como resultado de las interacciones de tipo electrostáticas con el agua y otros iones, las cuales incrementan la tensión superficial (Manciu y Ruckenstein, 2003 ; Frediani *et al.*, 2004 ; Levin, 2005) por lo tanto no se afecta la flotación debido a la presencia de otros iones,. De acuerdo con Raatikainen (2008) en presencia de soluciones electrolíticas la tensión superficial, propiedad que incide de forma significativa en las características de la burbuja en el proceso de flotación, no disminuye, tiende a aumentar o se mantiene constante. Según Quinn *et al.* (2007) una alta concentración de sales en comparación con una pequeña concentración de espumante tiene un efecto similar sobre el comportamiento de las burbujas en el sistema de flotación.

4.4. Remoción de iones por flotación de soluciones sintéticas multicomponentes

Se desarrolla un diseño de experimentos del tipo factorial completo (3^3), con dos réplicas por ensayo donde las variables independientes son la concentración de espumante, la velocidad superficial del gas y la relación colector: metal, cuyos niveles se relacionan en la tabla 2. En el

De acuerdo con Harris (1982) pocos mg/L de espumantes son suficientes para retardar el fenómeno de coalescencia, lo cual aporta mayor estabilidad a la espuma, en correspondencia con la disminución de la tensión superficial, efecto que se logra cuando las concentraciones de sales son altas. El incremento en la concentración de sales inhiben la coalescencia de las burbujas (Marrucci y Nicodemo, 1967 ; Lessard y Zieminski, 1971 ; Craig *et al.*, 1993 ; Hofmeier *et al.*, 1995; Laskowski *et al.*, 2003; Craig, 2004) producto del aumento de la estabilidad de la película de solución que recubre las mismas (Lessard y Zieminski, 1971 ; Craig *et al.*, 1993 ; Zahradnik *et al.*, 1999) por lo que la presencia de sales en las aguas de Mina Grande aunque no se haya tenido en cuenta para preparar las soluciones sintéticas no deben afectar el proceso de flotación, sólo podrán interferir aquellos iones que sean capaces de formar complejos con el amilxantato que les aporte la hidrofobicidad necesaria para su colección.

En el caso de los metales alcalinos y alcalinotérreos, estos forman compuestos solubles por lo cual no deben interferir en el proceso, por lo que su separación con el reactivo amilxantato de potasio, mediante esta técnica presenta serias limitaciones; en tanto que los compuestos que se forman con los metales pesados son muy poco solubles (Razumov, 1981). De aquí que, la atención en el tratamiento por flotación con amilxantato se dirige a la remoción de los metales pesados presentes en el AMD de Mina Grande.

estudio se procesaron 90 L de solución por ensayo, con un pH igual a 4,5 unidades; en un tiempo de experimentación de una hora. El pH de trabajo y la concentración de los elementos en las soluciones sintéticas que se utilizan en la flotación se

corresponden con su valor en el AMD de Mina Grande.

Tabla 2. Niveles de estudio de las variables independientes

Niveles	Variables independientes		
	Concentración de espumante, mg/L	Velocidad superficial del gas, Jg, cm/s	Relación Colector: Me
Mínimo (-)	5	0,8	0,2:1
Básico	15	1	0,5:1
Máximo(+)	25	1,2	1:1

Para la selección de los niveles de la variable relación colector: metal se toma como referencia la relación estequiométrica, en su nivel mínimo sólo se tiene en cuenta el cobre como especie que se encuentra en mayor cuantía en el AMD, en el nivel máximo se tienen en cuenta todos los elementos y el el básico se toma un valor intermedio entre ambos. Estos niveles permiten evaluar la competitividad de los iones presentes en la solución por el colector.

Los niveles de la concentración de espumante se corresponden con el rango de consumo que se aplica en la flotación de minerales (Razumov, 1981), el valor mínimo de dicho rango se tomó como nivel mínimo en el diseño y como nivel básico el utilizado en el diseño anterior. La inclusión de esta variable en el diseño se relaciona con su influencia en las características de la dispersión, lo cual implica la necesidad de considerar la variable velocidad superficial del gas,

cuyos niveles se encuentran en el rango para el cual la zona de colección de la columna manifiesta un régimen laminar (Finch y Dobby, 1990; Chen *et al.*, 1994; Bennett *et al.*, 1999), de acuerdo con el proceso de caracterización de la columna que se realiza previamente.

Los resultados de las pruebas experimentales son sometidos a una limpieza de datos mediante los criterios de 2σ y la *t* de Student. Con ayuda del paquete Statgraphics Plus 5.0 se realiza un análisis estadístico y se obtienen los modelos matemático-estadísticos que caracterizan la remoción, por flotación iónica en columnas, de las diferentes especies presentes en las soluciones sintéticas. Este análisis contribuye a establecer las regularidades del proceso a partir de la identificación del grado de afectación de las variables en los resultados y las mejores condiciones para llevar a cabo la flotación.

4.5. Análisis de la remoción de iones de soluciones multicomponentes

En las pruebas de flotación de iones cobre con amilxantato de potasio a partir de soluciones sintéticas

multicomponentes se garantizó la similitud de concentración por especies con respecto de las aguas ácidas de Mina Grande, tabla 3.

Tabla 3. Rango de variación de concentración con respecto del AMD de Mina Grande

Elementos	Concentración de los iones, mg/L			
	Cu	Cd	Pb	Fe
Agua de Mina	62,0	0,051	0,206	0,066
Solución sintética	60,83 - 64,33	0,049 - 0,054	0,196 - 0,210	0,062 - 0,068
tcal	-2,04 a 2,04	-1,57 a 2,017	-1,967 a 1,68	1,929 a 1,852
	Zn	Mn	Al	
	4,0	26,6	7,48	
	3,979 - 4,094	25,59 - 27,03	7,446 - 7,532	
	-2,067 a 1,91	-2,07 a 2,07	-1,736 a 2,061	

De acuerdo con los valores de la *t* de student calculado para cada rango de variación de concentración por elemento en dichas soluciones y el *t* tabulada igual a 2,09 se demuestra que no hay diferencias significativas con respecto a la muestra patrón, AMD.

A continuación se relacionan los modelos obtenidos como resultado del procesamiento matemático-estadístico de los resultados experimentales de la remoción de cada uno de los elementos

presentes en la solución. En ellos se refleja la incidencia de variables relación colector: metal $R(C:Me)$, velocidad superficial del líquido J_g y la concentración de espumante $c(Esp)$, así como sus combinaciones en los resultados de la flotación, se excluyen las interacciones de las variables que de acuerdo con el control estadístico de los valores de los coeficientes según la *t* de Student y una probabilidad del 90 %, no son significativos.

$$\xi(Cu) = 80,74 + 12,59 \cdot R(C: Me) - 2,07 \cdot J_g + 1,54 \cdot c(Esp) \quad (1)$$

$$\xi(Pb) = 43,62 + 4,45 \cdot R(C: Me) - 2,15 \cdot J_g + 2,24 \cdot c(Esp) + 2,97 \cdot R(C: Me) \cdot c(Esp) \quad (2)$$

$$\xi(Cd) = 60,54 + 2,88 \cdot R(C: Me) - 3,53 \cdot J_g + 2,4 \cdot c(Esp) \quad (3)$$

$$\xi(Mn) = 27,97 + 4,27 \cdot R(C: Me) - 0,96 \cdot J_g + 1,00 \cdot c(Esp) + 0,88 \cdot R(C: Me) \cdot J_g + 1,37 \cdot R(C: Me) \cdot c(Esp) - 1,10 \cdot J_g \cdot c(Esp) - 1,55 \cdot R(C: Me) \cdot J_g \cdot c(Esp) \quad (4)$$

$$\xi(Zn) = 26,87 + 4,82 \cdot R(C: Me) - 1,10 \cdot J_g + 1,08 \cdot c(Esp) \quad (5)$$

$$\xi(Al) = 40,39 + 4,76 \cdot R(C: Me) - 2,01 \cdot J_g + 4,84 \cdot c(Esp) + 3,31 \cdot R(C: Me) \cdot c(Esp) + 1,89 \cdot J_g \cdot c(Esp) + 0,66 \cdot R(C: Me) \cdot J_g \cdot c(Esp) \quad (6)$$

$$\xi(Fe) = 58,05 + 5,21 \cdot R(C: Me) - 1,70 \cdot J_g + 1,60 \cdot c(Esp) - 4,37 \cdot R(C: Me) \cdot J_g - 2,59 \cdot J_g \cdot c(Esp) + 2,79 \cdot R(C: Me) \cdot J_g \cdot c(Esp) \quad (7)$$

Los modelos describen más del 80 % de los resultados experimentales, según los coeficientes de correlación que se obtienen en cada caso. En cuanto al grado de influencia de las variables estudiadas se destaca la relación colector: metal, el incremento de la concentración de amilxantato incide favorablemente en la remoción. El nivel

máximo de esta variable en el diseño se corresponde con la relación 1:1. De forma similar la concentración de espumante tiene un efecto positivo, lo cual indica que el incremento del agente surfactante reduce la tensión superficial y con ello el diámetro de la burbuja. En estas condiciones se incrementa el área superficial disponible para el

intercambio de masa y con ello la remoción.

Los resultados indican que el incremento de la variable velocidad superficial del gas incide de forma negativa en la colección, a consecuencia del aumento de la turbulencia del sistema que atenta contra la estabilidad del agregado especie hidrófoba-burbuja. Dada la magnitud del coeficiente en los modelos que corresponden a las soluciones multicomponentes se registra una ligera disminución de su valor, lo cual se asocia con el incremento de la concentración de espumante.

De acuerdo con los resultados experimentales de la flotación y el análisis de los modelos matemático-estadísticos las condiciones para las que se alcanzan los mejores resultados, valores máximos de remoción, son: relación colector: metal de 1:1, velocidad superficial del gas de 0,8 cm/s y concentración de espumante de 25 mg/L. En la tabla 3.5 se relacionan los resultados experimentales para dichas condiciones, a partir de los cuales se puede evaluar la calidad del tratamiento de las aguas.

Tabla 3.5. Resultados por elementos para las mejores condiciones de flotación

Elementos	Cu	Fe	Cd	Pb	Al	Mn	Zn
Conc inicial, mg/L	62,0	0,066	0,051	0,206	7,48	26,6	3,96
Remoción, %	94,68	72,71	67,18	58,29	54,29	38,5	36,92
Conc residual, mg/L	3,29	0,018	0,017	0,086	3,42	16,36	2,49
Relación de concentración	18,84	3,67	3,00	2,39	2,19	1,62	1,59
Norma 27-99	< 5,0		< 0,3	1,0	< 10,0		5,0

*concentración máxima deseable

La relación de concentración, determinada a partir de la relación entre su valor inicial y el residual en la solución tratada, indica que el grado de concentración de cobre es muy superior con respecto a los demás elementos presentes, lo cual está de acuerdo con la serie de flotabilidad propuesta por Chambers y Holliday (1975) para la flotación de los sulfuros de metales donde se plantea que flotarían mejor aquellos cuyos correspondientes complejos xantogenados son menos solubles, lo cual favorece la flotación de cobre.

De acuerdo con los valores de concentración residual por elementos para dichas condiciones experimentales se logra reducir la concentración de cobre por debajo del valor máximo admisible establecido por la NC 27 (NC-27, 1999), donde se regulan las especificaciones para el vertimiento de aguas residuales a las aguas terrestres y al alcantarillado. Si se comparan con los

valores de concentración máxima admisible según la norma cubana 93-02 (NC-93-02, 1986) y la norma de la organización mundial del salud (OMS, 1995) donde se estipulan los estándares de calidad para el agua potable, se aprecia que si bien sólo para el hierro y el zinc se encuentran por debajo de estos límites, en el caso del cadmio y plomo aunque no se alcanzan los niveles para el agua potable si cumplen con la NC 251 (NC-251, 2007) que regula las especificaciones para el vertimiento de aguas residuales a la zona costera y aguas marinas; en el caso del cobre aunque su valor está cercano al límite, 2 mg/L, el ajuste de variables operacionales que conducen a un incremento en el tiempo de contacto entre las fases durante la flotación pudiera garantizar el incremento de su remoción y así cumplir con lo establecido en la citada norma, independientemente de que cumple con la NC 27 (NC-27, 1999).

5. CONCLUSIONES

- ✓ Los resultados experimentales indican que la flotación iónica es una técnica factible para la remoción de cobre y otros metales presentes en la serie características del drenaje ácido de Mina Grande.
- ✓ Se establecen los niveles más adecuados de las variables para llevar a cabo la remoción de cobre; relación colector: metal de 1:1, velocidad superficial del líquido y del gas 0,8 cm/s y una concentración de espumante de 25 mg/L para pH igual a 4,5 unidades; se logra la remoción de cobre del 94 % y una concentración residual por debajo del límite establecido en la norma cubana 27(NC-27, 1999).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Barakat, M. A. (2010). "New trends in removing heavy metals from industrial wastewater." Arabian Journal of Chemistry: 1-17.

Bennett, M. A., S. P. Luke, *et al.* (1999). Analysis and flow regime Identification of bubble column dynamics. 1st World Congress on Industrial Process Tomography. Buxton, Greater Manchester.

Carissimi, E., J. Rubio, *et al.* (2007). "Flotation in water and wastewater treatment and reuse: Recent trends in Brazil." International Journal of Environmental and Pollution **30**,(2): 193-208.

Craig, V. S. J. (2004). "Bubble coalescence and specific-ion effects." Current Opinion in Colloid & Interface Science **9**: 178-184.

Craig, V. S. J., B. W. Ninham, *et al.* (1993). "The effect of electrolytes on bubble coalescence in water. ." Journal of Physical Chemistry **97** 10192-10197.

Chambers, C. y A. K. Holliday (1975). Modern inorganic chemistry. London, Butterworths.

Chen, R. C., J. Reese, *et al.* (1994). "Flow structure in a three-dimensional bubble column and three-phase fluidized bed." AIChE Journal **40**: 1093-1104.

de Donato, P., J. M. Cases, *et al.* (1989). "Stability of the amyloxanthate ion as a function of pH: modelling and comparison with the ethylxanthate ion." International Journal of Mineral Processing **25**: 1-16.

Eccles, H. (1999). "Treatment of metal-contaminated wastes: why select a biological process?" Trends Biotechnol **17**: 462-465.

Finch, J. A. y G. S. Dobby (1990). Column flotation. Oxford, Pergamon Press.

Frediani, L., B. Mennucci, *et al.* (2004). "Quantum-mechanical continuum solvation study of the polarizability of halides at the water/air interface " Journal of Physical Chemistry B **108**(36): 13796.

González, A., A. Marañón, *et al.* (2009). "Influencia del cierre de la Mina Grande en la calidad de las aguas del río Cobre de la provincia Santiago de Cuba." Revista Cubana de Química **XXI**(2): 37-44.

Harris, P. J. (1982). Frothing phenomena and frothers. Principles of Flotation. R. P. King. Sudafrica, African Institute of Mining and Metallurgy: 237-250.

Hofmeier, U., V. V. Yaminsky, *et al.* (1995). "Observations of solute effects on bubble formation " Journal of Colloid and Interface Science **174**: 199-210.

Holmstrom, H., U. J. Salmon, *et al.* (2001). "Geochemical investigations of sulfide-bearing tailings at Kristineberg, northern Sweden, a few years after remediation." Science Total Environ **273**: 111-133.

Ignatkina, V. A., V. Samygin, D., *et al.* (2009). "Influence of sulfhydryl collectors on formation of copper-ion-bearing precipitates in aqueous solutions." Journal of Mining Science **45**(1): 75-79.

- Iwasaki, I. y S. R. B. Cooke (1958). "The decomposition of xanthate in acid solution." Journal of the American Chemical Society **80**: 285-288.
- Kakovsky, I. (1957). 2nd International Conference on Surface Activity., Butterworths, London.
- Kurniawan, T. A., Y. S. Gilbert, *et al.* (2006). "Physico-chemical treatment techniques for wastewater laden with heavy metals." Chemical Engineering Journal **118**: 83-98.
- Laskowski, J. S., Y. S. Cho, *et al.* (2003). "Effect of frothers on bubble size and foam stability in potash ore flotation systems " Canadian Journal of Chemical Engineering **81**: 63-69.
- Lazaridis, N. K., K. A. Matis, *et al.* (1992). "Dissolved-air flotation of metal ions." Separation Science and Technology **27**(13): 743 - 1758.
- Lazaridis, N. K., E. N. Peleka, *et al.* (2004). "Copper removal from effluents by various separation techniques." Hydrometallurgy **74**: 149-156.
- Leja, J. (1982). Surface Chemistry of froth flotation. New York, Plenum.
- Lessard, R. D. y S. A. Zieminski (1971). "Bubble coalescence and gas transfer in aqueous electrolytic solutions " Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals **10** 260-289.
- Levin, Y. (2005). "Where do ions solvate? ." Pramana **64**(6): 957.
- Levy, D. B., K. H. Custis, *et al.* (1997). "A comparison of metal attenuation in mine residue and overburden material from an abandoned copper mine." Applied Geochemistry **12**: 203-211.
- Mahiroglu, A., E. Tarlan-Yel, *et al.* (2009). "Treatment of combined acid mine drainage (AMD)—Flotation circuit effluents from copper mine via Fenton's process." Journal of Hazardous Materials **166** 782-787.
- Manciu, M. y E. A. Ruckenstein (2003). "Specific ion effects via ion hydration: I. Surface tension." Colloid Interface Science **105**(1-3): 63.
- Marañón, A., N. Pérez, *et al.* (2009). " Evaluación del impacto ambiental producido por los residuales de la Mina Grande en el río Cobre." Revista Cubana de Química **XXI**(2): 59-65.
- Markin, V. S. y A. G. J. Volkov (2002). "Quantitative theory of surface tension and surface potential of aqueous solutions of electrolytes." Physical Chemistry B **106**(45): 11810.
- Marrucci, G. y L. Nicodemo (1967). "Coalescence of gas bubbles in aqueous solutions of inorganic electrolytes " Chemical Engineering Science **22**: 1257-1265.
- Matis, K. A. y P. Mavros (1991). "Recovery of metals by ion flotation from dilute aqueous solutions." Separation and Purification Methods **20**: 1- 48.
- NC-27 (1999). Vertimiento de aguas residuales a las aguas terrestres y al alcantarillado. Especificaciones, La Habana.
- NC-93-02 (1986). Agua potable. Requisitos sanitarios y muestreo La Habana.
- NC-251 (2007). Vertimiento de aguas residuales a la zona costera y aguas marinas. Especificaciones, La Habana.
- Nenov, V., N. K. Lazaridis, *et al.* (2008). "Metal recovery from a copper mine effluent by a hybrid process." Chemical Engineering and Processing **47**: 596-602.
- OMS (1995). Estándares de calidad de agua potable, Organización Mundial de Salud.
- Palasantzas, G. (1997). "Roughness effects on the electrostatic-image potential near a dielectric interface " Journal of Applied Physics **82** (1): 351.
- Pérez, N., A. Marañón, *et al.* (2002). "Contaminación de las aguas del río Cobre en la zona de la mina grande del Cobre." Revista Cubana de Química **XIV**(2): 24-33.
- Quinn, J. J., W. Kracht, *et al.* (2007). "Comparing the effect of salts and frother (MIBC) on gas dispersion and

- froth properties." Minerals Engineering(20): 1296-1302.
- Raatikainen, T., A. Laaksonen, *et al.* (2008). "Surface tensions of multicomponent aqueous electrolyte solutions: predictive models based on binary limits." Journal of Physical Chemistry C **112**: 10428-10434.
- Rao, S. R. (1971). Xanthates and related compounds. New York, Marcell Dekker.
- Razumov, K. A., Ed. (1981). Enriquecimiento de minerales por flotación. Moscú, Edit Vneshtorgizdat.
- Rey, A. (2010). Caracterización de las interacciones del reactivo colector amilxantato de potasio con iones metálicos Departamento de Metalurgia. Moa, Instituto Superior Minero Metalúrgico. **Ingeniero**.
- Romero, F. M., R. Prol-Ledesma, *et al.* (2010). "Acid drainage at the inactive Santa Lucia mine, western Cuba: Natural attenuation of arsenic, barium and lead, and geochemical behavior of rare earth elements." Applied Geochemistry **25**: 716-727.
- Sánchez, J., E. López, *et al.* (2005). "Acid mine drainage in the Iberian Pyrite Belt (Odiel river watershed, Huelva, SW Spain): geochemistry, mineralogy and environmental implications." Applied Geochemistry **20**: 1320-1356.
- Sebba, F. (1959). "Concentration by ion flotation." Nature **184**: 1062- 1063.
- Silva, R. y J. Rubio (2009). "Treatment of acid mine drainage (AMD) from coal mines in south Brazil." International Journal of Coal Preparation and Utilization **29**: 192-202.
- Silveira, A. N., R. Silva, *et al.* (2009). "Treatment of acid mine drainage (AMD) in South Brazil. Comparative active process and water reuse." International Journal of Mineral Processing **93**: 103 - 109.
- Stalidis, G. A., K. A. Matis, *et al.* (1989). "Selective separation of Cu, Zn, and As from solution by flotation techniques." Separation Science and Technology **24**(1): 97 - 109.
- Sun, Z. y W. Forsling (1997). "The degradation kinetics of ethyl-xanthate as a function of pH in aqueous solution." Minerals Engineering **10**(4): 389-400.
- Tipman, R. N. y J. Leja (1975). "Reactivity of xanthate and dixanthogen in aqueous solution of different pH." Colloid and Polymer Science **253**: 4- 10.
- www.ecoamerica.cl/mayo. (2007). "Medio ambiente. Drenaje ácido de mina."
- www.ecured.cu. (2011). "Mina de El cobre."
- Yu, K. W., H. Sun, *et al.* (2000). "Image potential near corrugated interfaces." Physica B : Condensed Matter **279** (1-3): 78.
- Zahradnik, J., M. Fialová , *et al.* (1999). "The effect of surface additives on bubble coalescence in aqueous media." Chemical Engineering Science **54**: 4757-4766.