

Caracterización mineralógica de concentrado bulk para reducir arsénico y antimonio mediante lixiviación alcalina en Perú

Mineralogical characterization of bulk concentrate to reduce arsenic and antimony by alkaline leaching, in Peru

Julio Ramos Peralta^{1,a}, Vidal Aramburú^{1,b}, Jorge Ortiz Barreto^{1,c}, Wendy Choque Perez^{1,d}

Recibido: 30/04/2023 - Aprobado: 08/06/2023 – Publicado: 06/10/2023

RESUMEN

La presencia de contaminantes como el arsénico y el antimonio en los concentrados polimetálicos puede generar pérdidas económicas, debido a las penalidades impuestas en los contratos de comercialización cuando se superan los límites permitidos. Por esta razón, el presente trabajo se enfoca en respaldar la reducción de estos contaminantes a través de la aplicación de lixiviación alcalina con NaOH y Na₂S en los concentrados polimetálicos. Los ensayos de microscopía óptica indicaron la presencia de especies con alto contenido de arsénico y antimonio conocidos como cobres grises y sulfosales de plata. En base a la caracterización mineralógica se logró solubilizar 93.79% de arsénico y 96.21% de antimonio, en un tiempo de cuatro horas, a la temperatura de 100°C, con una dosificación de 48 kg/TM de hidróxido de sodio y 13 kg/TM de sulfuro de sodio, a una granulometría de 10% - 37 μ . Con los resultados obtenidos se logró reducir la ley de arsénico a 0.45% y la ley de antimonio a 0.24%, y aumentar la ley de cobre a 23.60% en el concentrado bulk, logrando aumentar la rentabilidad por la venta de concentrados libres de contaminantes.

Palabras claves: Arsénico, antimonio, caracterización, cobres grises, concentrado bulk, lixiviación alcalina.

ABSTRACT

The presence of contaminants such as arsenic and antimony in polymetallic concentrates can lead to economic losses due to penalties imposed in commercialization contracts when the permissible limits are exceeded. For this reason, the present study focuses on supporting the reduction of these contaminants through the application of alkaline leaching using NaOH and Na₂S in polymetallic concentrates. Optical microscopy tests indicated the presence of species with a high content of arsenic and antimony known as gray coppers and silver sulfosalts. Based on the mineralogical characterization, it was possible to solubilize 93.79% of arsenic and 96.21% of antimony, in a time of four hours, at a temperature of 100°C, with a dosage of 48 kg/TM of sodium hydroxide and 13 kg/TM of sodium sulfide, at a granulometry of 10% - 37 μ . It was achieved to reduce the arsenic grade to 0.45% and the antimony grade to 0.24% and increase the copper grade to 23.60% in the bulk concentrate, increasing profitability for the sale of contaminant-free concentrates.

Keywords: Arsenic, antimony, characterization, gray coppers, bulk concentrate, alkaline leaching.

1 Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Lima, Perú

a Ingeniero. Autor para correspondencia: ramosperaltajulio@icloud.com - ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9524-5419>

b Docente. E-mail: varamburu@unmsm.edu.pe - ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7411-3866>

c Ingeniero. E-mail: jorgealberto.ortiz@unmsm.edu.pe - ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5217-4510>

d Ingeniera. E-mail: wendy.choque@unmsm.edu.pe - ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8463-5921>

I. INTRODUCCIÓN

Gran parte de los yacimientos de sulfuros metálicos que se encuentran en la actualidad son complejos mineralógicos debido a que se encuentran asociados a elementos como el arsénico, antimonio, bismuto, mercurio, entre otros, los cuales son considerados contaminantes debido a que pueden generar serios problemas ambientales y de procesamiento (Curreli, Ghiani, Surracco, & Orrù, 2005; Lattanzi, Da Pelo, Musu, & Atzei, 2008; Filippou, St-Germain, & Grammatikopoulos, 2007). Minerales como la tetraedrita ($\text{Cu}_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$) y tennantita ($\text{Cu}_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$), son económicamente atractivos, sin embargo, la presencia de arsénico y antimonio ocasiona una reducción significativa en su valor, lo cual obliga a las empresas a penalizar la compra de concentrados que sobrepasen los límites permisibles de contaminantes, debido a las estrictas leyes ambientales (Awe & Sandström, 2010; Long, Peng, & Bradshaw, 2012).

Las tecnologías desarrolladas para eliminar arsénico y antimonio describen procesos pirometalúrgicos e hidrometalúrgicos. El primero presenta la desventaja de generar gases tóxicos a base de azufre los cuales deben ser necesariamente captados y convertidos en ácido sulfúrico, además de los compuestos arsenicales como el trióxido de arsénico (As_2O_3), pentóxido de arsénico (As_2O_5), arseniato de antimonio, entre otros que se forman durante la fusión de los concentrados, los cuales tienen un impacto negativo, perjudicando notoriamente a la biósfera y generando interferencias en los procesos de refinación. Por lo descrito anteriormente es que los procesos hidrometalúrgicos se presentan como una alternativa de tratamiento de concentrados, las cuales minimizan notoriamente la emisión de contaminantes con una aceptable eficiencia del método empleado (Azañero, y otros, 2004; Lovera, 1999; Zhao, Zhao, Tatiana, & Vainshtein, 2021).

Para evaluar eficientemente el proceso de disolución de las especies contaminantes es necesario conocer la caracterización mineralógica de las especies involucradas, su distribución, y posibilidades de liberación de los enlaces que se encuentren formando, la cual nos permite predecir el comportamiento de las especies frente a un determinado proceso (Tungpalan, Wightman, Keeney, & Manlapig, 2021; Espinoza, y otros, 2021).

Un estudio realizado para investigar la erradicación de arsénico y antimonio en concentrados de sulfuros complejos ricos en cobres grises tipo tetraedrita, logró disminuir los contaminantes e incrementar la calidad del concentrado mediante un proceso de lixiviación con NaOH y Na_2S , concluyendo así que los parámetros más influyentes para la reducción de aquellos elementos fueron la concentración de iones sulfuro, la temperatura de reacción y el tiempo de lixiviación (Awe & Sandström, 2010). Otro trabajo de investigación enfocado en la eliminación de arsénico de concentrados cupríferos mediante lixiviación, demostró que fue posible la disolución de impurezas de las muestras con contenido de enargita en un medio alcalino con reactivos NaSH Y NaOH, consiguiendo así disminuir la cantidad de arsénico a valores por debajo de 0.5% en peso. Las condiciones de trabajo usadas fueron la temperatura de reacción (80°C), presión atmosférica (condiciones

normales), ORP (máximo de 500 mV), pH (>12.5), densidad de pulpa (100 a 1000 g/L), tiempo de lixiviación (10 minutos a 10 horas) y adición de NaSH Y NaOH (50 a 200 g/L cada uno) (Tongamp, Takasaki, & Shibayama, 2009).

En tal contexto, la búsqueda de métodos de producción de concentrados con mínimas cantidades de arsénico y antimonio se ha convertido en una gran necesidad y un total desafío para la industria metalúrgica. Por ello, el presente artículo evalúa la reducción de estos contaminantes mediante la caracterización geometalúrgica para la lixiviación alcalina de concentrados bulk.

II. MÉTODOS

2.1. Tipo de investigación

La metodología de la presente investigación es de tipo cuantitativa, dado que es objetiva, deductiva, que parte de teorías y formulaciones existentes; realiza una comprobación de los resultados obtenidos mediante balances metalúrgicos. Asimismo, presenta un enfoque cualitativo, porque estudia el entorno de la variabilidad mineralógica del yacimiento.

2.2. Diseño de la investigación

Es de tipo experimental porque identificó y cuantificó la influencia de la caracterización y la lixiviación alcalina para reducir el grado de arsénico y antimonio en el concentrado bulk, tal y como se representa en la Figura 1.

2.3. Unidad de análisis y población de estudio

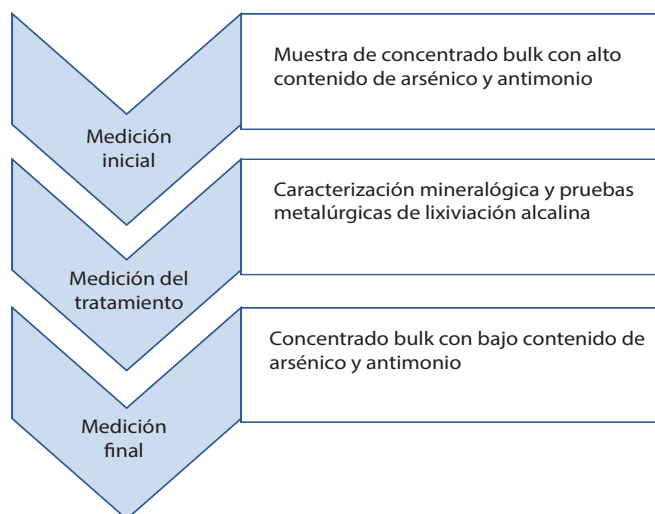
La presente investigación se llevó a cabo en la planta de recuperación de sulfuros de los relaves de separación magnética proveniente de las operaciones de gravimetría en Pasto Bueno, ubicada en la provincia de Pallasca, distrito de Pampas, departamento de Ancash, lugar donde se recopiló la información necesaria de la problemática, los antecedentes, y la muestra de concentrado bulk necesaria para el desarrollo de las pruebas geometalúrgicas.

2.4. Procedimiento metodológico de la investigación

- Análisis de la problemática y base de datos.
- Muestreo y preparación del concentrado bulk en la unidad minera Pasto Bueno.
- Análisis granulométrico del concentrado bulk.
- Caracterización mineralógica del concentrado.
- Ensayos químicos del mineral de cabeza.
- Pruebas de lixiviación alcalina para evaluar la temperatura de trabajo.
- Pruebas de lixiviación alcalina evaluando la concentración del agente lixivante y el tiempo de lixiviación.
- Pruebas de lixiviación alcalina variando la granulometría del concentrado.
- Discusión de los resultados obtenidos y conclusiones.

Figura 1

Diseño de la investigación para reducir el contenido de arsénico y antimonio en el concentrado bulk



Nota: Las mediciones representan las etapas que se desarrollaron en la investigación

III. RESULTADOS

3.1 Análisis granulométrico del concentrado bulk

Se realizaron pruebas metalúrgicas de distribución granulométrica del concentrado bulk para determinar la cantidad de partículas retenidas sobre los tamices N°100, 200, 325 y 400. La distribución de las partículas del concentrado bulk se denotan en la Tabla 1, la cual determinó un K80 de 82.48 μ m, tal como se ilustra en la Figura 2.

3.2 Análisis mineralógico del concentrado bulk

En función a la distribución de las partículas, se determinó que las principales especies que aportan contaminantes en el concentrado bulk son los cobres grises y las sulfosales de plata, las cuales presentan una distribución volumétrica de 38.23% y 38.71%, y un grado de liberación de 97.71% y 99.54%, para los tamices (-74 μ + 37 μ) y (-37 μ), respectivamente. Asimismo, se observó que las sulfosales de plata presentan una distribución de 2.90% y 2.93%, y un grado de liberación de 97.67% y 97.62%, respectivamente para los tamaños anteriormente descritos, tal y como se denota en la Tabla 2. Se determinó que los cobres grises que no se encuentran libres, están asociados a las gangas, calcopirita, plata nativa, sulfosales de plata, esfalerita y galena, tal y como se muestran en las Tablas 3 y 4, para distintas granulometrías. Las principales micrografías referidas a los cobres grises se representan en las Figuras 3 y 4.

3.3 Análisis químico del concentrado polimetálico

Los ensayos químicos del bulk para los principales elementos se muestran en la tabla 5.

3.4 Pruebas metalúrgicas de lixiviación alcalina para evaluar la temperatura del proceso

En base a la caracterización de la muestra y los antecedentes de investigación, se determinó la temperatura de trabajo para el desarrollo del total de las pruebas, por lo que se

evaluó el proceso de lixiviación alcalina con 16.5 kg/TM de NaOH y 58.90 kg/TM de Na₂S, en una relación líquido/sólido de 2/1, a temperatura ambiente (25°C), 50°C, 75°C y 100°C en un tiempo de 120 minutos.

Las pruebas de lixiviación alcalina determinaron que a la temperatura de 100°C, se obtuvieron los mejores resultados de solubilidad de arsénico y antimonio. Los resultados de las pruebas metalúrgicas de evaluación de temperatura se detallan en la Tabla 6 y se grafican en las Figuras 5 y 6.

3.5 Pruebas de lixiviación alcalina variando la concentración del agente lixivante y el tiempo del proceso

Con la temperatura adecuada para la lixiviación alcalina, se evaluó la concentración de los reactivos NaOH y Na₂S para 2, 4, 6 y 8 horas de proceso, a una relación líquido/sólido de 2/1.

Las pruebas de lixiviación alcalina determinaron la mejor performance de disolución de contaminantes en un tiempo de 4 horas para una concentración de 48 kg/TM de NaOH y 13 kg/TM de Na₂S, llegando a solubilizar 80.37% de arsénico y 78.18% de antimonio, tal y como se muestra en la tabla 7. La cinética de lixiviación de los contaminantes se representa en las figuras 7 y 8.

3.6 Pruebas de lixiviación alcalina variando la granulometría del concentrado

Las pruebas de lixiviación en función de la granulometría determinaron los mejores resultados para una granulometría de 10% -37 μ , llegando a solubilizar 93.79% de arsénico y 96.21% de antimonio, a las mejores condiciones de temperatura, tiempo y concentración de reactivos. Así también la ley de cobre en el concentrado aumentó en 0.75% y los resultados de las pruebas metalúrgicas se representan en la Tabla 8 y se ilustran en las Figuras 9 y 10.

Tabla 1

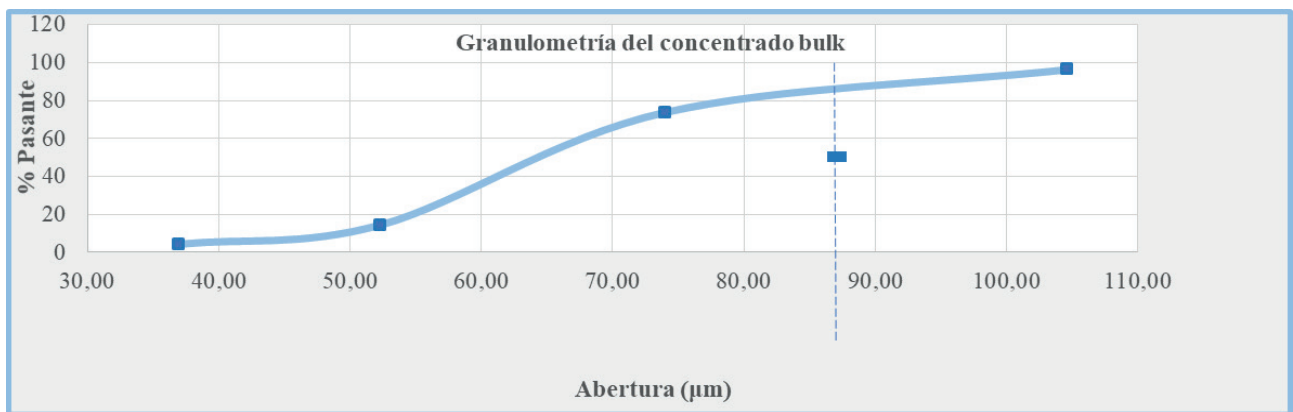
Análisis granulométrico del concentrado bulk

Malla	Abertura (µm)	Peso Ret. (g)	% Retenido	%Retenido acumulado	% Pasante
100	104.65	11.10	3.7	3.7	96.3
200	74.00	67.59	22.53	26.23	73.77
325	52.33	177.99	59.33	85.56	14.44
400	37.00	30.45	10.15	95.71	4.29
-400	18.50	12.87	4.29	100.00	0.00
Total		300.00	100.00		

Nota: Abertura de las mallas en micrómetros (µm), según la serie Tyler

Figura 2

Curva de distribución de las partículas



Nota: El 80% de las partículas son menores en tamaño a 82.48 µm

Tabla 2

Distribución volumétrica y grados de liberación por tamaño de partícula

MINERALES	Abreviatura	VOLUMEN (%) [-74 µ, + 37 µ >	GRADO DE LIBERACIÓN (%)	
			-37µ	[-74 µ, + 37 µ >
Gangas	GGS	5.38	5.64	89.66
Plata nativa	Ag	0.00	0.00	0.00
Pirita	Py	3.59	3.64	96.30
Calcopirita	Cp	2.55	2.57	88.10
Arsenopirita	Apy	2.07	2.07	93.75
Esfalerita	Ef	20.15	20.79	98.32
Galena	Gn	19.88	20.50	97.30
Pirrotita	Po	0.90	0.93	86.67
Cobres grises	CGRs	38.23	38.71	97.71
Sulfosales de plata	SFsAg	2.90	2.93	97.67
Wolframitas	Wf	0.90	0.93	92.86
Molibdenita	Mb	0.00	0.00	0.00
Bornita	Bn	0.07	0.07	50.00
Covelita	Cv	0.07	0.07	66.67
TOTAL	96.69	98.85		

Tabla 3*Tipos geométricos de entrelazamientos de los minerales y sus posibilidades de liberación completa en la malla [-74 μ + 37 μ >*

Tipos de enlace a un tamaño de partícula: [-74 μ , + 37 μ >				
Minerales entrelazados	Tipo entr.	Num part.	Dist. Porc.	Posibilidades de liberación completa
Partículas libres		1401	96.69	
GGs-cp-Ag-CGRs-SFsAg	2bl	1	0.14	Muy difícil
	1eIII	4	0.09	Muy difícil a imposible
	2all	3	0.32	Muy difícil a imposible
py-po-apy-cp-mb-gn-ef-GGs	4bIII	2	0.28	Moderadamente difícil
	4all	4	0.16	Muy difícil
	3bl	6	0.39	Imposible
gn-ef-CGRs-GGs	4bl	3	0.25	Moderadamente difícil
	2bIV	4	0.20	Muy difícil
gn-GGs-cp-CGRs	1el	5	0.38	Muy difícil a imposible
	4all	1	0.12	Muy difícil
	3cII	3	0.06	Imposible
cp-mb-cv-bn-py-po-apy-GGs	2dl	2	0.23	Muy difícil a imposible
	3bII	3	0.21	Imposible
	2bl	2	0.22	Muy difícil
GGs-Wf-Ag	3bl	3	0.12	Imposible
	1eIV	2	0.14	Muy difícil a imposible
TOTAL		1449	100.00	

Nota: El tamaño de partícula [-74 μ , + 37 μ > equivale a una granulometría de 100% [-200 malla, +400 malla>

Tabla 4*Tipos geométricos de entrelazamientos de los minerales y sus posibilidades de liberación completa en la malla - 37 μ*

Tipos de enlace a un tamaño de partícula: -37 μ				
Minerales entrelazados	Tipo entr.	Num part.	Dist. Porc.	Posibilidades de liberación completa
Partículas libres		1384	98.85	
cp-Ag-CGRs-SFsAg	2cIII	1	0.16	Muy difícil a imposible
	1cII	2	0.05	Imposible
py-po-apy-cp-mb-gn-ef-GGs	2aIV	1	0.13	Muy difícil a imposible
	2dl	2	0.14	Muy difícil a imposible
	4al	1	0.02	Muy difícil
gn-ef-CGRs	4bII	1	0.06	Moderadamente difícil
	4bII	1	0.08	Moderadamente difícil
gn-GGs-cp-CGRs	2bIII	1	0.07	Muy difícil
	1dIV	1	0.07	Imposible
cp-mb-cv-bn-py-po-apy-GGs	2bl	2	0.18	Muy difícil
	3cII	2	0.11	Imposible
GGs-Wf-Ag	4bII	1	0.08	Moderadamente difícil
TOTAL		1400	100.00	

Nota: El tamaño de partícula -37 μ representa un 100% - 400 malla

Tabla 5*Ensayos químicos del concentrado bulk*

Cu (%)	Ag oz/TC	Au oz/TC	As %	Sb %	Bi %	Pb %	Zn %
22.85 %	74.3	0.006	7.25 %	6.33 %	0.57 %	20.78 %	10.50 %

Nota: Las leyes se representan en términos porcentuales (Cu, As, Sb, Bi, Pb, Zn) y onzas por tonelada corta (Ag y Au)

Figura 3

Microfotografía de cobres grises (CGRs) reemplazando a la esfalerita (ef) y pirita (py)

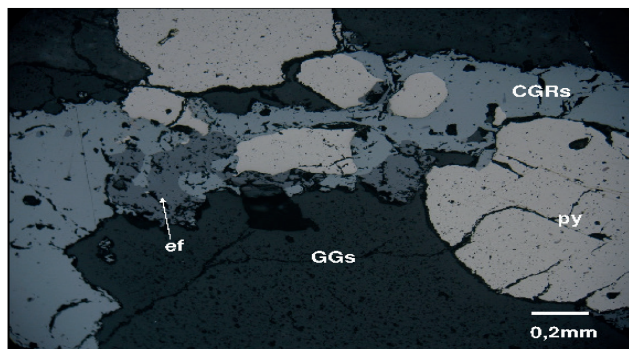
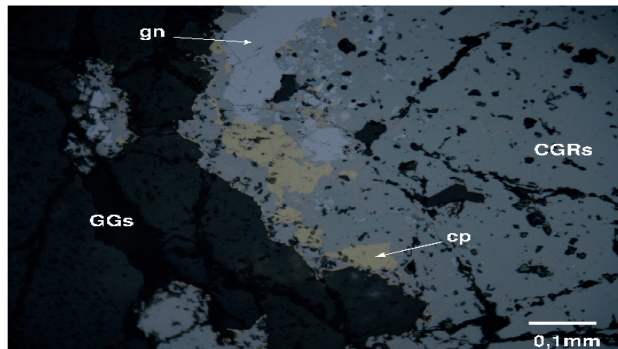


Figura 4

Microfotografía de cobres grises (CGRs) reemplazando a la galena (gn) y calcopirita (cp)



Nota: Los cobres grises representan a los minerales con alto contenido de arsénico y antimonio

Tabla 6

Resultados de la lixiviación alcalina en función de la temperatura

Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Leyes del concentrado bulk (%)		Extracción (%)	
		As	Sb	As	Sb
30	25	6.94	6.04	4.29	4.55
	50	6.43	5.66	11.34	10.60
	75	5.34	4.54	26.33	28.31
	100	4.39	3.86	39.44	38.96
60	25	6.54	5.73	9.79	9.45
	50	5.83	5.06	19.58	20.13
	75	4.37	3.81	39.77	39.88
	100	3.13	2.87	56.85	54.67
90	25	6.04	5.25	16.64	17.10
	50	5.21	4.57	28.11	27.86
	75	3.72	3.29	48.68	47.96
	100	2.52	2.30	65.22	63.61
120	25	5.89	5.22	18.70	17.48
	50	5.11	4.52	29.52	28.59
	75	3.63	3.24	49.93	48.81
	100	2.37	1.93	67.31	69.52

Nota: La extracción porcentual representa la cantidad de metal solubilizado para arsénico y antimonio en el tiempo

Figura 5

Cinética de lixiviación de arsénico en función de la temperatura

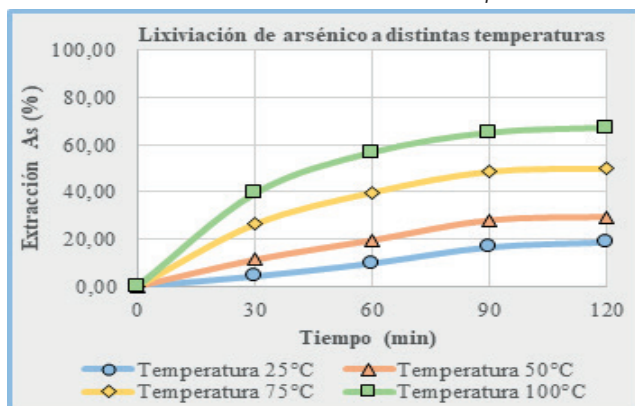
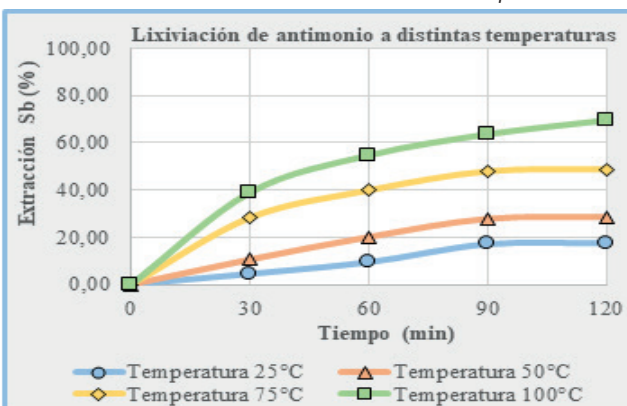


Figura 6

Cinética de lixiviación de antimonio en función de la temperatura



Nota: Las gráficas representan las distintas velocidades de solubilidad de los contaminantes en el concentrado bulk

Tabla 7
Resultados de evaluación de concentración de reactivos y tiempo de lixiviación

Tiempo (Horas)	NaOH: 16.5 kg/TM; Na ₂ S: 13 kg/TM				NaOH: 48 kg/TM; Na ₂ S: 13 kg/TM				NaOH: 16.5 kg/TM; Na ₂ S: 58.9 kg/TM				NaOH: 48 kg/TM; Na ₂ S: 58.9 kg/TM			
	Ley		Extracción		Ley		Extracción		Ley		Extracción		Ley		Extracción	
	%As	%Sb	%As	%Sb	%As	%Sb	%As	%Sb	%As	%Sb	%As	%Sb	%As	%Sb	%As	%Sb
0	7.25	6.33	0.00	0.00	7.25	6.33	0.00	0.00	7.25	6.33	0.00	0.00	7.25	6.33	0.00	0.00
2	4.35	5.11	40.00	19.27	2.67	2.12	63.13	66.52	3.80	4.21	47.59	33.49	6.23	5.83	14.07	7.90
4	3.02	3.93	58.34	37.91	1.42	1.38	80.37	78.18	2.43	2.64	66.48	58.29	5.09	4.91	29.79	22.43
6	3.51	3.32	51.59	47.55	1.64	1.15	77.41	81.82	3.05	2.02	57.93	68.09	5.11	4.09	29.52	35.39
8	5.78	2.28	20.28	63.98	5.00	0.79	31.01	87.52	5.43	1.65	25.10	73.93	6.18	3.41	14.76	46.13

Nota: La dosificación de reactivos se especifica en términos de kilogramos por tonelada métrica (kg/TM).

Figura 7
Cinética de lixiviación de arsénico en función de la concentración de reactivos

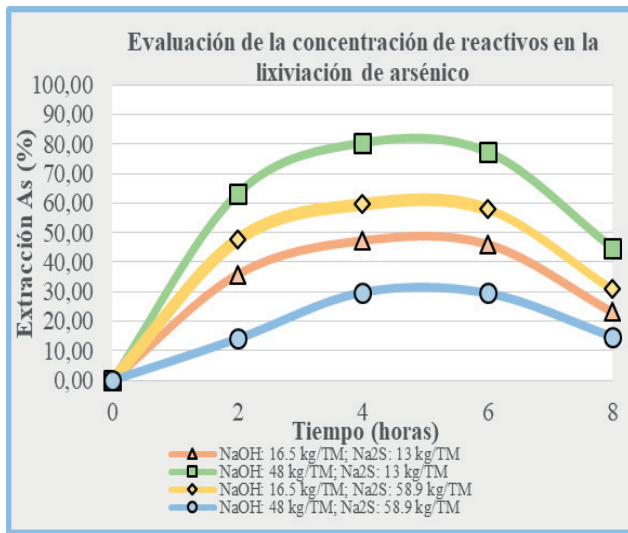
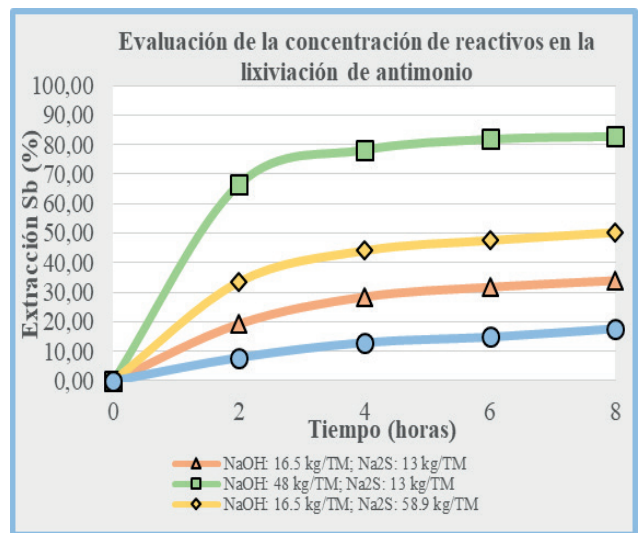


Figura 8
Cinética de lixiviación de antimonio en función de la concentración de reactivos



Nota: Las gráficas comparativas representan las distintas velocidades de lixiviación de arsénico y antimonio para distintas concentraciones de los reactivos lixiviantes

Figura 9
Cinética de eliminación de arsénico en función de la granulometría

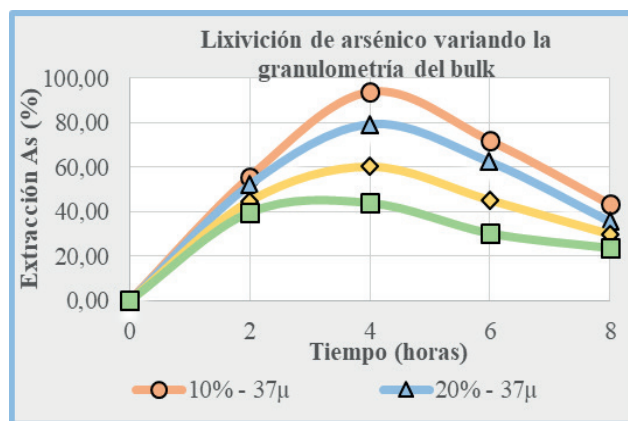
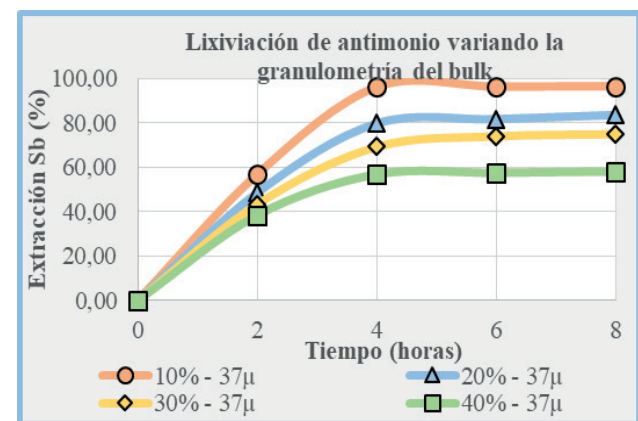


Figura 10
Cinética de eliminación de antimonio en función de la granulometría



Nota: Las gráficas comparativas representan las velocidades de solubilidad de arsénico y antimonio para porcentajes de tamaño menores a la malla 400

Tabla 8

Resultados de la lixiviación alcalina en función de la granulometría del bulk

Tiempo (horas)	Granulometría	Ley			Extracción	
		%Cu	%As	%Sb	%As	%Sb
2	10% - 37 μ	22.91	3.22	2.73	55.59	56.87
	20% - 37 μ	22.89	3.47	3.26	52.14	48.50
	30% - 37 μ	22.86	4.01	3.59	44.69	43.29
	40% - 37 μ	22.85	4.38	3.90	39.59	38.39
4	10% - 37 μ	23.60	0.45	0.24	93.79	96.21
	20% - 37 μ	22.92	1.51	1.28	79.17	79.78
	30% - 37 μ	22.87	2.89	1.95	60.14	69.19
	40% - 37 μ	22.85	4.07	2.73	43.86	56.87
6	10% - 37 μ	23.26	2.04	0.23	71.86	96.37
	20% - 37 μ	22.95	2.73	1.16	62.34	81.67
	30% - 37 μ	22.88	3.98	1.65	45.10	73.93
	40% - 37 μ	22.88	5.06	2.69	30.21	57.50
8	10% - 37 μ	23.05	4.11	0.22	43.31	96.52
	20% - 37 μ	22.99	4.67	1.04	35.59	83.57
	30% - 37 μ	22.93	5.09	1.59	29.79	74.88
	40% - 37 μ	22.90	5.54	2.65	23.59	58.14

Nota: La granulometría representa el porcentaje de mineral que pasa la malla 400.

IV. DISCUSIÓN

En el trabajo de investigación realizado por (Ruiz, Bello, & Padilla, 2013), lograron solubilizar 94% de arsénico en un concentrado de cobre tipo enargita con 2.5% de este contaminante, a 85°C de temperatura y en un tiempo de 10 minutos de lixiviación alcalina con hidróxido y sulfuro, de sodio, para lo cual dosificó 2.5 veces más de sulfuro de sodio que el requerido estequiométricamente, demostrando que este último reactivo es determinante para la remoción del contaminante, de tal manera que empleó un exceso de este. Si bien es cierto que la investigación mencionada tiene como objetivo la remoción de arsénico desde un concentrado de cobre arsenical, difiere de nuestro trabajo, dado que el comportamiento de las especies mineralógicas a las variables de temperatura, concentración de reactivos y tiempo de lixiviación son distintas. La diferencia más notoria es la cinética violenta de la enargita para remover arsénico en un tiempo bastante corto. Por otro lado, con respecto a la concentración de reactivos, los autores emplearon mayor cantidad de sulfuro de sodio, mientras que el presente trabajo se rigió bajo los principios estequiométricos y decidió usar mayor concentración de hidróxido de sodio. Con respecto a la remoción de arsénico, al igual que el presente trabajo, lograron remover más del 90% del arsénico en el concentrado. El autor anteriormente descrito sólo presentó una caracterización química más no mineralógica.

Un trabajo de similares condiciones es el realizado por (Azañero & Gutiérrez, 2016), logró remover 97.93% de arsénico en un concentrado de cobre tipo enargita con 5.8% de contaminante y 21.5% de cobre, mediante la lixiviación alcalina con hidróxido y sulfuro, de sodio. Los resultados descritos anteriormente los obtuvo a 86% - 37 μ , una

relación molar de hidróxido/sulfuro de 3.5/1, a 90°C y en un tiempo de 4 horas. La diferencia que presenta en relación con la presente investigación es con respecto al tamaño de partícula, la cual sostiene que, para los concentrados de cobre tipo enargita, las granulometrías muy finas son favorables para la remoción de arsénico. Asimismo, el autor evidenció que el cobre también reaccionó en el proceso de lixiviación, logrando disminuir 0.13% de su ley inicial. El autor presentó solo una caracterización química.

(Awe y Sandström, 2010) investigaron la eliminación de arsénico y antimonio de un concentrado sulfuro complejo, rico en cobres grises de la zona de Casapalca, cuya ley de antimonio varió entre los 5.43 y 5.78% de antimonio, y entre 1.77% a 1.87% de arsénico. La caracterización de la muestra se realizó mediante análisis Qemscan e identificaron las especies de cobre como tetraedrita con una distribución volumétrica del 30.2% y calcopirita con 13.4%, además identificaron que la galena ocupa un 19% del volumen de la muestra y la esfalerita un 20.6%. Evaluaron la remoción del arsénico y antimonio a las temperaturas de 84°C, 91°C, 98°C y 105°C, llegando a extraer 57% de antimonio y 60% de arsénico a esta última. Sostuvieron que a más de 6 horas era posible llegar a extraer la mayor cantidad de estos contaminantes, difiriendo con los resultados obtenidos en el presente artículo, ya que se demostró la reacción reversible del arsénico luego de 4 horas de lixiviación alcalina. Las evaluaciones de la concentración de los reactivos resultaron eficientes para una concentración de 1.89 M de sulfuro de sodio y 1.5 M de hidróxido de sodio, logrando solubilizar 87% de antimonio y 92% de arsénico. Asimismo, la evaluación de la lixiviación de arsénico y antimonio resultaron más eficientes a granulometrías más finas, presentando también resultados diferentes en cuanto a esta variable.

V. CONCLUSIONES

- La caracterización mineralógica del concentrado bulk fue realizado en un microscopio óptico de luz reflejada, e identificó las especies generales de cobres grises ocupando una distribución de 38.23% para una granulometría de $[-74 \mu, + 37 \mu >$ y de 38.71% para un tamaño de -37μ , además de otras especies arsenicales como las sulfosales de plata. Así también se identificaron especies de cobre como calcopirita, bornita y covelita, especies de plomo como galena, especies de zinc como esfalerita, y plata nativa, entre las principales especies observadas de valor comercial.
- Se determinó que para una temperatura de lixiviación alcalina de 100°C con una dosificación de hidróxido de sodio de 16.5 kg/TM, y 58.90 kg/TM de sulfuro de sodio, se logró disolver 67.31% de arsénico y 69.52% de antimonio, presentándose como la prueba más representativa con respecto a las pruebas realizadas a 25°C, 50°C y 75°C.
- Las pruebas metalúrgicas de lixiviación alcalina para evaluar el tiempo y la concentración de hidróxido de sodio y sulfuro de sodio fueron las mejores para 48 kg/TM y 13 kg/TM de los reactivos antes mencionados, para un tiempo de 4 horas de lixiviación, alcanzando a solubilizar 80.37% de arsénico y 78.18% de antimonio. Se puede observar en las figuras 7 y 8, que después de las 4 horas de proceso, la solubilidad del arsénico decrece, posiblemente por una reacción reversible de este contaminante después de este periodo, mientras que la cinética de lixiviación de antimonio se vuelve casi constante.
- Para una granulometría de 10% menos 37μ de un concentrado con alto contenido de cobres grises en el proceso de lixiviación alcalina, a la temperatura de 100°C, con una dosificación de 48 kg/TM de hidróxido de sodio y 13 kg/TM de sulfuro de sodio, llegaron a solubilizar 93.79% de arsénico y 96.21% de antimonio, en un tiempo de cuatro horas. Siendo esta prueba la más representativa, llegando a disminuir la ley de arsénico a 0.45%, y 0.24% de antimonio, lo que nos permite obtener un concentrado con presencia de arsénico y antimonio, dentro de los límites permisibles. Asimismo, la ley del cobre en el bulk aumenta en 0.75%..

VI. REFERENCIAS

- Awe, S. A., & Sandström, Å. (2010). Selective leaching of arsenic and antimony from a tetrahedrite rich complex sulphide concentrate using alkaline sulphide solution. *Minerals Engineering*, 23, 1227-1236. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2010.08.018>
- Azañero, Á., Núñez, P., Figueroa, A., Fernández, S., Caballero, M., Chávez, X., & Valenzuela, A. (2004). Lixiviación de concentrados Pb/Ag con alto contenido de As/Sb. *Revista del Instituto de Investigación FIGMMG de la UNMSM*, 7(14). Obtenido de <https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/iigeo/article/view/509/433>
- Azañero, G., & Gutiérrez, E. (2016). Efecto de la temperatura y del tiempo de lixiviación alcalina en caliente utilizando soda cáustica (NaOH) y sulfuro de sodio (Na₂S), sobre la extracción de As y el grado de concentración de Cu, Au y Ag de un concentrado de enargita (Cu₃AsS₄). Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo.
- Curreli, L., Ghiani, M., Surracco, M., & Orrú, G. (2005). Beneficiation of a gold bearing enargite ore by flotation and As leaching with Na-hypochlorite. *Minerals Engineering*, 18(8), 849-854. doi:<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2005.01.023>
- Espinoza, L. A., Iriarte, G., Espinoza, L. O., Gutarra, R., Herrera, M., Zamalloa, J., . . . Torres, J. (2021). Importancia de la mineralogía en la geometalurgia: aplicación en Perú. *Revista del Instituto de Investigación FIGMMG de la UNMSM*, 24. Obtenido de <https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/iigeo/article/view/21707/17494>
- Filippou, D., St-Germain, P., & Grammatikopoulos, T. (2007). Recovery of metal values from copper-arsenic minerals and other related resources. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 28(4), 247-298. doi:<https://doi.org/10.1080/08827500601013009>
- Lattanzi, P., Da Pelo, S., Musu, E., & Atzei, D. (2008). Enargite oxidation: A review. *Earth-Science Reviews*, 86(1-4), 62-88. doi:<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2007.07.006>
- Long, G., Peng, Y. P., & Bradshaw, D. (2012). A review of copper-arsenic mineral removal from copper concentrates. *Minerals Engineering*, 23, 179-186. doi:<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2012.03.032>
- Lovera, D. (Julio de 1999). Investigaciones hidrometalúrgicas de tecnologías limpias. *Revista del Instituto de Investigación FIGMMG de la UNMSM*. Obtenido de https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/publicaciones/geologia/v02_n3/investigaciones.htm
- Ruiz, M., Bello, R., & Padilla, R. (2013). Remoción de arsénico desde concentrados de cobre que contienen enargita. *Revista Metalúrgica UTO* (33), 16-20. Obtenido de http://www.revistasbolivianas.ciencia.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2078-55932013000200003&lng=es&nrm=i
- Tongamp, W., Takasaki, Y., & Shibayama, A. (2009). Arsenic removal from copper ores and concentrates through alkaline leaching in NaHS media. *Hydrometallurgy*, 98, 213-218. doi:<https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2009.04.020>
- Tungpalan, K., Wightman, E., Keeney, L., & Manlapig, E. (2021). A geometallurgical approach for predicting separation performance. *Minerals Engineering*, 171. doi:<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107065>
- Zhao, Y., Zhao, H., Tatiana, & Vainshtein, M. (2021). Review on arsenic removal from sulfide minerals: An emphasis on enargite and arsenopyrite. *Minerals Engineering*, 172. doi:<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107133>

Contribución de autoría:

Conceptualización, Adquisición de fondos, Recursos, Administración del proyecto (Julio Ramos Peralta). Supervisión, Validación, Visualización, Investigación, Metodología (Julio Ramos Peralta y Vidal Aramburú Rojas). Curación de datos, Software, Redacción – borrador original,

Redacción – revisión y edición (Jorge Ortiz Barreto y Wendy Choque Perez).

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.