

Optimización de recuperación de Pb-Ag del proceso de flotación mediante la caracterización mineralógica de mineral polimetálico de la sierra norte del Perú

JOSÉ DAVID VALVERDE DÍAZ ¹
VIDAL SIXTO ARAMBURÚ ROJAS ²
JORGE ALBERTO ORTIZ BARRETO ³
ROSA MARÍA TIBURCIO ALVA ⁴
SHARON ELISA AGUILAR ZEVALLOS ⁵

RECIBIDO: 26/10/2022 ACEPTADO: 13/09/2023 PUBLICADO: 18/12/2024

RESUMEN

Se realizó un estudio de caracterización mineralógica en tres bocaminas de extracción, Esmeralda, Orión y Hércules, con el propósito de optimizar la tasa de recuperación de plomo-plata (Pb-Ag) mediante el proceso de flotación. Se evaluaron las variables dosificación de reactivo mezcla (AP-3418/AR-404), AR-242 y pH. En la bocamina Esmeralda, se utilizó una dosificación de 18 g/t de mezcla (AP-3418/AR-404), 5 g/t de AR-242 con un pH óptimo de 11.5, que permitió recuperar un 81.99% de plomo con una calidad de 58.66% y 83.79% de plata con una calidad de 310.64 oz/t. En la bocamina Orión, se utilizó una dosificación de 30 g/t de (AP-3418/AR-404), 5 g/t de AR-242 con un pH óptimo de 10.5, que permitió recuperar 81.71% de plomo con un grado de 61.6% y 81.24% de plata con una ley de 85.39 oz/t, es decir, se alcanzaron valores óptimos. En la bocamina Hércules, se utilizó una dosificación de 30 g/t de (AP-3418/AR-404), 15 g/t de AR-242 y pH de 11.5, que permitió recuperar 82.4% de plomo con un grado de 54.12 y 80.88% de plata con una ley de 62.63 oz/t.

Palabras clave: caracterización, Minitab, bocamina, flotación.

INTRODUCCIÓN

Hasta el cierre del año 2019, Perú se posicionaba como segundo productor de plata y tercer productor de plomo a nivel mundial, según el informe de la encuesta emitida por la United States Geological Survey (2019). Sin embargo, desde 2020 hasta la actualidad, se reportó una disminución en la producción metálica de estos elementos en el país, posicionándose como el tercer y cuarto productor de plata y plomo a nivel mundial, tras haber sido desplazado por China y Estados Unidos, respectivamente, según cifras reportadas por el Boletín Estadístico Minero (Ministerio de Energía y Minas, 2022).

Por lo general, el grado de plomo en la galena natural es bajo, por lo que es necesario concentrarlo para obtener un producto comercial (Yekeler y Yekeler, 2006). El método convencional para la recuperación de minerales polimetálicos es el proceso de flotación, el cual presenta la ventaja de tener bajos costos de producción y respetar al medio ambiente, de tal manera que,

- 1 Ingeniero metalúrgico por la Universidad Nacional Mayor de San Marcos (Lima, Perú). Actualmente, se desempeña como jefe de laboratorio metalúrgico en Compañía Minera Lincuna (Ancash, Perú).
Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-5304-2480>
E-mail: jd.valverded@gmail.com
- 2 Doctor en Gestión de Empresas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos (Lima, Perú). Actualmente es profesor principal de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la UNMSM, y profesor a tiempo parcial de la UPC (Lima, Perú).
Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-7411-3866>
E-mail: varamburur@unmsm.edu.pe
- 3 Ingeniero metalúrgico por la Universidad Nacional Mayor de San Marcos (Lima, Perú). Actualmente, se desempeña como consultor independiente.
Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-5217-4510>
E-mail: jorgealberto.ortiz@unmsm.edu.pe
- 4 Docente a tiempo completo en la Facultad de Ingeniería Industrial de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos (Lima, Perú).
Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-2129-1623>
Autor de correspondencia: rtiburcioa@unmsm.edu.pe
- 5 Estudiante investigador de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos (Lima, Perú).
Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-0642-2645>
E-mail: sharon.aguilar@unmsm.edu.pe

sigue siendo insustituible en el procesamiento de los recursos de minerales sulfurados (Xie et al., 2021). Cabe añadir que alrededor del 95% de la producción mundial de plomo proviene de sus especies sulfuradas (Zou et al., 2022). La eficiencia del proceso de flotación debe atribuírsele a la capacidad de los reactivos químicos para formar complejos estables con iones metálicos en una solución acuosa o sobre la superficie del mineral, lo que mejora las propiedades físicas y químicas de la superficie, de modo que dichas especies sulfuradas se logren separar selectivamente de la ganga (Chen, 2021). Se han desarrollado compuestos de ácido ditiófosforado como colectores de flotación de las especies sulfuradas de plomo, de los cuales, el ditiófosfato (DTP) y el ditiófosfinato (DTPI) son los más utilizados debido a su alta selectividad en la concentración de galena (Tercero et al., 2019); también es posible concentrar galena con colectores del tipo xantato, que, en comparación con los ditiófosfatos, no se hidrolizan, oxidan, ni se descomponen en otras especies (Elizondo et al., 2021; Shen et al., 2016).

Uno de los metales huéspedes de la galena es la plata, que a menudo se encuentra como traza o constituyente menor en estos depósitos de minerales, lo que significa que se suele presentar menos atención a la recuperación de dicho metal en comparación con el componente principal (Ayllón, 2013; Aranda, 2014; Nassar et al., 2015; Song et al., 2021). Por otro lado, la importancia de dicho metal se le atribuye al desarrollo de energías ecológicas como los paneles solares y vehículos híbridos, lo cual ha hecho de la optimización de la producción de estos metales durante el proceso de flotación una necesidad para el sector minero-metalúrgico (Tiu et al., 2021). Además de esto, la plata metálica es reconocida como uno de los materiales esenciales necesarios para cumplir con los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) proyectados para el año 2030 (Dou et al., 2023).

Astucuri (1994) asevera que la complejidad física y química de estas especies exige la caracterización geológica de los depósitos que las albergan, la cual define y cuantifica las especies de minerales, su distribución volumétrica, grados de liberación y las asociaciones presentes en la mena, así como el análisis de las estructuras rocosas que forman parte del yacimiento (Yovanovic, 2004; Melgarejo et al., 2010; Bertolino et al., 2014; Ramos y Orihuela, 2017; Taya, 2018). Dicha información es relevante para evaluar el impacto de las especies involucradas en el procesamiento de estos minerales, con la

finalidad de sectorizar eficientemente el depósito y optimizar la recuperación de especies valiosas (López y Ipanaqué, 2008; Bustamante et al., 2008; Ojeda et al., 2010; Espinoza et al., 2021).

Entre las técnicas convencionales empleadas para la caracterización de las especies mineralógicas se encuentran la difracción de polvo de rayos X (XRD) y difracción cuantitativa de rayos X, microscopía electrónica de barrido con analizador de energías (SEM-EDS), catodoluminiscencia y microsonda electrónica (EMP). Estas técnicas son las más utilizadas debido a sus costos relativamente bajos. Por el contrario, las técnicas no convencionales como la Particle Induced X-Ray Emission (Micro-PIXE), Secondary Ion Mass Spectrometry y Laser-Ablation-Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (LA-ICP-MS) son menos accesibles y mucho más costosas (Melgarejo et al., 2010; Alves, 2014).

Song et al. (2021) estudiaron la flotación de galena con contenidos de plata empleando colectores del tipo ditiófosfato de dibutilo y amonio (ADD), xantato de etilo (EX) y ditiocarbamato de dietilo (DDC). Los investigadores descubrieron que un pH de 9.5 es más favorable para la flotación de galena con alto contenido de plata; además, los resultados demostraron que la flotación con el colector ADD presentó una mejor tasa de recuperación que la obtenida con los colectores EX, y DDC. Los autores llevaron a cabo experimentos de microflotación con muestras de 2 gramos que reportó un tamaño de partícula inferior a la malla 200 (100% -200 malla). También realizaron pruebas de flotación convencionales en una celda de 1500 ml, empleando 500 gramos de mineral de cabeza, a un tamaño de partícula de 80% -74 micrones, a 1500 RPM, y un flujo de aire de 20 l/min. Realizaron simulaciones basadas en el método de la teoría del funcional de la densidad (TFD) para describir el comportamiento de la flotación argentífera asociada a galena. Las mejores pruebas de flotación con colector ADD indicaron una tasa de recuperación del 85% para la galena y más del 90% para la plata asociada.

La relevancia del presente artículo de investigación radica en la aplicación de diseños experimentales y análisis de varianza para evaluar la dosificación de reactivos, en función del efecto más significativo sobre la recuperación y calidad del concentrado Pb-Ag, de tal manera que los valores calculados de dosificación de reactivos predicen el porcentaje de recuperación y la calidad en los yacimientos polimetálicos de la sierra norte del Perú. Así también, la presente investigación contribuye a la mejora y la optimización de los resultados en

la minería de Pb y Ag, a la vez que contribuye al conocimiento académico relacionado con la explotación de dichos metales.

Objetivo general

Optimizar la recuperación de plomo-plata en el proceso de flotación de las menas polimetálicas por medio de la caracterización mineralógica y diseños experimentales en la zona altoandina del Perú.

Objetivos específicos

- Identificar los componentes de la muestra, los grados de liberación y la presencia de partículas libres y entrelazadas de las bocaminas Esmeralda, Orión y Hércules en la zona altoandina del Perú.
- Determinar la influencia de las variables dosificación de reactivo mezcla (AP-3418/AR-404), AR-242 y el pH de la pulpa, junto con su grado de contribución al proceso de flotación, utilizando diseños experimentales de Plackett-Burman y el software estadístico Minitab.
- Optimizar la recuperación de plomo-plata mediante el proceso de flotación de los minerales polimetálicos de las distintas bocaminas en la zona altoandina del Perú.

Hipótesis general

La caracterización mineralógica y los diseños experimentales optimizan la recuperación de plomo-plata en el proceso de flotación de las menas polimetálicas en la zona altoandina del Perú.

Hipótesis específicas

- La caracterización mineralógica permite identificar las especies de minerales presentes en la muestra, así como los grados de liberación y las asociaciones presentes en las distintas formaciones mineralógicas.
- El análisis de la interacción de las variables dosificación de reactivo mezcla (AP-3418/AR-404), AR-242 y el pH de la pulpa empleando diseños experimentales de Plackett-Burman en el software estadístico Minitab determina su grado de contribución al proceso de flotación de las distintas bocaminas.
- La optimización la recuperación de plomo-plata mediante el proceso de flotación determina una mejor performance metalúrgica del proceso.

Justificación teórica

La optimización de las variables dosificación de reactivos y alcalinidad de la pulpa en el proceso de flotación influye positivamente en la performance metalúrgica de los concentrados plomo-plata, lo cual incrementa la calidad de los concentrados y, en consecuencia, genera un impacto económico positivo.

Justificación práctica

La identificación de las especies proporciona la información necesaria para caracterizar cada formación mineralógica que ingrese al proceso de concentración, con el fin de optimizar la recuperación del concentrado mediante el proceso de flotación de minerales polimetálicos en función de las variables dosificación de reactivos y alcalinidad de la pulpa, en las zonas altoandinas del Perú. Además, este trabajo de investigación se justifica por cuanto los resultados obtenidos pueden servir de modelo para diferentes empresas mineras con una caracterización mineralógica semejante, lo que mejoraría la recuperación de plomo y plata empleando diseños experimentales en el proceso de flotación.

Justificación económica

La optimización de la producción del recurso mineral metalúrgico maximiza los ingresos de una planta concentradora, como consecuencia del manejo eficiente de la materia prima a transformar.

Justificación social

Desde el punto de vista social, la optimización del uso de los recursos en el procesamiento de minerales polimetálicos mediante el proceso de flotación beneficia a las comunidades involucradas directa o indirectamente, garantizando el empleo local y el desarrollo de la comunidad para las futuras generaciones.

METODOLOGÍA

El enfoque metodológico de la presente investigación es de tipo cuantitativo, deductivo y de diseño experimental; se aplican los conocimientos de caracterización mineralógica y el estudio de las variables de influencia en el proceso de flotación, lo que permite la optimización de la recuperación del concentrado plomo-plata. La investigación se desarrolló con base al diseño tal como se muestra en la Figura 1.

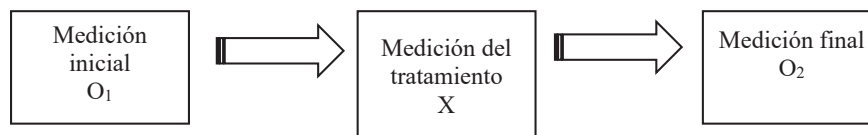


Figura 1. Esquema metodológico de la investigación.

Nota. La figura representa las mediciones que forman parte del diseño de investigación utilizado para el presente trabajo.

Fuente: Elaboración propia.

O₁: Caracterización mineralógica de las bocaminas Esmeralda, Orión y Hércules.

X: Elaboración del diseño experimental Plackett-Burman y análisis de las variables de influencia en el proceso metalúrgico de flotación.

O₂: Optimización de la recuperación de plomo y plata en la zona Altoandina del Perú.

Procedimiento del método de investigación

• Muestreo y preparación de la muestra

Se obtuvo una muestra representativa de mineral polimetálico de las bocaminas Esmeralda, Orión y Hércules, la cual fue reducida de tamaño hasta obtener un tamaño de particular inferior a la malla 10 (100% -10 malla) empleando una chancadora de quijada. Con la finalidad desarrollar las pruebas de investigación, el total del lote muestreado fue cuarteado y se almacenó una muestra testigo.

• Ensayos químicos y caracterización mineralógica

Una muestra de mineral representativo fue reducida de tamaño en un molino de bolas de laboratorio, con la finalidad de determinar las leyes químicas de Pb y Ag. Así también, se enviaron muestras de las distintas bocaminas de diferentes granulometrías (+100 malla, <-100, +200] malla, y <-200, +400] malla) al laboratorio de caracterización mineralógica, con la finalidad de determinar las especies de minerales presentes, la distribución volumétrica, los grados de liberación y los enlaces presentes. Este análisis mineralógico se realizó empleando un microscopio óptico de luz polarizada.

• Diseños experimentales aplicando Minitab 19

Se elaboraron diseños experimentales de Plackett-Burman para evaluar las variables independientes que contribución significativamente en la recuperación y calidad del concentrado plomo-plata, así como la optimización del proceso, empleando el software estadístico Minitab 19.

Se estableció un plan de pruebas de acuerdo con la plantilla de Plackett-Burman determinadas por el software a fin de evaluar el efecto de las variables mezcla de reactivos (AP-3418/AR-404, AR-242) y el pH de la pulpa sobre la recuperación y calidad del concentrado de plomo y plata. Las otras variables del proceso se mantuvieron constantes durante el desarrollo de las pruebas metalúrgicas de flotación a nivel de laboratorio.

RESULTADOS

Ensayos químicos

Los ensayos químicos de Pb para las distintas bocaminas se realizaron mediante el método de volumetría, mientras que la ley de plata se determinó por copelación. Los reportes del laboratorio determinaron que la bocamina Esmeralda reportó los valores más altos de plata, con una ley de 6.65 oz/t; los valores más bajos se reportaron en la bocamina Hércules con 1.12 oz/t. Por otro lado, los reportes de los análisis químicos de concentración de plomo revelaron que la bocamina Orión presentó una ley de 1.46%, es decir, los valores más altos con respecto a dicho metal. Los resultados de los ensayos químicos en las bocaminas de estudio se reportan a continuación en la Tabla 1.

Tabla 1. Ensayos químicos de las bocaminas.

Bocaminas	Ley de cabeza de Ag (oz/t)	Ley de cabeza de Pb (%)
Esmeralda	6.65	1.22
Orión	1.59	1.46
Hércules	1.12	0.89

Nota. La tabla muestra las leyes de cabeza de Ag-Pb en las bocaminas Esmeralda, Orión y Hércules.

Fuente: Elaboración propia.

Distribución volumétrica de las bocaminas Esmeralda, Orión y Hércules

El análisis de una muestra representativa de la bocamina Esmeralda observada en el microscopio óptico de luz polarizante determinó que las especies que aportan plomo pertenecen a la galena y sulfosales de plomo. Estos minerales se encontraban predominantemente en tamaños de partículas de $(-74 \mu + 37 \mu)$. Se identificaron además especies contaminantes de arsenopirita con una mayor distribución de 3.62% y esfalerita tipo I y II, con valores de distribución de 2.4% y 0.48%, respectivamente. También se observó la presencia de cobres grises con una distribución del 0.19% y estibina con un valor de 0.33%, valores que fueron reportados a una granulometría de $(-74 \mu + 37 \mu)$.

El análisis mineralógico de una muestra representativa de la bocamina Orión determinó que la especie que aporta plomo es la galena. Además de esto, se determinó que la mayor distribución de esta especie se encuentra en tamaños menores a las 74μ , con un valor de 1.02 %. Se identificaron además contaminantes como arsenopirita con la mayor distribución de 3.81% a un tamaño de partícula menor a la malla 200 y esfalerita tipo I y II, con valores de 2.61% y 0.35% para tamaños menores a la malla 200. También se observó la presencia de cobres grises con un valor máximo de 0.08% sobre la malla 200 y estibina que se identificó ocupando un volumen de 0.41% a una granulometría de 100% -200 malla.

El análisis realizado a la muestra representativa de la bocamina Hércules determinó que la especie que aporta plomo es la galena, con un máximo valor de distribución de 2.21% en tamaños menores a la malla 200. Además, se identificó la presencia de arsenopirita con una máxima distribución de 4.95% sobre las 74μ y esfalerita tipo I con una máxima distribución de 13.25% en tamaños menores a las 74μ . Cabe destacar que este último valor de distribución volumétrica es el de mayor porcentaje en comparación con las otras bocaminas. Es importante mencionar que no se reportó la presencia de cobres grises, esfalerita tipo II ni estibina.

En la Tabla 2, se presentan los valores de distribución volumétrica de todos los minerales identificados en el microscopio óptico de luz reflejada para granulometrías de $+100$ malla, <-100 , $+200$] malla, y <-200 , $+400$] malla, encontrados en las tres bocaminas. Los datos demuestran que las especies se encuentran en mayor volumen a granulometrías más finas, lo que hace indicar que, en

ese rango de tamaño de partícula, las especies se encuentran liberadas.

Grados de liberación de las bocaminas Esmeralda, Orión, y Hércules.

El análisis de los grados de liberación de minerales en la bocamina Esmeralda para determinar el grado de liberación de galena y sulfosales de plomo reportó valores de 86.08% y 78.82%, respectivamente, determinados para un tamaño de partícula de 100% -200 malla. Se observó un grado de liberación del 95.06% para los contaminantes de arsenopirita, 76.88% para los cobres grises, 100% para la esfalerita tipo II y 91.66% para la estibina. Estos valores se determinaron a tamaños de partículas inferiores a la malla 200. De la misma manera, se reportó que el mayor grado de liberación en esfalerita tipo I fue identificado para un tamaño de partícula de 100 % -100 malla.

El análisis de los grados de liberación en la bocamina Orión reveló que la galena presenta un grado de liberación del 91.72% a un tamaño de partícula menor a la malla 200. A esta misma granulometría se hallaron los valores máximos de grados de liberación en las especies de esfalerita tipo I, arsenopirita, y estibina, con los valores del 95.2%, 95.11 %, y 97.63%, respectivamente. Cabe mencionar que las especies identificadas como esfalerita tipo II presentaron el mayor grado de liberación del 93.55% sobre el retenido de la malla 100 y las especies de cobres grises reportaron el mayor grado de liberación del 88.9% sobre el retenido de la malla 200.

Los resultados del análisis de grados de liberación en la bocamina Hércules indicaron que la galena presenta un grado de liberación del 97.62% a una granulometría de 100 % -200 malla. Los minerales considerados perjudiciales para el proceso, como la esfalerita tipo I, esfalerita tipo II y arsenopirita, reportaron valores de 96.14%, 44.89% y 97.38%, respectivamente, determinados a un tamaño de partícula de <-100 , $+200$] malla. Los valores del total de los grados de liberación de las especies identificadas a distintas granulometrías se representan en la Tabla 3.

Tipo de enlaces referidos a Pb-Ag

En una muestra representativa de la bocamina Esmeralda, a una granulometría de 100% $+100$ malla, se observó que la galena formó enlaces con pirita, gangas, cobres grises y esfalerita tipo I, todos los cuales se identificaron como moderadamente fáciles de liberar. A un tamaño de partícula

de 100% -100 malla, la galena formó enlaces con arsenopirita, pirita, gangas y cobres grises. Entre ellos, los enlaces formados con las gangas, pirita y arsenopirita se identificaron como muy difíciles de liberar. Para un tamaño de partícula de 100% -200 malla, la galena formó enlaces con cobres grises, sulfosales de plomo, esfalerita tipo I, arsenopirita, estibina y calcopirita. Entre ellos, los enlaces formados con los cobres grises y los sulfosales de plomo se identificaron como moderadamente difícil y muy difícil de liberar, respectivamente.

En una muestra representativa de la bocamina Orión, a una granulometría de 100% +100 malla, se observó que la galena formó enlaces con la arsenopirita, los cuales se identificaron como muy difíciles de liberar. Considerando un tamaño de

partícula de 100% -100 malla, los enlaces formados entre galena y la calcopirita se identificaron como muy difíciles de liberar. Por último, para una granulometría de 100% -200 malla, el enlace formado por la galena y la arsenopirita se identificó como imposible de liberar.

Por el contrario, los enlaces formados por la galena y otros minerales encontrados en una muestra representativa de la bocamina Hércules se consideraron en su totalidad fáciles de liberar.

En la Tabla 4, se describen todos los enlaces observados y sus posibilidades de liberación para las distintas muestras observadas. Además, las Figuras 2, 3 y 4 representan las principales micrografías referidas a la galena en las distintas bocaminas.

Tabla 2. Distribución volumétrica de las especies mineralógicas de las bocaminas Esmeralda, Orión y Hércules.

TAJO 1: DISTRIBUCIÓN VOLUMÉTRICA DE LAS ESPECIES MINERALÓGICAS DE LA BOCAMINA ESMERALDA															
MALLA	GANGAS	PIRITA	ARSENOPIRITA	GALENA	CALCOPIRITA	COBRES GRISES	ESFALERITA I	ESFALERITA II	MAGNETITA	ESTIBINA	MARCA-SITA	SULFOSALES Pb	PIRROTITA	HEMATITA	RUTILO
+100	91.19	4.07	0.97	0.17	0	0	0.28	-	0	0.02	-	-	-	-	-
<-100, +200]	87.81	6.05	1.7	0.3	-	0	1.78	0.45	0.04	0.13	-	-	-	-	-
<-200, +400]	82.25	7.43	3.62	0.88	0.1	0.19	2.4	0.48	0.1	0.33	0	0.1	0.1	-	-
TAJO 2: DISTRIBUCIÓN VOLUMÉTRICA DE LAS ESPECIES MINERALÓGICAS DE LA BOCAMINA ORIÓN															
(+100)	86.9	5.88	1.02	0.28	0	-	0.46	0.28	0	0	0	-	-	0	-
<-100, +200]	84.15	6.41	2.18	0.81	0	0.08	1.94	0.32	0.04	0.24	0.2	-	-	0	0.04
<-200, +400]	82.08	6.97	3.81	1.02	0.12	0.06	2.61	0.35		0.41	0.12	-	-	-	0.12
TAJO 3: GRADOS DE LIBERACIÓN DE LAS ESPECIES MINERALÓGICAS DE LA BOCAMINA HÉRCULES															
(+100)	61.49	17.03	1.41	0.69	0	-	0.86	-	-	-	0	-	0.36	-	-
<-100, +200]	63.59	21.06	4.95	1.25	0.18	-	3.54	0	-	-	0.75	-	0.25	-	0.23
<-200, +400]	58.85	15.13	4.06	2.21	0.19	-	13.25	-	-	-	0.17	-	1.52	-	-

Nota. La tabla muestra la distribución volumétrica para las mallas +100, <-100, +200], <-200, +400].

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. Grados de liberación de las especies mineralógicas de las bocaminas Esmeralda, Orión y Hércules.

TAJO 1: GRADO DE LIBERACIÓN DE LAS ESPECIES MINERALÓGICAS DE LA BOCAMINA ESMERALDA															
MALLA	GANGAS	PIRITA	ARSENOPIRITA	GALENA	CALCOPIRITA	COBRES GRISES	ESFALERITA I	ESFALERITA II	MAGNETITA	ESTIBINA	MARCA-SITA	SULFOSALES Pb	PIRROTITA	HEMATITA	RUTILO
+100	99.07	91.4	78.91	69.6	0.24	3	68.22	-	3.5	42.57	-	-	-	-	-
<-100, +200]	99.72	97.2	89.32	78.08	-	65.25	95.39	93.92	63.55	87.28	-	-	-	-	-
<-200, +400]	99.99	98.1	95.06	86.08	67.22	76.88	94.23	100	100	91.66	72.25	78.82	90.59	-	-
TAJO 2: GRADOS DE LIBERACIÓN DE LAS ESPECIES MINERALÓGICAS DE LA BOCAMINA ORIÓN															
(+100)	98.78	94	71.19	71	9	-	60.94	93.55	0	29.09	7.92	-	-	0	-
<-100, +200]	99.23	96.3	87.79	86.14	2.62	88.9	87.51	87.18	45.69	76.49	76.33	-	-	1	58.18
<-200, +400]	99.77	96.9	95.11	91.72	70.54	75.3	95.2	88.79	-	97.63	74.59	-	-	-	74.59
TAJO 3: GRADOS DE LIBERACIÓN DE LAS ESPECIES MINERALÓGICAS DE LA BOCAMINA HÉRCULES															
(+100)	96.14	92.1	63.78	54.71	60.93	-	56.37	-	-	-	28.75	-	69.34	-	-
<-100, +200]	98.73	98.4	97.38	93.11	94.85	-	96.14	44.89	-	-	73.32	-	86.35	-	100
<-200, +400]	98.39	97.2	91.1	97.62	70.89	-	95.21	-	-	-	100	-	96.09	-	-

Nota. La tabla presenta los grados de liberación en las mallas +100, <-100, +200], <-200, +400].

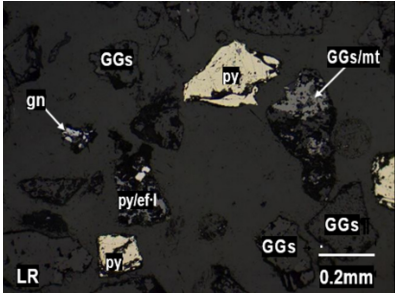
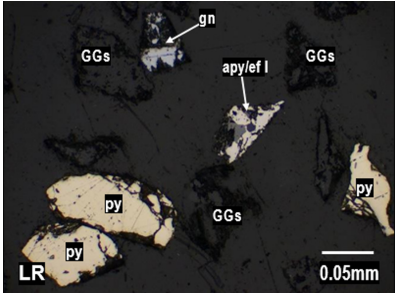
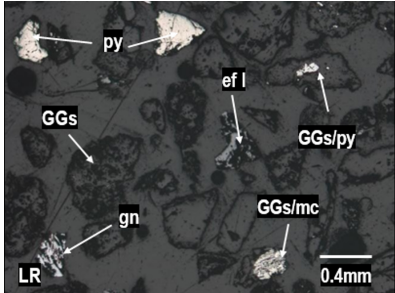
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4. Tipos de entrelazamientos referidos a la galena a distintas granulometrías para las bocaminas Esmeralda, Orión y Hércules.

Tamaño de partícula	Bocamina Esmeralda			Bocamina Orión			Bocamina Hércules		
	Enlace	% Vol.	Posibilidad de liberación	Enlace	% Vol.	Posibilidad de liberación	Enlace	% Vol.	Posibilidad de liberación
Malla +100	py/gn GGs/gn GGs/py/gn GGs/gn/CGRs GGs/py/gn/ef I	0.04 0.08 0.25 0.08 0.08	Moderadamente fácil Moderadamente fácil Moderadamente difícil Moderadamente fácil Moderadamente fácil	gn/ef I GGs/gn apy/gn py/gn/ef I GGs/apy/gn GGs/gn/ef I	0.09 0.23 0.19 0.09 0.09 0.19	Fácil Muy difícil Muy difícil Moderadamente fácil Moderadamente fácil Moderadamente fácil	py/gn gn/ef I	1.79 0.83	Fácil Moderadamente fácil
Malla <-100, +200]	apy/gn py/gn GGs/gn gn/CGRs GGs/py/gn py/apy/gn	0.08 0.08 0.08 2.00 0.08 1.00	Fácil Fácil Muy difícil a imposible Moderadamente fácil Moderadamente difícil Muy difícil	gn/ef I apy/gn cp/gn GGs/gn GGs/cp/CGRs	0.24 0.08 0.08 0.16 0.08	Fácil Fácil Muy difícil a imposible Moderadamente fácil Moderadamente fácil	gn/ef I gn/ef II	0.02 0.16	Fácil Fácil
Malla <-200, +400]	gn/CGRs gn/SFsPb gn/ef I apy/gn gn/esb cp/gn/CGRs py/gn/CGRs	0.10 0.29 0.10 0.19 0.10 0.10 0.10	Moderadamente difícil Muy difícil Fácil Moderadamente fácil Fácil Moderadamente fácil Moderadamente fácil	gn/ef I py/gn apy/gn	0.12 0.12 0.23	Moderadamente fácil Moderadamente fácil Imposible	ef I/gn GGs/apy/gn	0.11 0.17	Moderadamente fácil Moderadamente fácil

Nota. La tabla presenta los enlaces de la galena y sus posibilidades de liberación.

Fuente: Elaboración propia.

PRINCIPALES MICROGRAFÍAS REFERIDAS A LA GALENA EN LAS DISTINTAS BOCAMINAS		
ESMERALDA	ORIÓN	HÉRCULES
		
Figura 2 Granos libres de gangas (GGs), pirita (py), galena (gn), granos mixtos de gangas/magnetita (GGs/mt), pirita/esfalerita I (py/ef I) observados en partículas de malla +100.	Figura 3 Granos libres de gangas (GGs), pirita (py), galena (gn), arsenopirita/esfalerita I (apy/ef I) observados en partículas de malla <-100, +200].	Figura 4 Granos libres de minerales de pirita (py), esfalerita (ef I), galena (gn) y minerales de gangas (GGs) granos mixtos binario de gangas con marcasita (GGs/mc) observados en partículas de malla +100.

Nota. Las figuras muestran los granos libres y los entrelazados en las distintas bocaminas.

Fuente: Elaboración propia.

Diseño experimental Plackett-Burman para las bocaminas Esmeralda, Orión, y Hércules

Se desarrollaron pruebas de flotación en muestras representativas de las tres bocaminas en estudio, evaluando la contribución del reactivo mezcla (AP-3418/AR-404), AR-242 y el pH de la pulpa. Se consideraron valores de 18, 24, y 30 g/t de reactivo

mezcla; 5, 10, y 15 g/t de AR-242; y valores de pH de 10.5, 11, y 11.5. El mejor resultado con respecto a la recuperación de Pb en la bocamina Esmeralda fue de 84.60%, el cual corresponde a la prueba de orden 3. Con respecto a la mejor calidad de concentrado, se alcanzó una ley de 60.24%, valor que corresponde a la prueba de orden 6. Así también, la mayor recuperación de plata fue de 84.96% y una

calidad de 341.58 oz/t, resultados que corresponden a la prueba de orden 4. Los resultados del total de las pruebas del diseño experimental de la bocamina Esmeralda se describen en la Tabla 5.

Con respecto al diseño de pruebas de flotación para el mineral de la bocamina Orión, el mejor resultado con respecto a la recuperación de Pb fue de 83.73%, que corresponde a la prueba de orden 2. Con respecto al mayor grado de concentrado de Pb, se alcanzó 61.63%, que se logró en la prueba de orden 7. La mejor recuperación de plata fue de 82.50%, alcanzado en la prueba 4, y la mejor calidad fue de 85.35 oz/t, que se obtuvo en la prueba

de orden 3. Los resultados del diseño experimental de la bocamina Orión se describen en la Tabla 6.

Para el caso de la bocamina Hércules, el mejor resultado de recuperación de Pb fue de 83.79%, tal como lo describe la prueba de orden 9, mientras que el mejor grado fue de 56.25%, obtenido en la prueba 2. De la misma manera, el mejor valor de recuperación de Ag fue de 82.57%, alcanzado en la prueba 3, y la mejor calidad fue de 63.66 oz/t, alcanzado en la prueba 6. Los resultados del total de las pruebas del diseño experimental de la bocamina Hércules se describen en la Tabla 7.

Tabla 5. Diseño experimental Plackett-Burman y resultados de las pruebas metalúrgicas para la bocamina Esmeralda.

Orden corrida	pH	Mezcla (AP-3418/AR-404)	AR-242	pH	Mezcla (AP-3418/AR-404)	AR-242	Rec. Pb (%)	Ley Pb (%)	Rec. Ag (%)	Ley Ag (oz/t)
1	1	-1	-1	11.5	30	5	83.68	57.24	84.72	297.54
2	1	-1	-1	11.5	18	5	82.00	58.66	83.79	310.64
3	1	1	1	11.5	30	15	84.60	56.25	84.91	326.46
4	0	0	0	11	24	10	83.30	56.27	84.96	341.58
5	0	0	0	11	24	10	83.01	56.62	84.80	339.41
6	-1	-1	-1	10.5	18	5	81.20	60.24	82.15	312.07
7	-1	1	1	10.5	30	15	83.24	55.46	83.47	310.58
8	-1	1	-1	10.5	30	5	82.21	59.25	81.23	295.10
9	-1	-1	1	10.5	18	15	82.36	57.78	82.06	290.00
10	1	-1	1	11.5	18	15	80.77	56.80	80.82	335.07

Nota. La tabla presenta las variables operativas utilizadas para el diseño experimental.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6. Diseño experimental Plackett-Burman y resultados de las pruebas metalúrgicas para la bocamina Orión.

Orden corrida	pH	Mezcla (AP-3418/AR-404)	AR-242	pH	Mezcla (AP-3418/AR-404)	AR-242	Rec. Pb (%)	Ley Pb (%)	Rec. Ag (%)	Ley Ag (oz/t)
1	0	0	0	11	24	10	83.18	57.65	81.58	74.58
2	0	0	0	11	24	10	83.73	57.15	81.85	73.22
3	-1	1	-1	10.5	30	5	81.89	61.39	81.44	85.35
4	-1	1	1	10.5	30	15	82.58	59.94	82.50	84.84
5	1	1	-1	11.5	30	5	82.24	58.93	81.17	77.67
6	-1	-1	-1	10.5	18	5	82.32	61.60	79.44	78.24
7	1	-1	1	11.5	18	15	78.34	61.63	75.68	76.22
8	-1	-1	1	10.5	18	15	83.71	59.30	81.31	77.55
9	1	1	1	11.5	30	15	82.28	59.34	79.10	79.34
10	1	-1	-1	11.5	18	5	78.97	60.69	78.83	76.68

Nota. La tabla presenta las variables operativas utilizadas para el diseño experimental.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7. Diseño experimental Plackett-Burman y resultados de las pruebas metalúrgicas para la bocamina Hércules.

Orden corrida	pH	Mezcla (AP-3418/AR-404)	AR-242	pH	Mezcla (AP-3418/AR-404)	AR-242	Rec. Pb (%)	Ley Pb (%)	Rec. Ag (%)	Ley Ag (oz/t)
1	0	0	0	11	24	10	83.30	51.94	78.26	38.30
2	1	-1	-1	11.5	18	5	82.53	56.25	79.38	36.94
3	-1	-1	1	10.5	18	15	83.29	48.11	82.57	43.38
4	-1	1	-1	10.5	30	5	82.83	49.29	82.16	57.07
5	0	0	0	11	24	10	83.40	52.26	78.36	36.88
6	1	1	-1	11.5	30	5	80.18	56.16	78.29	63.66
7	-1	-1	-1	10.5	18	5	81.31	47.17	81.82	41.29
8	1	1	1	11.5	30	15	82.40	54.12	80.88	62.63
9	-1	1	1	10.5	30	15	83.79	48.13	80.94	55.69
10	1	-1	1	11.5	18	15	84.54	54.67	80.92	37.94

Nota. La tabla presenta las variables operativas utilizadas para el diseño experimental.

Fuente: Elaboración propia.

Análisis de efectos estandarizados

La Tabla 8 resume la influencia de las variables pH, mezcla (AP-3418/AR-404), AR-242 y sus interacciones sobre las variables respuestas de recuperación y calidad del concentrado para las distintas bocaminas.

Optimización de los parámetros de flotación de la mena polimetálica

Se optimizaron las variables independientes de mayor contribución en el proceso de flotación de las tres bocaminas en estudio empleando Minitab

19. Los resultados para la optimización de parámetros de la bocamina Esmeralda indicaron una dosificación de 18 g/t de reactivo mezcla, 5 g/t de Ar-242 y un pH de 11.5. En la bocamina Orión los resultados de la optimización de variables fueron de 30 g/t de mezcla, 5 g/t de Ar-242 y un pH 10.5. Por último, los parámetros óptimos correspondiente a la flotación de minerales de la bocamina Hércules fueron de 15 g/t de Ar-242, 30 g/t de reactivo mezcla y un pH de 11.5. Los resultados y las gráficas de optimización de parámetros en la flotación de los minerales de las bocaminas Es-

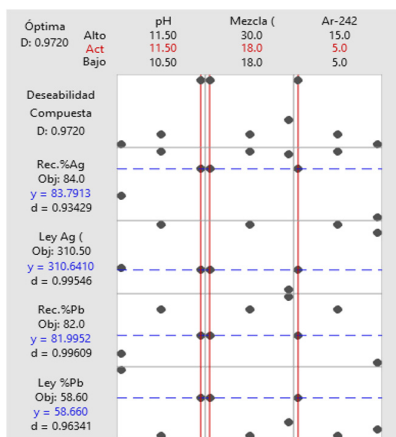
Tabla 8. Resumen de las interacciones de las variables principales.

Bocamina	Respuesta	Variables
Esmeralda	Ley de Plomo (Pb)	AR-242
	Recuperación de Plomo (Pb)	AP-3418/AR-404
	Ley de Plata (Ag)	pH, interacción (pH - AR-242)
	Recuperación de Plata (Ag)	AP-3418/AR-404, pH, interacción (AP-3418/AR-404 - AR-242), interacción (pH - AR-242), interacción (pH - AP-3418/AR-404)
Orión	Ley de Plomo (Pb)	Interacción (pH - AR-242), interacción (pH - AP-3418/AR-404), AP-3418/AR-404
	Recuperación de Plomo (Pb)	Interacción (pH - AR-242), AR-242, AP-3418/AR-404
	Ley de Plata (Ag)	AP-3418/AR-404, A, interacción (pH - AP-3418/AR-404)
	Recuperación de Plata (Ag)	pH, AP-3418/AR-404, interacción (pH - AR-242)
Hércules	Ley de Plomo (Pb)	pH
	Recuperación de Plomo (Pb)	AR-242, interacción (pH - AP-3418/AR-404)
	Ley de Plata (Ag)	AP-3418/AR-404
	Recuperación de Plata (Ag)	pH, AP-3418/AR-404, interacción (pH - AR-242), interacción (pH - AP-3418/AR-404 - AR-242)

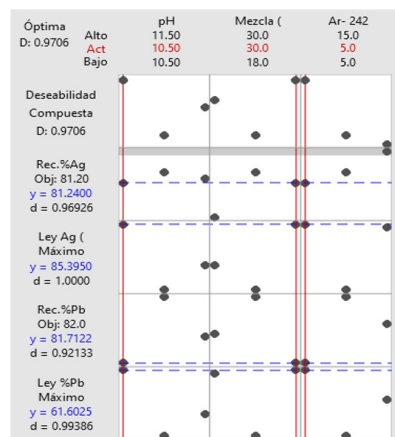
Nota. La tabla muestra las interacciones en las bocaminas Esmeralda, Orión y Hércules.

Fuente: Elaboración propia.

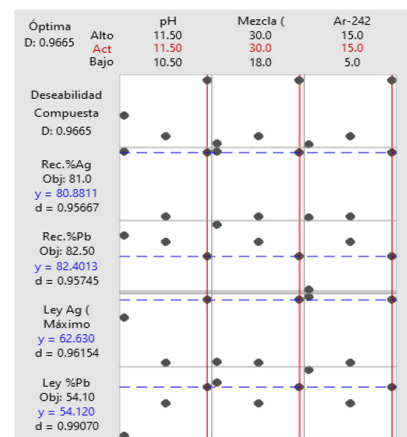
BOCAMINA ESMERALDA



BOCAMINA ORIÓN



BOCAMINA HÉRCULES

**Figura 5.** Gráfica de optimización de parámetros de flotación bajo 01.**Figura 6.** Gráfica de optimización de parámetros de flotación bajo 02.**Figura 7.** Gráfica de optimización de parámetros de flotación bajo 03.

Nota. La tabla presenta las gráficas de optimización de las variables independientes y dependientes en las tres bocaminas.
Fuente: Elaboración propia.

meralda, Orión y Hércules se representan en las figuras 5, 6, y 7.

Optimización de los parámetros de flotación de la mena polimetálica

Se optimizaron las variables independientes de mayor contribución en el proceso de flotación de las tres bocaminas en estudio empleando Minitab 19. Los resultados para la optimización de parámetros de la bocatina Esmeralda indicaron una dosificación de 18 g/t de reactivo mezcla, 5 g/t de Ar-242 y un pH de 11.5. En la bocatina Orión los resultados de la optimización de variables fueron de 30 g/t de mezcla, 5 g/t de Ar-242 y un pH 10.5. Por último, los parámetros óptimos correspondiente a la flotación de minerales de la bocatina Hércules fueron de 15 g/t de Ar-242, 30 g/t de reactivo mezcla y un pH de 11.5. Los resultados y las gráficas de optimización de parámetros en la flotación de los minerales de las bocaminas Esmeralda, Orión y Hércules se representan en las figuras 5, 6, y 7.

PRUEBA DE HIPÓTESIS

Los resultados del diseño experimental de Plackett-Burman para la bocatina Esmeralda, elaborado con base en la caracterización mineralógica de dicha bocatina, se presentan en la Tabla 5. El orden de corrida 2 identifica los niveles óptimos de recuperación y calidad de concentrado de plomo-plata, en función de la dosificación de reactivos. Los resultados de la prueba 2 difieren del

resto de corridas para dicha bocatina en cuanto a las condiciones de la prueba, con lo que queda demostrada la hipótesis.

Los resultados del diseño experimental de la bocatina Orión, elaborado con base en la caracterización mineralógica de dicha labor, demuestran que el orden de corrida 3 presenta los valores óptimos de recuperación y calidad de concentrado plomo-plata en función de las variables independientes de dosificación de reactivos. Este resultado difiere notoriamente del de otras pruebas, tal y como se observa en la Tabla 6. Por lo dicho anteriormente, queda demostrada la hipótesis.

La elaboración del diseño experimental y la selección de los reactivos que se emplearon para el desarrollo de las pruebas de flotación de la bocatina Hércules se basaron en la caracterización mineralógica. El resultado de la batería de pruebas demuestra que la prueba de orden de corrida 8 presenta los valores óptimos de recuperación y calidad del concentrado plomo-plata, la cual se puede observar en la Tabla 7. Dichos resultados difieren notoriamente con el resto de las corridas, con lo que queda demostrada la hipótesis.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en la presente investigación permitieron optimizar la tasa de recuperación de plomo-plata (Pb-Ag) en el proceso de flotación

mediante la caracterización mineralógica-metalúrgica y el diseño óptimo del proceso de flotación de la mena polimetálica. En los resultados de la caracterización se identificó que la mayoría de las partículas valiosas presentaban una textura de intercrecimiento simple lo cual resultó atractivo en el proceso de concentración. Por otro lado, el diseño experimental evidenció que, para obtener una mejor performance metalúrgica en la recuperación de plomo-plata de la bocamina Esmeralda, fueron necesarios 18 g/t de la mezcla (AP-3418 y AR-404), 5 g/t de AR-242 y PH de 11.50. Para la bocamina Orión, los parámetros óptimos incluían 30 g/t de la mezcla (AP-3418 y AR-404), 5 g/t de AR-242 y PH de 10.50. Del mismo modo, para la bocamina Hércules, los parámetros óptimos fueron 30 g/t de la mezcla (AP-3418 y AR-404), 15 g/t de AR-242 y PH de 11.50.

Al comparar el trabajo de Ramos y Orihuela (2017) con la presente investigación, cuyo objetivo fue evaluar minerales complejos polimetálicos mediante pruebas metalúrgicas de flotación, previa caracterización, para obtener concentrados de cobre, plomo y zinc con buenas recuperaciones y calidades que cumplieran con las exigencias de las fundiciones, se concluyó que las mejores condiciones de la separación Cu-Pb fueron la dosificación de carbón activado a 233.3 g/t, mezcla BCS 60 g/t, colector Ap 5100 10 g/t y mantener el pH en condiciones naturales durante 7 min. Finalmente, en la separación Cu-Pb, la calidad del concentrado de cobre fue de 25.6% y la de plomo de 54.3%. En cambio, en la presente investigación se determinó que para la obtención de una mejor performance metalúrgica en la recuperación de plomo y plata se requiere una dosificación de mezcla de reactivos que oscile entre 18 y 30 g/t (AP-3418 y AR-404), dosificaciones de AR-242 entre 5 y 15 g/t y un nivel de pH entre 10.5 y 11.5, tal como se describe en las tablas 5, 6 y 7.

CONCLUSIONES

Por medio de la caracterización mineralógica de la muestra se identificaron varios tipos de minerales. En el tajo 1: pirita, arsenopirita, galena, calcopirita, cobres grises, esfalerita I, magnetita, estibina, esfalerita II, marcasita, sulfosales de plomo y pirrotita. En el tajo 2: pirita, arsenopirita, marcasita, galena, calcopirita, esfalerita I, esfalerita II, magnetita, estibina, hematita, marcasita, rutilo y cobres grises. Finalmente, en el tajo 3: pirita, arsenopirita, marcasita, galena, calcopirita, pirrotita, esfalerita I, esfalerita II y rutilo. La mayoría de los minerales de interés

presentan una textura de intercrecimiento simple, mientras que una fracción minoritaria presenta una estructura de intercrecimiento compleja, lo cual beneficia el proceso de separación, flotación y concentrado de los minerales de interés.

El análisis estandarizado de los efectos en el diseño experimental permitió identificar que la interacción de variables (A: pH, B: colector mezcla, C: colector AR-242) son las que ejercen mayor influencia en la ley y recuperación del plomo (Pb) y plata (Ag). Por ende, se establecieron los parámetros para la obtención de un mejor performance metalúrgico. Para el tajo 1, una dosis de 18 g/t de reactivo mezcla (AP-3418 y AR-404), 5.0 g/t del colector secundario AR-242 y un pH de 11,50. Para el tajo 2, una dosis de 30 g/t de reactivo mezcla (AP-3418 y AR-404), 5.0 g/t del colector secundario AR-242 y un pH de 10,50. Finalmente, para el tajo 3, una dosis de 30 g/t de reactivo mezcla (AP-3418 y AR-404), 15.0 g/t del colector secundario AR-242 y un pH de 11.50.

Las variables operativas como granulometría, flujos de aire de las celdas, tiempos de acondicionamientos, entre otros, contribuyen para determinar un modelo de recuperación y calidad de los concentrados con un enfoque geometalúrgico.

AGRADECIMIENTO

A la Unidad de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

REFERENCIAS

- [1] Alves, F. E. A. (2014). *Caracterização mineralógica de amostras de Resíduo da Mineração de Chumbo em Boquira (BA)* (Tesis de licenciatura). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. <https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/5447/1/ALVES%2c%20F.E.A.pdf>
- [2] Aranda Bruno, J. A. (2014). *Optimización por diseño experimental de la flotación de concentrados bulk plomo y plata a nivel laboratorio en la FIQ.* (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo. <https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/3721/Aranda%20Bruno.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [3] Astucuri, V. (1994). *Introducción a la flotación de minerales*. Lima S. E.

- [4] Ayllón Meresi, D. E. (2013). *Optimización del proceso de flotación Bulk Plomo-Plata*. (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima. <https://repositorio.uni.edu.pe/handle/20.500.14076/10542>
- [5] Bertolino, L., Alves, F., Mendes, J., y Neumann, R. (2014). Caracterização mineralógica preliminar de amostras do rejeito da antiga mineração de chumbo em Boquira, Bahia. *Comunicações Geológicas*, 101, 965-968. https://www.ineg.pt/wp-content/uploads/2020/03/76_2985_ART_CG14_ESPECIAL_II.pdf
- [6] Bustamante, M. O., Gaviria, A. C., y Restrepo, O. J. (2008). *Notas de clase de la asignatura: Concentración de minerales*. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- [7] Chen, J. (2021). The interaction of flotation reagents with metal ions in mineral surfaces: A perspective from coordination chemistry. *Minerals Engineering*, 171. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107067>
- [8] Dou, S., Xu, D., Zhu, Y., y Keenan, R. (2023). Critical mineral sustainable supply: Challenges and governance. *Futures*, 146. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2023.103101>
- [9] Elizondo, M., Uribe, A., y Bello, S. (2021). Chemical stability of xanthates, dithiophosphinates and hydroxamic acids in aqueous solutions and their environmental implications. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 207. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111509>
- [10] Espinoza, L. A., Iriarte, G., Espinoza, L. O., Gutarra, R., Herrera, M., Zamalloa, J., Aramburú, V. S., y Torres, J. A. (2021). Importancia de la mineralogía en la geometalurgia: aplicación en Perú. *Revista del Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas*, 24(48), 85-100. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v24i48.21707>
- [11] López Príncipe, P. H., y Ipanaqué Nizama, O. S. (2008). *Caracterización y optimización de flotación a nivel laboratorio del mineral de cobre de la minera Candelaria*. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Mayor de San Marcos. <https://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/20.500.12672/3272>
- [12] Ministerio de Energía y Minas. (2022). *Boletín Estadístico Minero: Por concepto de canon y regalías mineras, minería genera mayores ingresos para las regiones* (Edición N.º 01-2022). Ministerio de Energía y Minas. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2878178/BEM%2001-2022.pdf?v=1648163997>
- [13] Melgarejo, J. C., Provenza, J. A., Galí, S., y Llovet, X. (2010). Técnicas de caracterización mineral y su aplicación en exploración y explotación minera. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 62(1), 1-23. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-33222010000100002&lng=es&tlng=es
- [14] Nassar, N. T., Graedel, T. E., y Harper, E. M. (2015). By-product metals are technologically essential but have problematic supply. *Science Advances*, 1(3). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1400180>
- [15] Ojeda Escamilla, M. C., Reyes Bahena, J. L., y Aragón Piña, A. (27-30 de octubre de 2010). *Caracterización mineralógica en la industria minera*. Convención Minera del Bicentenario, Ixtapa, Zihuatanejo, México.
- [16] Ramos, J., y Orihuela, A. (2017). *Caracterización y evaluación de pruebas metalúrgicas de flotación de un mineral complejo polimetálico del distrito de Palca - Huancavelica*. (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima. https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UNMS_b2570f1e-40152d212efd90f88551c1b6
- [17] Shen, Y., Nagaraj, D. R., Farinato, R., y Soma-sundaran, P. (2016). Study of xanthate decomposition in aqueous solutions. *Minerals Engineering*, 93, 10-15. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.04.004>
- [18] Song, B., Dong, X., Qiu, X., Hu, Z., y Wang, Y. (2021). Electronic structure and flotation behavior of Ag-bearing galena. *Journal of Alloys and Compounds*, 868. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.159105>
- [19] Taya Flores, W. H. (2018). *Optimización de la flotación polimetálica en la planta concentradora Mallay*. (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa. <https://repositorio.unsa.edu.pe/items/f80506e6-7e7f-4c1d-b8c5-b4bb765cb337>
- [20] Tercero, N., Nagaraj, D. R., y Farinato, R. (2019). A Critical Overview of Dithiophosphinate and Dithiophosphate Interactions with Base Metal Sulfides and Precious Metals. *Mining*,

Metallurgy & Exploration, 36, 99-110. <https://doi.org/10.1007/s42461-018-0039-1>

- [21] Tiu, G., Ghorbani, Y., Jansson, N., y Wanhainen, C. (2021). Tracking silver in the Lappberget Zn-Pb-Ag-(Cu-Au) deposit, Garpenberg mine, Sweden: Towards a geometallurgical approach. *Minerals Engineering*, 167. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.106889>
- [22] U.S. Geological Survey (2019). *Mineral Commodity Summaries 2019*. U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/70202434>
- [23] Xie, H., Liu, Y., Rao, B., Wu, J., Gao, L., Chen, L., y Tian, X. (2021). Selective passivation behavior of galena surface by sulfuric acid and a novel flotation separation method for copper-lead sulfide ore without collector and inhibitor. *Separation and Purification Technology*, 267. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.118621>
- [24] Yekeler, M., y Yekeler, H. (2006). A density functional study on the efficiencies of 2-mercaptobenzoxazole and its derivatives as chelating agents in flotation processes. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 268(1-3), 121-125. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2006.03.012>
- [25] Yovanovic, A. (2004). *Engenharia da Concentração de Massa por Flotação*. Belo Horizonte, MG, Brasil: Modelo Operacional. <https://www.modelooperacional.com.br/wp-content/uploads/2019/04/Engenharia-da-Concentracao-de-Massa-por-Flotacao.pdf>
- [26] Zou, S., Lin, Q., Wang, S., Ma, X., y Zhong, H. (2022). A novel surfactant O,O'-bis(2-butoxyethyl) ammonium dithiophosphate: Synthesis, selective flotation and adsorption mechanism towards galena. *Minerals Engineering*, 179. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107466>

Contribución de los autores

José David Valverde Díaz (autor principal): Investigación, adquisición de fondos, administración del proyecto, software.

Vidal Sixto Aramburú Rojas (coautor): Conceptualización, curación de datos, análisis formal recursos.

Jorge Alberto Ortiz Barreto (coautor): Investigación, metodología, visualización, redacción (revisión y edición), redacción (borrador original).

Rosa María Tiburcio Alva (coautor): Análisis formal, metodología, supervisión, validación.

Sharon Elisa Aguilar Zevallos: Investigación, redacción (revisión y edición).