

Optimización en la recuperación y calidad de concentrados de plata de la minera Pasivos Ambientales

Optimization in the recovery and quality of silver concentrate of the mining Pasivos Ambientales

George Emerson Escobedo Remachi^{1,a}, Daniel Florencio Lovera Davila^{1,b}, (†) Víctor Benigno Ascuña Rivera^{2,c}, Victor Vicente Bustinza Rivera^{2,d}

Recibido: 06/02/2023 - Aprobado: 03/04/2023 - Publicado: 02/06/2023

RESUMEN

El objetivo de este trabajo de investigación fue la optimización en la recuperación y calidad de concentrados de plata por medio de flotación de la minera Pasivos Ambientales. Se utilizó un software estadístico para determinar los valores óptimos de las variables independientes como del Colector Z-11 (Xantato Isopropilico de sodio), pHagua y pHmedio de flotación, luego de correr un modelo factorial 2³ con tres réplicas en el centro. Se determinaron las siguientes ecuaciones:

$$\text{Calidad concentrado plata} = 185724.16 - 29473.9 \cdot \text{pHagua} - 26526.5 \cdot \text{pHmedio} + 23.4718 \cdot \text{Colector} + 4210.56 \cdot \text{pHagua} \cdot \text{pHmedio}$$

$$\text{Recuperación plata} = -12180.57 + 1942.94 \cdot \text{pHagua} + 1748.64 \cdot \text{pHmedio} + 127425 \cdot \text{Colector} - 277.5625 \cdot \text{pHagua} \cdot \text{pHmedio}$$

De acuerdo con la ecuación de calidad de concentrado se pudieron determinar los valores óptimos de pHagua 6.5, pHmedio 7.1 y Colector Z-11 20% con una ley de 620.119 oz/Tc.

Con la ecuación de recuperación se pudieron determinar los valores óptimos de pHagua 6.1, pHmedio 7.1 y Colector Z-11 20% con una recuperación 92.6934%.

Palabras claves: Flotación, factorial, software, recuperación, calidad de concentrado.

ABSTRACT

The main objective of this research work was to optimize the recovery and quality of silver concentrates by means of flotation of the Pasivos Ambientales mining company, using statistical software with which the optimal values of the independent variables such as Collector Z -11 (Sodium Isopropyl Xanthate), pH water and flotation pH medium, after running a 2³ factorial model with three replicates in the center, the following equations were determined.

$$\text{Silver Concentrate Quality} = 185724.16 - 29473.9 \cdot \text{pHwater} - 26526.5 \cdot \text{pHmedium} + 23.4718 \cdot \text{Colector} + 4210.56 \cdot \text{pHwater} \cdot \text{pHmedium}$$

$$\text{Recovery} = -12180.57 + 1942.94 \cdot \text{pHwater} + 1748.64 \cdot \text{pHmedium} + 127425 \cdot \text{Colector} - 277.5625 \cdot \text{pHwater} \cdot \text{pHmedium}$$

According to equation, the quality of the concentrate was able to determine the optimal values of pH water 6.5, pH medium 7.1 and Collector Z-11 20% with a law of 620,119 oz/Tc.

With the equation of the recovery could be determined the optimal values of pH water 6.1, pH medium 7.1 and Collector Z-11 20% with a recovery of 92.6934%.

Keywords: Flotation, Factorial, software, recovery, concentrate quality.

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

2 Universidad Nacional San Agustín, Facultad de Ingeniería de Procesos, Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica. Arequipa, Perú.

a Autor para correspondencia: george.escobedo@unmsm.edu.pe - ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0882-0244>

b E-mail: dloverad@unmsm.edu.pe - ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2815-0716>

c ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3643-9942>

d E-mail: vbustinza@unsa.edu.pe - ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7224-6267>

I. INTRODUCCIÓN

La explotación metálica en el Perú se da desde las culturas preincaicas y pasando al Imperio de los incas en sus diferentes manifestaciones culturales (Arenas Machado, 1992).

El auge de la producción de la plata en el Perú se dio en la época Colonial, estuvo dentro de los tres mayores productores de plata del mundo, junto con Bolivia y México. De acuerdo a la información recabada desde 1943 hasta 1900, su producción creció de 747 a 5,080 millones de onzas. (Acosta & Huanacuni, 2014), de ellas, más del 80% (1601-1700) llegó a provenir solo de Perú, Bolivia y México, y solo del Perú fue el 26% de la producción global (Loret de Mola, 1978). En la etapa Republicana se produce la plata, junto con el cobre, plomo, zinc, hierro y otros productos. Las reservas metálicas en el Perú se encuentran en gran parte en la cordillera de los Andes, el cual INGEMMET ha presentado en sus mapas metalogénicos (Acosta et al., 2020; INGEMMET, 2021).

La metalurgia en los 10 últimos años está utilizando los paquetes estadísticos en la optimización y mejora de los procesos productivos tanto en transformativa como extractiva. En la metalurgia extractiva se optimizan los procesos debido a los cambios que ocurren en la mineralogía de los minerales, tiempo de molienda, roca competente, consumo de energía, consumo de reactivos, granulometría del mineral, que influye en su baja recuperación y la calidad del producto (Li et al., 2020).

La empresa minera Pasivos Ambientales realiza la remediación ambiental de desmontes de antiguas explotaciones, que contiene minerales complejos (oxidados) de plomo-plata-zinc, en especial plata argentífera, que influye en el proceso, razón por la cual se debe mejorar la dosificación de reactivos y medios de flotación para evitar pérdidas económicas y financieras en los concentrados (Zúñiga, Sergio. INGEMMET, 1955).

El presente trabajo se fundamenta en la optimización de la recuperación de la plata por medio de flotación de minerales de la empresa minera Pasivos Ambientales, cuyo yacimiento de estudio es La Descuidada, ubicado en la zona núcleo del Parque Nacional Huascarán, se localizan entre las quebradas Ruricocha y Cajavilca, sobre la ladera S.E. del cerro y paraje de Santa Bárbara, distrito Yanama (Zúñiga, Sergio. INGEMMET, 1955).

Las reservas de la mina La Descuidada, según información de los lugareños, datan desde el tiempo de los incas, existen bocaminas a diferentes distancias y alturas, cuyas vetas muestran presencia de minerales tales como: cuarzo, plata metálica, galena, pirita, ligeras venillas de bornita. El mineral diseminado es consecuencia de labores antiguas realizadas probablemente durante el periodo de la Colonia, lo cual justifica la irregularidad del material apilado (Zúñiga, Sergio. INGEMMET, 1955).

El mineral se encuentra diseminado sobre la superficie frontal a poca distancia de las bocaminas a lo largo del talud que forma el cerro. Se tiene referencias por declaraciones de los pobladores que el material fue apilado desde la Colonia.

Las concesiones Las Descuidadas se encuentran a lo largo de una faja mineralizada denominada flanco oriental de la cordillera Blanca y su continuación al norte presenta mineralización de plomo, zinc y plata. En menor cantidad, se encuentran minerales de oro y bajos contenidos de cobre, molibdeno y tungsteno (Tumialan de la Cruz, 2003).

La problemática de la unidad minera es la baja recuperación y baja calidad de concentrados, por lo cual se deben evaluar las variables de flotación para determinar cuáles son de mayor influencia en el proceso, con dichos parámetros al ser evaluados con el Software Statgraphics Centurion (Andrade et al., 2014; Klavina et al., 2016; Ziyani & Fatah, 2014) mejoraría la recuperación y calidad de concentrados, con lo cual se tendría mejores ingresos económicos para la unidad.

II. METODOLOGÍA

La metodología para esta investigación es de tipo cuantitativo y experimental, mediante el uso de paquetes estadísticos en forma comparativa de Excel, Statgraphics-Centurion para tener un estudio adecuado de las variables independientes y su interrelación, cuyo resultado será favorable en las variables dependientes.

Los balances de las campañas nos apoyaron en buscar optimizar la recuperación y calidad de concentrados de plata, tomando como base las teorías y antecedentes de estudio en el procesamiento de minerales mediante flotación por espumas.

Las muestras que se tomaron en cuenta para este trabajo están en función al material tratado por dos campañas realizadas en la planta concentradora Virgen del Rosario- Caraz, para evaluar la mejora de los resultados se realizó una campaña en la planta concentradora Mesapata-Cátac con 1195.800 TMH.

III. RESULTADOS

Para la selección de variables independientes de las tres campañas de mineral procesado se utilizó un diseño factorial, en el cual se tuvo valores máximos, centrales y mínimos. Se detalla en la Tabla 1.

Al evaluar en Statgraphics-Centurion se determinó, según diagrama de Pareto, que solo tres variables tienen mayor preponderancia en la mejora de la calidad y recuperación de la plata.

En la Tabla 2 se muestra el diseño factorial para las tres variables y tres puntos centrales, con calidad y recuperación de plata evaluadas.

3.1 Análisis de la calidad de concentrados de plata

La matriz utilizada para correr el modelo factorial, se muestra en la Tabla 2. Al realizar las estimaciones para cada uno de los efectos Figura 1 y las interacciones Figura 2, al aplicar el análisis de varianza y ser evaluados estadísticamente con un 95% de nivel de confianza, se observó que tanto el colector, como la interacción del pH

Tabla 1. Valores máximos, centrales y mínimos de variables

	Variable	Mínimo	Centro	Máximo
X1	pH-agua	6.1	6.3	6.5
X2	pH-medio	6.9	7	7.1
X3	Xantato Isopropilico de sodio (%)	10	15	20

Tabla 2. Diseño factorial de variables independientes y variables dependientes

Prueba	pH-agua	pH-medio	Colector	Grado	Recuperación
	X1	X2	X3	Y1	Y2
1	-1	-1	-1	397.18	68.51
2	1	-1	-1	212.59	75.69
3	-1	1	-1	244.36	72.52
4	1	1	-1	209.51	73.32
5	-1	-1	1	615.39	83.02
6	1	-1	1	424.65	91.26
7	-1	1	1	378.33	88.48
8	1	1	1	612.27	78.94
9	0	0	0	523.51	81.87
10	0	0	0	407.62	88.19
11	0	0	0	549.5	85.99

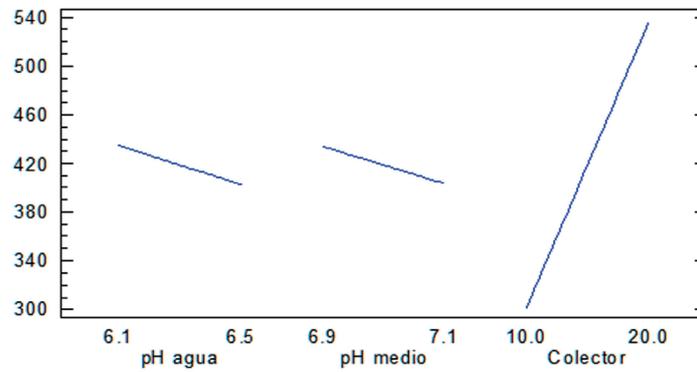


Figura 1. Gráfico de efectos principales para grado de plata

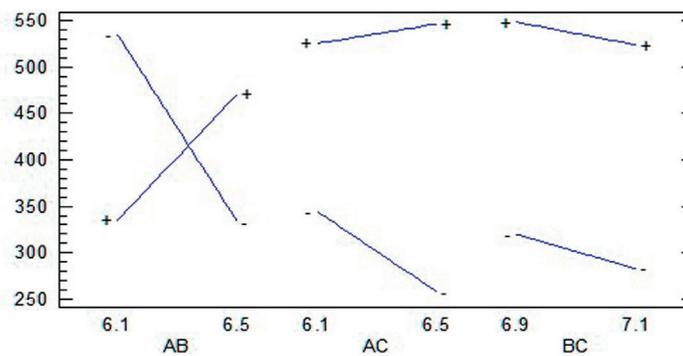


Figura 2. Gráfico de interrelación de dos variables en el grado de plata

del medio y del pH flotación influyen en la calidad del concentrado (grado).

Mientras que para el pH del agua y pH medio es negativo, el cual debe ser minimizado si el grado descende, esto se puede observar en el gráfico de efectos principales.

Al determinar el coeficiente de regresión del grado se llegó a la siguiente ecuación matemática del modelo ajustado:

Esta ecuación de calidad de concentrado (grado) se observa en la Figura 3, que se lleva a un gráfico tridimensional y se visualiza la superficie de respuesta.

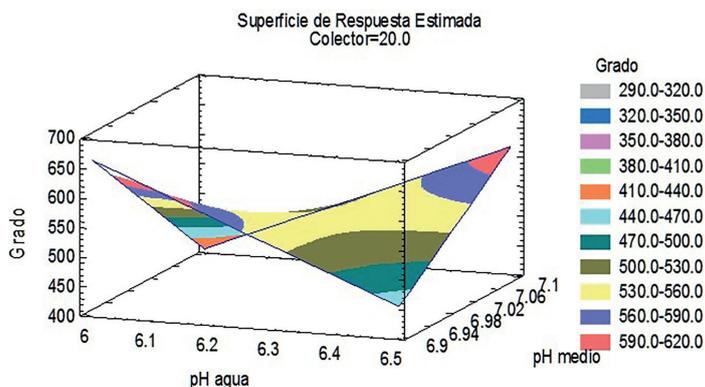


Figura 3. Superficie de respuesta estimada para el grado de plata

Cuyo grado de calidad de concentrado máximo según los puntos centrales con los parámetros dados se visualizan en la Tabla 3.

Tabla 3. La calidad de concentrado en puntos centrales

pH agua	pH medio	Colector	Grado
6.3	7	15	418.549

En la Tabla 4 se observa la respuesta de la optimización matemáticamente en el cual se tuvo un grado 620.119 Oz/Tc.

Tabla 4. Valor óptimo para la ley concentrado (grado)

Variables	Bajo	Alto	Óptimo
pH agua	6.1	6.5	6.5
pH medio	6.9	7.1	7.1
Colector	10	20	20

En la Figura 4 nos muestra el contorno de la superficie de respuesta estimada para el grado de plata de la optimización matemática de la Tabla 4.

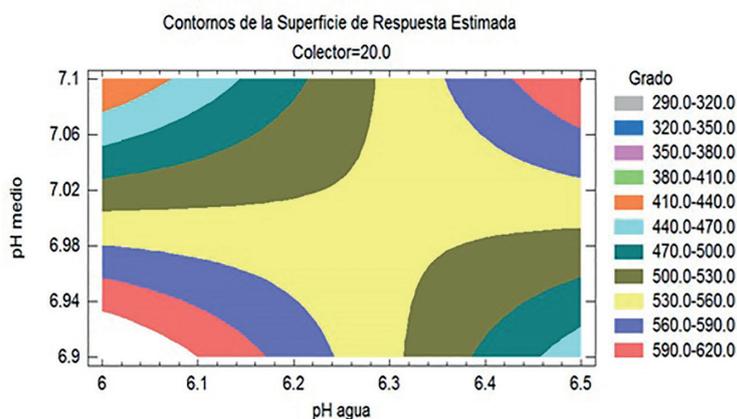


Figura 4. Contorno de superficie estimada para el grado de plata

3.2 Análisis de la recuperación de plata

De igual forma al evaluar los datos obtenidos de la toma de muestras Tabla 2 y al ser evaluados, analizados en un

paquete estadístico se determinó que los efectos principales como el colector Figura 5 y las interacciones Figura 6 pH agua y pH medio influyen en la recuperación de plata.

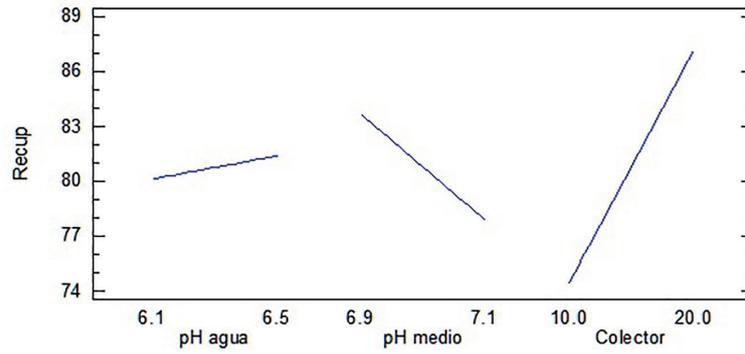


Figura 5. Gráfico de efectos principales para la recuperación de plata

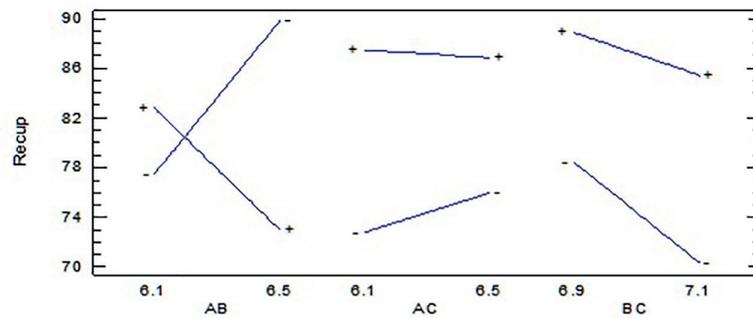


Figura 6. Gráfico de interrelación de dos variables en la recuperación de plata

Teniendo en cuenta estas variables se llegó a una ecuación ajustada, en el cual se determinó la influencia del colector y la interacción del agua y pH medio en la recuperación de la plata.

Esta ecuación de recuperación de plata, al igual que la calidad de concentrado se lleva a un gráfico tridimensional, en el cual se visualiza la superficie de respuesta de la recuperación de plata. Ver Figura 7.

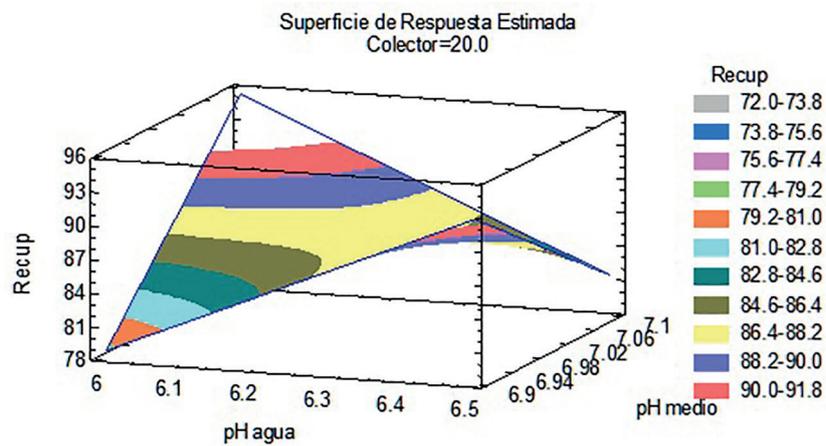


Figura 7. Superficie de respuesta estimada para la recuperación de plata

En la Tabla 5 la recuperación en los puntos centrales se determinó una recuperación de 80%.

Tabla 5. Recuperación de concentrado en puntos centrales

pH agua	pH medio	Colector	Recuperación
6.3	7	15	80.7709

En la Tabla 6 se determinó el punto óptimo del presente proceso y una tendencia de la hipótesis planteada, teniendo una recuperación de 92.69%

Tabla 6. Valor óptimo para la recuperación de la plata

Variables	Bajo	Alto	Óptimo
pH agua	6.1	6.5	6.1
pH medio	6.9	7.1	7.1
Colector Z-11	10	20	20

La Figura 8 nos muestra el contorno de la superficie de respuesta estimada para la recuperación de plata de la optimización matemática de la Tabla 6.

IV. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos de las muestras de 2 campañas de flotación según la Tabla 2, nos permiten dar los siguientes comentarios:

El plomo presente en este mineral tiene una ley de 0.5% y el zinc en forma de marmatita está con un 0.4% para pequeña minería, estas leyes nos son representativas para comercializar, debido a que llega a un concentrado de 10-12% plomo y es mayor la penalidad en la comercialización, debido a su baja ley por ende este concentrado se comercializa en forma de bulk como concentrado de plata, al mejorar la calidad del concentrado (grado) se tendrá una mejora económica.

Al utilizar un paquete estadístico que apoyó en la mejora de la calidad del concentrado (grado) de plata llegando a 620,119 oz/Tc y comparando con resultados de planta que era de entre un rango de 200-400 oz/Tc,

demonstró una mejora, el mismo que fue corroborado en la tercera campaña.

En la tabla 3, se observa que al evaluar solo las tres réplicas en el modelo matemático se tiene una calidad de concentrado (grado) de plata 418,549 oz/Tc y al ser evaluado con las once pruebas en el modelo se observa en la Tabla 4, los valores óptimos, los cuales se corroboran en la Figura 3 y Figura 4 donde se ve la interrelación de las tres variables en la superficie de respuesta. Al ser evaluados en la tercera campaña se tuvo una mejora sustancial en la calidad de plata entre 500-600 oz Ag/Tc.

En el caso del zinc en forma de marmatita tiene una ley de 0.4%, cuyo concentrado bulk tiene 10-11% de zinc, tiene alta presencia de arsenopiritas porque en la etapa de flotación se flota pirita en el cual está encapsulado en su forma cristalográfica la argentita, al mejorar la calidad del concentrado mejora también la recuperación por la influencia que tiene el colector (Xantato Isopropilico de Sodio Z-11) y la interacción del pH agua que ingresa a planta y el pH flotación el cual debe permanecer casi neutro para mejorar la recuperación de plata hasta un 92,6934%.

En la Figura 7 y Figura 8 se muestra en la superficie de respuesta las tres variables; en la tabla 5, se observa que al evaluar solo las tres réplicas en el modelo matemático se tiene una recuperación de plata 80.77% y al ser evaluado con las once pruebas, en el modelo se observa en la Tabla 6 los valores óptimos. Al ser evaluados en la tercera campaña se tuvo una mejora sustancial en la recuperación hasta el 88%.

En la etapa de optimización se obtuvo el modelo matemático:

a. Recuperación:
 $Y = -12178.8 + 1942.95z_1 + 1748.64z_2 + 1.27425z_3 - 277.562z_1z_2$

b. Grado (ley del concentrado)
 $Y = 185724.16 - 29473.9z_1 - 26526.5z_2 + 23.4718z_3 + 4210.56z_1z_2$

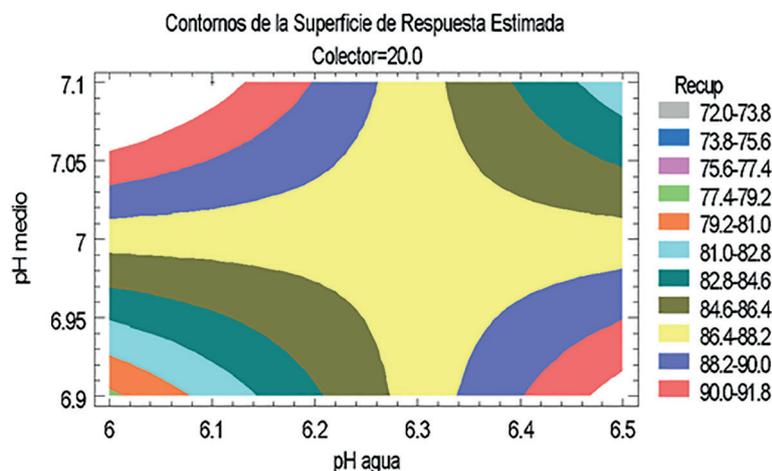


Figura 8. Contorno de superficie estimada para la recuperación de plata

Donde:

Z1= pH agua

Z2= pH medio

Z3= Z3= Colector (Z -11)

Se obtuvo en el presente estudio un punto óptimo al maximizar:

Recuperación: 92,6934

Con unos factores óptimos evaluados:

pH agua : 6.1

pH medio: 7.1

Colector Z-11: 20%

Calidad de concentrado (grado): 620,119.

Con unos factores óptimos evaluados:

pH agua : 6.5

pH medio: 7.1

Colector Z-11: 20%

Al tener esta información de los resultados obtenidos, se debería evaluar la mineralogía del mineral, el grado de molienda y la influencia del complejo (cianuro- sulfato de zinc).

V. CONCLUSIONES

Por medio de modelos matemáticos se ha evaluado con facilidad y bajo costo las variables que influyen en el proceso de flotación de plata; y en la etapa de optimización se determinó la dosificación óptima.

La utilización del software estadístico Statgraphics Centurión Versión XV para realizar el análisis de los datos con el fin de evaluar, interpretar y optimizar las variables en estudio, en la investigación del proceso metalúrgico de flotación, ayuda por la rapidez en la obtención de resultados.

Se determinó que las variables más trascendentes de la flotación de mineral de plata es la dosificación de Xantato Isopropílico de Sodio (Z-11) y el control de la alcalinidad de la pulpa para que pueda flotar la plata (pH). Los cuales corresponden a los valores óptimos con lo cual se produce una activación de la plata (pirita argentífera) presente en la flotación y el pH.

De la etapa de optimización, de la recuperación y la calidad de concentrado (grado) de plata en el concentrado son afectados por el colector y la interacción del pH medio y el pH agua con lo cual aumentó la recuperación.

Se incrementó la recuperación de la plata obtenida en cada campaña de 84% a 92%, de igual forma se incrementó la calidad del concentrado de 393.05 oz/TC a 620.119 oz/TC, se mejoraron las variables relevantes en el estudio de mayor influencia como: Colector Z-11, estandarizando en un rango 15-20% y la interacción del pH medio y el pH agua.

VI. AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento a la empresa Pasivos Ambientales S.A. por permitirnos la toma de muestras durante las dos primeras campañas y por tomar en cuenta las recomendaciones y modificar su proceso en la tercera campaña.

A los trabajadores de la concentradora Virgen del Rosario- Caraz por su colaboración, de igual forma a los de la planta concentradora Lodtmann-Pompey y Mesapata-UNASAM, por su apoyo con sus experiencias en la forma de llevar el tratamiento de este mineral.

VII. REFERENCIAS

- Acosta, J., & Huanacuni, D. (2014). Plata: Antecedentes. *Horizonte minero*, 98, 18-24, INGEMMET. <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/3327>
- Acosta, J., Rivera, R., Valencia, M., Chirif, H., Huanacuni, D., Rodríguez, Í., Villarreal, E., & Paico, D. (2020). *Mapa metalogénico del Perú 2020*. INGEMMET. [Inhttps://portal.ingemmet.gob.pe/documents/73138/1231307/Memoria-del-Mapa-Metalogenetico-2020.pdf](https://portal.ingemmet.gob.pe/documents/73138/1231307/Memoria-del-Mapa-Metalogenetico-2020.pdf)
- Andrade, J. C., Acosta, D. L., Bucheli, M. A., & Osorio, O. (2014). *Desarrollo de un Recubrimiento comestible compuesto para la conservación del tomate de árbol* (Cyphomandra betacea S.) . In *Información tecnológica* (Vol. 25, pp. 57–66). scieloc.l .
- Arenas Machado, F. (1992). *Historia del Perú* (Ediciones).
- Instituto Geológico Minero y Metalúrgico-INGEMMET. (2021). *Mapa Metalogénico oro Perú*. <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/3839>
- Klavina, K., Klavins, J., Veidenbergs, I., & Blumberga, D. (2016). *Charcoal Production in a Continuous Operation Retort. Experimental Data Processing. Energy Procedia*, 95, 208–215. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.09.051>
- Li, J., Ji, C., Xie, X., Kang, B., & Fan, P. (2020). *Experimental study on separation of zinc and silver flotation from a silver-rich zinc concentrate in Yunnan. Guocheng Gongcheng Xuebao/The Chinese Journal of Process Engineering*, 20(8), 938–946. <https://doi.org/10.12034/j.issn.1009-606X.219288>
- Loret de Mola, E. (1978). *Silver Economic Analysis*. University Minnesota. https://conservancy.umn.edu/bitstream/handle/11299/154942/GraduateSchool_1981_Spring.pjsessionid=3575247F6FDF74BAABA9960C2DE14350?sequence=1
- Tumialan de la Cruz, P. H. (2003). *Compendio de yacimientos minerales del Perú*. In INGEMMET (Vol. 53, Issue 9). <https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/libros/2007/cyacimientos/contenido.htm>
- Ziyani, L., & Fatah, N. (2014). *Use of experimental designs to optimize fluidized bed granulation of maltodextrin. Advanced Powder Technology*, 25(3), 1069–1075. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.appt.2014.02.013>

Zúñiga, Sergio. INGEMMET. (1955). *Minas San Pedro y Descuidada*. <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/1976>

Contribución de autoría

Conceptualización: Víctor Ascuña Rivera y Víctor Bustinza Rivera; Análisis formal: George Escobedo Remachi; Investigación: George Escobedo Remachi; Metodología: Daniel Lovera Dávila; Administración del proyecto: George Escobedo Remachi; Recursos: George Escobedo Remachi); Software: Víctor Ascuña Rivera, Ernesto Vizcardo Cornejo; Supervisión: Daniel Lovera Dávila y George Escobedo Remachi; Validación: George Escobedo Remachi; Visualización: George Escobedo Remachi y Víctor Bustinza Rivera; Redacción - borrador original: George Escobedo Remachi; Redacción - revisión y edición: Víctor Bustinza Rivera, Daniel Lovera Dávila y George Escobedo Remachi.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.