

Artículo Original

Optimización de la fusión del oro de un mineral sulfurado empleando el número de fusión aurífera

OPTIMIZATION OF THE GOLD FUSION OF A SULFURED MINERAL USING THE AURIFERA FUSION

DANIEL LOVERA§*, JORDAN BASILIO VILLANUEVA£, SARA ROMERO ASTUPIÑAN£

Recibido: 15 junio de 2019 / Aceptado: 23 noviembre de 2019

§*Instituto de Investigación-Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica-Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima-Perú.*
£*Ingenieros Metalúrgicos – Universidad Nacional Mayor de San Marcos*

Resumen

Uno de los minerales sulfurados procedente de Arequipa, debido a su complejo análisis y su riqueza mineralógica fue apto para nuestro estudio de investigación; al cual se realizó 20 análisis a la misma muestra, obteniendo como resultado menor 3.556 g/t y como ley mayor 9.000 g/t por esta razón vimos conveniente optimizar el análisis de esta muestra sulfurada investigando a las plantas procesadoras del distrito Chala – Arequipa y otros laboratorios que aplican la misma metodología. Se observó la variación en la composición del flux para minerales sulfurados, por esta razón decidimos variar el porcentaje de la composición de nuestro flux: 54.50% Litargirio, 25.50% Carbonato, 15% Sílice y 5% Bórax, obteniendo mejores resultados y con una variación de resultados mínimo en el laboratorio de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Mostramos los cálculos efectuados para el flux empleando el Número de Fusión Aurífera que nos permite sistematizar y comparar los distintos ensayos de las diversas empresas auríferas y de ese modo obtener las tendencias más favorables para contar con un flux apropiado.

$$\text{Numero Fusión Aurífera} = \left(\frac{W_{\text{mineral}} * W_{\text{regulo}}}{(W_{\text{flux}})^3} \right) \left(\frac{\% W_{\text{carbonato}} * (100)^2}{\% W_{\text{silice}} * \% W_{\text{borax}} * \% W_{\text{litargirio}}} \right) \left(\frac{T - T_0}{T_{\infty} - T_0} \right)^T \text{Tolerancia}$$

Palabras clave: análisis del oro, flux, mineras auríferas, recuperación de oro, número de fusión aurífera.

Abstract

One of the sulphurated minerals from Arequipa, due to its complex analysis and its mineralogical richness, was suitable for our research study; At which 20 analyzes were carried out on the same sample, obtaining as a minor result 3,556 g/t and as a major law 9,000 g/t for this reason we found it convenient to optimize the analysis of this sulphurated sample by investigating the processing plants of the Chala - Arequipa district and others laboratories that apply the same methodology. The variation in the flux composition was observed for sulfur minerals, for this reason we decided to vary the percentage of the composition of our flux: 54.50% Litargirio, 25.50% Carbonate, 15% Silica and 5% Borax, obtaining better results and with a variation of minimum results in the laboratory of the School of Metallurgical Engineering of the National University of San Marcos. We show the calculations made for the flux using the Gold Fusion Number that allows us to systematize and compare the different trials of the various gold companies and thus obtain the most favorable trends to have an appropriate flux.

$$\text{Numero Fusión Aurífera} = \left(\frac{W_{\text{mineral}} * W_{\text{regulo}}}{(W_{\text{flux}})^3} \right) \left(\frac{\% W_{\text{carbonato}} * (100)^2}{\% W_{\text{silice}} * \% W_{\text{borax}} * \% W_{\text{litargirio}}} \right) \left(\frac{T - T_0}{T_{\infty} - T_0} \right)^T \text{Tolerancia}$$

Keywords: gold analysis, flux, gold mining, gold recovery, gold fusion number

* Correspondencia de autor:

Instituto de Investigación-Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica-Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima-Perú. E-mail: dloverad@unmsm.edu.pe

INTRODUCCIÓN

La raíz metalúrgica del Perú se remonta a las épocas pre incas donde el poblador andino logró el dominio de las sofisticadas técnicas para fundir, alear, amalgar, laminar y soldar los metales (Lovera, 2003).

La minería del oro, a pesar de ser una actividad que genera ingresos al país, no cuenta con tecnología de punta que permita alcanzar mayor eficiencia y sostenibilidad ambiental. Además, se promueve poco la innovación dentro de la cadena de producción del oro (Bustamante, 2016)

El ensayo al fuego es un método tradicional empleado para la determinación de oro en menas, concentrados, lamas entre otros. En éste método se utilizar la elevada solubilidad de los metales nobles en una fase metálica de plomo liquido separándolo del resto de la muestra que forma otra fase liquida de menor densidad llamada escoria. Para esto, se funde la muestra con los fundentes: litargirio, carbonato, sílice y bórax; des acuerdo a la naturaleza del mineral se le adiciona harina o nitrato de potasio.

El especialista profesional en análisis de oro es llamado “ensayador”, quien va a realizar determinaciones cuantitativas del oro, que, depende de disciplinas científicas, pero más de la experiencia de muchos años. El método es llamado también análisis seco, análisis por vía seca o al fuego; este procedimiento antiguo ya estaba desde el siglo XIX (Vanini, 1972).

MATERIALES Y MÉTODOS

LUGAR DE ESTUDIO

Se realizaron ensayos químicos sobre muestra mineral (oro) sulfurada procedente de Arequipa.

CONSIDERACIONES TÉCNICAS

Número de Fusión Aurífera (NFAu)

De las pruebas experimentales desarrolladas en el Laboratorio de Piro metalurgia de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica aplicando desarrollos de sistematización como es el caso del Teorema Pi de Buckingham planteamos el Número de Fusión Aurífera, para hacer los cálculos de la operacionalización de las variables que intervienen en la fusión del oro. (Lovera, 2019).

$$NFAu = (\text{Nro. de Balance de Masa}) * (\text{Nro. de Flux}) * (\text{Nro. térmico}) * (\text{Nro. Estadístico}) \dots \dots \dots (\text{Ecuación 1})$$

$$NFAu = \left(\frac{W_{\text{mineral}} * W_{\text{regulo}}}{(W_{\text{flux}})^3} \right) \left(\frac{\% W_{\text{carbonato}} * (100)^2}{\% W_{\text{silice}} * \% W_{\text{borax}} * \% W_{\text{litargirio}}} \right) \left(\frac{T - T_0}{T_{\infty} - T_0} \right) T \text{ Tolerancia} \dots \dots \dots (\text{Ecuación 2})$$

$$\text{Número de Balance de Masa} = \left(\frac{W_{\text{mineral}} * W_{\text{regulo}}}{(W_{\text{flux}})^3} \right) \dots \dots \dots (\text{Ecuación 3})$$

$$\text{Número de Flux} = \left(\frac{\% W_{\text{carbonato}} * (100)^2}{\% W_{\text{silice}} * \% W_{\text{borax}} * \% W_{\text{litargirio}}} \right) \dots \dots \dots (\text{Ecuación 4})$$

$$\text{Número Termico} = \left(\frac{T - T_0}{T_{\infty} - T_0} \right) \dots \dots \dots (\text{Ecuación 5})$$

Número Estadístico = T Tolerancia..... (Ecuación 6)

Ley final de oro

El cálculo final para la Ley de oro por vía seca se realizará de la siguiente manera:

$$\text{Ley de Oro } \left(\frac{\text{g}}{\text{TM}} \right) = \frac{\text{Peso de oro (mg)}}{\text{Peso de muestra (g)}} \times 1000 \dots \dots \dots \text{ (Ecuación 7)}$$

Mineralogía del Mineral Aurífero

La caracterización mineralógica de esta muestra indica todos los minerales que han sido observados (Tabla 1).

Tabla 1. Minerales de la muestra Aurífera (Gagliuffi, 2015)

Minerales	Fórmula	Abreviaturas
Pirita	FeS ₂	Py
Calcopirita	CuFeS ₂	Cp
Esfalerita	SZn	Ef
Goetita	FeO.OH	Gt
Galena	PbS	Gn
Arsenopirita	AsFeS ₂	Apy
Boulangerita	Pb ₅ Sb ₄ S ₁₁	Boul
Enargita	-	En
Covelita	CuS	Cv
Oro	Au	Au
Tenantita	Cu ₃ AsS _{3,25}	tn
Bournonita	PbCuSbS ₃	Bnn
Rutilo	TiO ₂	Rt
Gangas	-	GGs

Distribución volumétrica

La distribución volumétrica realizada en esta muestra se ha hecho sobre la base de los minerales que han intervenido en el análisis modal (Tabla 2).

Tabla 2. Distribución volumétrica (Gagliuffi, 2015)

Minerales	Volumen porcentual
Pirita	45.30
Calcopirita	1.90
Esfalerita	8.90
Goetita	0.20
Galena	3.69
Arsenopirita	13.12
Boulangerita	1.15
Enargita	0.12
Covelita	0.06
Oro	0.00
Tenantita	0.95
Gangas	25.48

Grados de liberación

Los grados de liberación que presenta el mineral que ha intervenido en el análisis modal de la muestra, nos indican las diferentes dificultades que se han encontrado durante la etapa de la molienda, dichos grados de liberación son proporcionados en porcentajes y son como a continuación son indicados en la Tabla 3.

Minerales	Grado de liberación %
Pirita	95.06
Calcopirita	84.21
Esfalerita	79.28
Goetita	100.00
Galena	71.20
Arsenopirita	93.90
Boulangerita	76.90
Enargita	0.00
Covelita	0.00
Oro	0.00
Tenantita	85.10
Gangas	97.50

Micrografías

A continuación, se muestran las micrografías tomadas durante el estudio que son muestras fehacientes de lo observado (Figuras 1 – 4).

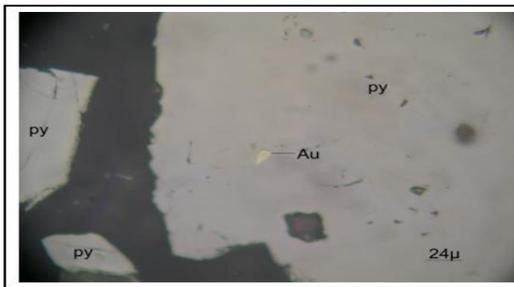


Figura 1. Partículas libres de pirita (py) y partículas entrelazadas de pirita (py) y oro (Au) Magnificación: 500X

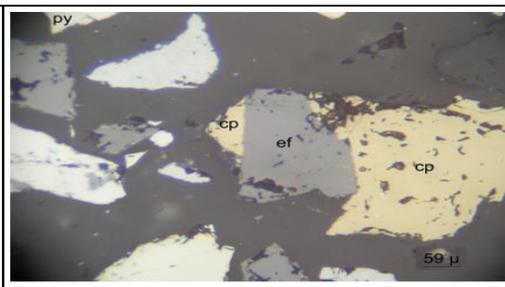


Figura 2. Partículas libres de pirita (py), esfalerita (ef) y partículas entrelazadas de calcopirita (cp) y esfalerita (ef). Magnificación: 200X

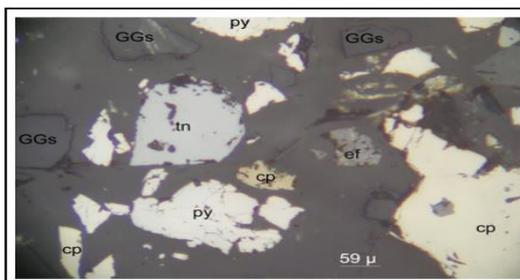


Figura 3. Partículas libres de pirita (py), calcopirita(cp), gangas(GGs) y tenantita (tn) y partículas entrelazadas de calcopirita (cp) y Gangas(GGs). Magnificación: 200X

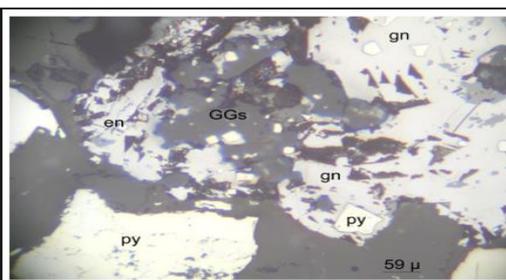


Figura 4. Partículas libres de pirita (py) y partículas entrelazadas de galena (gn), enargita (en), gangas (GGs) y pirita(py). Magnificación: 200X

El área de Laboratorio químico metalúrgico en la planta de Arequipa, está dividido en 3 secciones: preparación de muestras, pruebas metalúrgicas y análisis químico. El diagrama de flujo nos muestra las etapas a seguir para el análisis de oro mostrado en la Figura 5.

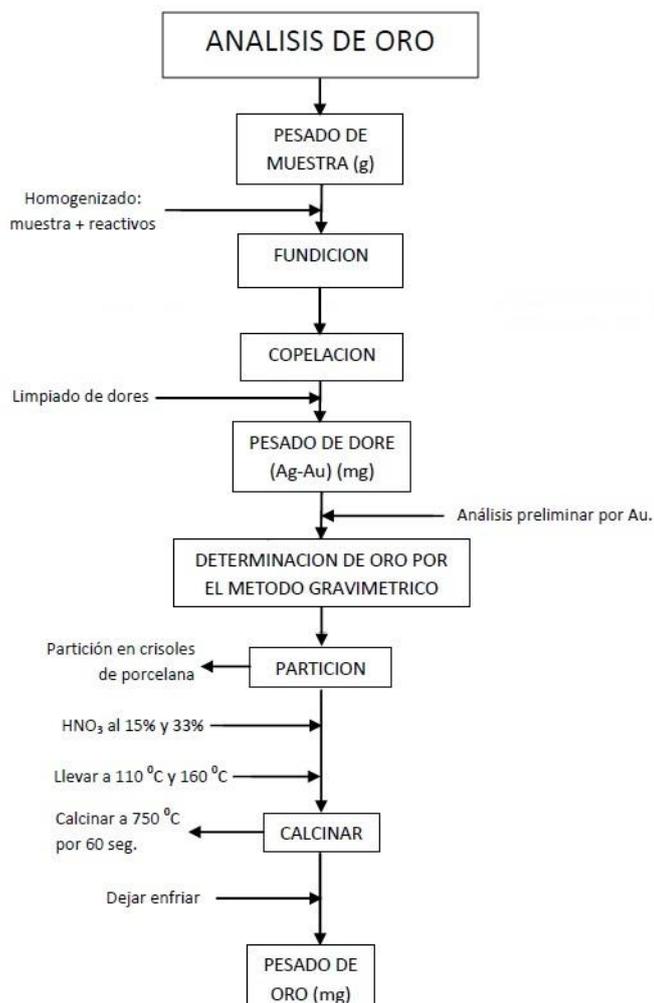


Figura 5. Diagrama de flujo de una empresa estándar (elaboración propia).

PROCEDIMIENTOS

Antes de iniciar siempre mantener el área limpio y ordenado para que no haya contaminación ni errores.

Codificación de Muestras

Una vez que las muestras ya estén preparadas, se pasa a verificar que estén correctamente codificadas de acuerdo al requerimiento, luego se transcriben al cuaderno de reportes especificando el tipo de análisis que requiere el cliente.

Alistar los crisoles enumerándolos correlativamente de acuerdo a la cantidad de ensayos a realizar (Figura 6), si se va a analizar oro, plata o pruebas metalúrgicas según que nos vaya a pedir el cliente. (Para plata se utiliza crisoles nuevos).

Mezclamos y homogenizamos el flux de acuerdo a las cantidades establecidas. Ordenamos y enumeramos los crisoles adicionando 150 gr de fundente aprox (Figura 6)



Figura 6. Preparación e crisoles (izquierda) y homogenización del flux (derecha)



Figura 7. Dosificación del flux en los crisoles y enumerarlos. Elaboración propia.

Pesado y dosificación de muestras

Análisis de Newmont: el crisol ya con 150 gr. de fundente se pesa el mineral de cabeza (positivo + 150 malla) y por duplicado el fino (negativo – 150 malla).

Se dosifica la muestra adicionando harina o nitrato de potasio de acuerdo al tipo de mineral (si es óxido se adicionará harina, si en sulfuro se adicionará nitrato de potasio, la cantidad depende de la mineralogía propia del mineral, por la presencia de pirita y otros complejos).

Se pesa láminas de plata en caso sea el análisis por plata, o de lo contrario se adiciona gotas de nitrato de plata en solución mayormente a los gruesos.

Se adiciona una capa de bórax, cubriendo la muestra (Figuras 8 y 9).



Figura 8. Harina de potasio (izquierda) y homogenizado de muestra (derecha)



Figura 9. Pesado (izquierda) y aplicación (derecha)

Fundición

Una vez esté listo todos los crisoles lo trasladamos al horno (en cada horno se trabaja con 20 y 24 crisoles).

La temperatura se divide en tres fases 860°C por un lapso de 20 minutos 960 °C por un tiempo de 20 min. Y Por último 1080°C, por un tiempo de 30 min.

Durante este lapso de tiempo los metales oro y plata van hacer colectados por el óxido de plomo formándose el regulo de Plomo y los demás metales que estén asociados al tipo de mineral pasan a formar la escoria.

Terminado la fundición, pasamos al colado retirando los crisoles del horno, se vierte el contenido en las lingoteras cónicas que son limpiadas previamente.

Esperar que enfríe 2 min para romper la escoria con el martillo y extraer el regulo de plomo de la lingotera.

Limpiar el regulo con el martillo dándole forma de un cuadrado geométrico y lo llevamos a su tablero de acuerdo a su respectivo número de crisol que se ha fundido (Figura 10).



Figura 10. Fundido (izquierda) y chancado de régulos (derecha)

Copelación

Se limpian y enumeran las copelas en forma correlativa de acuerdo a la enumeración de los crisoles, antes de cada copelación se introducen al horno aproximadamente 20 min. (esto para eliminar el % de humedad), ya que las copelas tienen como finalidad de absorber el Pb. y todas las impurezas en un 98%, el resto se volatiliza.

La temperatura de copelación es de 950°C a 960°C Por un tiempo aproximado de 45 min. a 1 hora (si hay análisis de plata pasado 40 min. se va cuidando la copelación para que no se volatilice y pierda peso).

Cuando ha terminado la copelación se observa un botón brillante (Au, Ag) en la superficie de la copela, sacamos las copelas del horno dejamos enfriar y verificamos que estén ordenados correlativamente.

El botón obtenido se procede a laminar con la ayuda de un martillo con fin de laminarlo para un mejor contacto de temperatura y ataque uniforme (Figura 11).



Figura 11. Retirado de copelas

Partición o Ataque Químico

Se limpia los crisolitos de porcelana y se ordenan de acuerdo a sus números correlativamente.

Colocar el botón obtenido en su respectivo crisolito de porcelana.

Si se requiere el análisis de plata primero se pesa para poder descontar el valor de Au. y se procede atacar.

Vertemos a cada crisolito 5ml de ácido nítrico al 15%, lo llevamos a la plancha que está a una temperatura controlada de 140 °C por 15 a 20 min. aproximadamente para disolver la plata del botón, mientras va reaccionando este cambia de plateado a marrón.

Una vez que deje de reaccionar el botón se agrega unas gotas de ácido nítrico concentrado para asegurar el ataque por completo del dore.

Decantar la solución rica de nitrato de plata (AgNO_3) y lavar 3 a 4 veces con agua destilada.

Secar cuidadosamente el crisol llevando a la plancha de secado, luego se calcina 2 a 3 min aprox. Se observa un botón amarillo pálido de oro.

Se deja enfriar el crisolito, pesar el botón de oro en una micro balanza y calcular las leyes para cada muestra.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De un total de 20 muestras con el nuevo Flux propuesto, se obtuvo 17 leyes generados en el laboratorio UNMSM que están dentro del rango de tolerancia y 3 leyes que se encuentran fuera del rango de tolerancia porque el LCI = 5.271 gr/ton. y LCS = 6.255 gr/ton. Observamos en la Figura 15 linealidad en los resultados obtenidos en el laboratorio de la UNMSM y en la Figura 12 que representa las leyes obtenidas con el Flux actual (Figura 13), 14 leyes no son aceptadas y solo 6 leyes se encuentran dentro de las tolerancias.

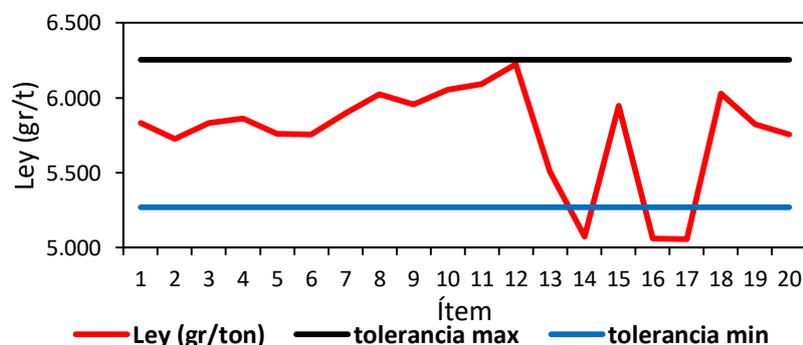


Figura 12. Leyes con el Flux Propuesto.

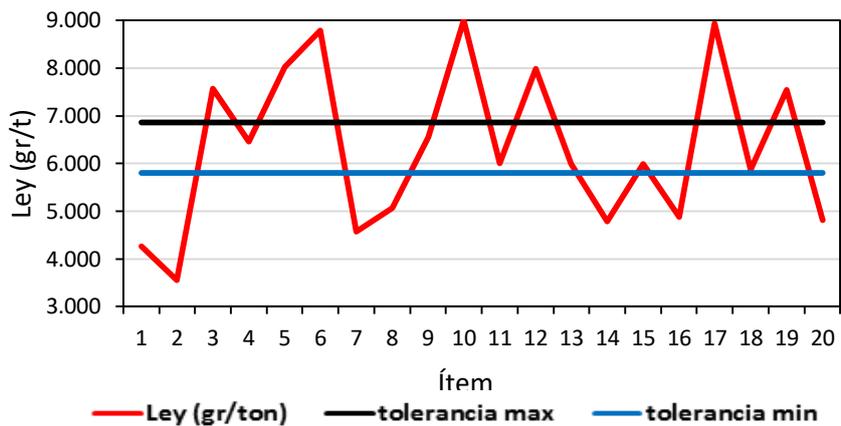


Figura 13. Leyes con el Flux Actual

Se observa que se ha mejorado notablemente la linealidad de los resultados, 85 % de las leyes con el nuevo Flux son aceptables y solo el 30% de las leyes con el Flux actual son aceptables.

Los números de Fusión Aurífera y Flux nos permiten hacer las distintas comparaciones en la preparación del Flux y en las comparaciones con otras experiencias de análisis de empresas mineras vinculadas con la producción del Oro. Ver Figuras del 14 al 17.

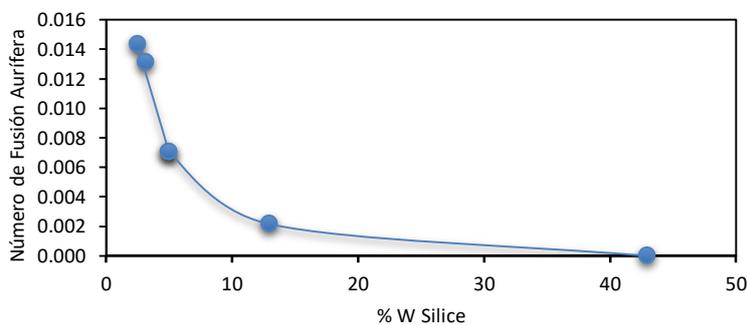


Figura 14. Número de fusión aurífera vs peso de sílice

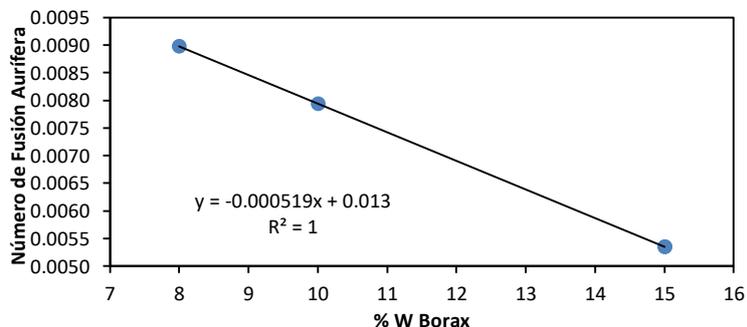


Figura 15. Numero de Fusión Aurífera VS Peso de Bórax

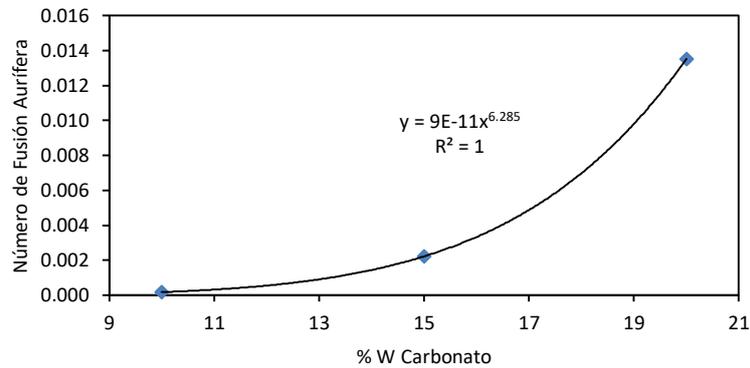


Figura 16. Numero de Fusión Aurífera vs Peso de Carbonato

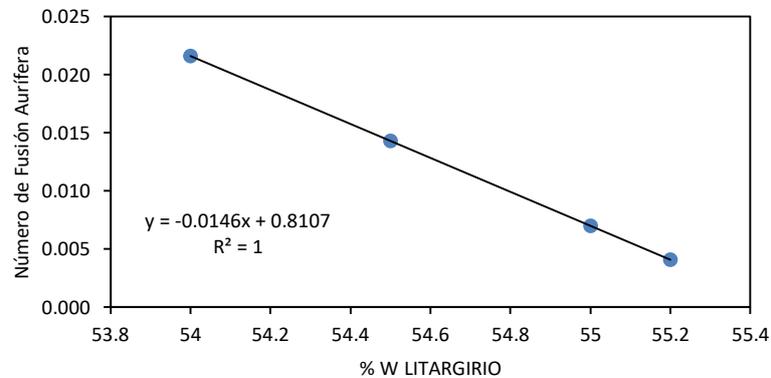


Figura 17. Numero de Fusión Aurífera vs Peso de Litargirio

CONCLUSIONES

Con una nueva concentración de flux se optimizan los resultados de la ley de oro, que se encuentran dentro de las tolerancias aceptables de 0.492 gr/ ton.

Se obtiene una mayor fluidez en el momento de la colada esto debido a la nueva composición del flux.

Se tiene un mejor análisis cuantitativo del oro para la muestra sulfurada, y se obtiene mejor reproducibilidad de las leyes de oro.

Podemos hacer las comparaciones entre distintas experiencias de análisis de otras empresas mediante el Número de Fusión Aurífera y el Número de Flux como operacionalizador de variables.

Agradecimientos

A la Escuela de Ingeniería Metalúrgica por el acceso a los Laboratorios de Metalurgia Extractiva y Piro metalurgia; al Ing. Lovera Dávila por su compromiso de sacar adelante este proyecto; a cada uno de los docentes y colegas que aportaron a nuestra formación y a nuestros familiares por su apoyo incondicional en la presente investigación.

Referencias

- Arévalo Duarte, Gloria Vanessa, (2016). Métodos Gravimétricos. Recuperado de <http://metodosgravimetricos2016.blogspot.com/>
- Arias L. A. (2015); Marco Macroeconómico Multianual 2016-2018. En: Sesión de Consejo de Ministros. Lima, Perú. Proyecciones. Lima, Perú: Ministerio de Economía y Finanzas del Perú. pp. 15-25
- Arias F. G. (2011). Metodología de la investigación en las ciencias aplicadas: un enfoque cuantitativo. Buenos Aires, Argentina. Recuperado de <http://www.efdeportes.com/efd157/investigacion-en-deporte-enfoque-cuantitativo.htm>
- Castro, J. A. (2015). Aplicación de la Técnica de Encartación por filtración en Métodos Gravimétricos y Absorción Atómica en Ensayos de Oro en el Laboratorio Químico de la Empresa Administradora Chungar S.A.C. Huancayo, Perú. Recuperado de <http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/UNCP/1008/Castro%20Dami%C3%A1n%20Jos%C3%A9%20Abraham.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Tantalean. G. (1972). Recursos Metalúrgicos – Metalurgia General II. Práctica de la fusión en las determinaciones analíticas cuantitativas. Pg. 201-210.
- Argueta H. E. (2014). Estudio sobre la verificación de condiciones ambientales seguras en el manejo de concentraciones altas de plomo en la prueba de ensayo al fuego para la determinación de oro y plata. Guatemala, mayo de 2014
- Londoño-Franco¹, L.F., Londoño-Muñoz, P., Muñoz-García, F.G. (2016). Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal.
- Lovera, D. (2019). Inf. Interno de Piro metalurgia. Escuela de Ingeniería Metalúrgica – UNMSM
- Lovera, D. (2019). Informes Internos de Piro metalurgia. Escuela de Ingeniería Metalúrgica – UNMSM. Recuperado de http://repositorio.unac.edu.pe/bitstream/handle/UNAC/1785/Hans_Tesis_T%C3%ADtuloprofesional_2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Lovera, D., Florencio, D. (1992). Historia, Procesos, Producción y Redes Metalúrgicas. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Pág. 13. Recuperado de <https://studylib.es/doc/4425929/historia--procesos--producci%C3%B3n-y-redes-metal%C3%BArgicas>
- Lozada, M., Iza, M. (2010). Estudio para el mejoramiento de la fusión de calcinas con el uso de carbonato de calcio en la carga fundente. Vol. 29. 1: 14 - 17.
- Marsden, J., House, L. (1960) The Chemistry of Gold Extraction. 2nd ed. Colorado, EE. UU: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration. 350 p.
- Ministerio de Energía y Minas del Perú (2017). Anuario Minero 2017: Estadísticas principales: Producción y Exportaciones del Oro. Lima: Dirección de Producción Minera. Pag.38; 52-55
- Misari, F., Franco, J. A. (1993) Metalurgia del Oro. Lima, Perú: Centros de estudios y promoción en ciencias de la tierra. Vol. 1. y Vol. 2
- Bustamante, M.. (2016) Redacción el tiempo. Método para detectar oro y plata fue patentado en Medellín. Recuperado de <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-16537923>
- Ramírez Oscco, Luis Alfredo, (2015). Biolixiviación del cobre en minerales sulfurados refractarios como proceso preliminar para la lixiviación de oro por cianuración. UNMSM. Recuperado de http://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/handle/cybertesis/5763/Ramirez_ol.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Cruz, A. (2013). Control de calidad en análisis de oro y plata realizados por ensayos al fuego en minerales. Tesis de pregrado. Fac. Ingeniería Química. Universidad Nacional del Callao. 89 pg.
- Mercado, J. L. (2013). Estudio comparativo de análisis de oro entre los métodos vía seca y vía

- húmeda en minerales concentrados. Tesis de pregrado. Fac. Ingeniería Química. Universidad Nacional del Callao. Perú. 167 pg.
- Castro, J. A. (2015). Aplicación de la técnica de encuarte por filtración en métodos gravimétrico y absorción atómica en ensaye de oro en el laboratorio químico de la empresa administradora Chungar S.A.C. Fac. Ingeniería Química. Universidad Nacional del Centro del Perú. 83 pg.
- Taopanta G. P. 2011. Análisis de oro y plata concentrados gravimétricos auríferos mediante ensayo de fuego utilizando cobre como colector. Colegio de Ciencias e Ingeniería. Universidad San Francisco de Quito. Ecuador. 145 pg.
- Salvador, R. (2017). La metalurgia inca: estudio a partir de las colecciones del Museo de América de Madrid. El Bulletin de l'Institut Français d'Études Andines. Recuperado de <https://journals.openedition.org/bifea/8155>
- Villachica, L.C. (2017). Fabricación, utilización, recuperación y reutilización de fundente ecológico para refinación de metales preciosos. vii Latino metalurgia Congreso Internacional en Cusco-Perú: Libro de Ponencias y Resúmenes. Pág. 62. Recuperado de <http://sim3cam.blogspot.com/2017/10/>
- Zapata D., Mejía, E. A. (s.f). Clasificación de los Métodos Gravimétricos. Recuperado de <https://sites.google.com/site/quimanalisisgravimetrico/home/teoria-del-analisis-gravimetrico/clasificacion-de-los-metodos-gravimetricos>