

“INFLUENCIA DEL NITRATO DE PLOMO EN LA
CINÉTICA Y RECUPERACIÓN DE PLATA EN LA
CIANURACIÓN DE UN MINERAL AURÍFERO DE
LA ENCAÑADA, CAJAMARCA 2022”

Tesis para optar el título profesional de:

Ingeniero de Minas

Autor:

Eder Jesus Gomez Rivera

Asesor:

M. Sc. Danyer Stewart Girón Palomino

<https://orcid.org/0000-0001-9322-7236>

Cajamarca - Perú

JURADO EVALUADOR

Jurado 1 (presidente)	Victor Eduardo Alvarez Leon	18034429
	Nombre y Apellidos	Nº DNI

Jurado 2 (Secretario)	Miguel Ricardo Portilla Castañeda	45209190
	Nombre y Apellidos	Nº DNI

Jurado 3 (Integrante)	Gladys Sandi Licapa Redolfo	41379556
	Nombre y Apellidos	Nº DNI

DEDICATORIA

A mi familia, que son el impulso más grande de mi vida, gracias por todo el amor, cariño y paciencia que me dan.

A mis padres, esposa, hija, hermanos que me apoyan y me alientan a seguir adelante en mi vida profesional.

AGRADECIMIENTO

A Dios sobre todas las cosas, por darnos bienestar y salud. A mis padres y esposa por el apoyo brindado, paciencia y dedicación. A mi hija Sigrid que es la luz que ilumina mis días. A la Universidad Privada del Norte y a la Escuela profesional de Ingeniería de minas por brindarnos los conocimientos para realizar este estudio. Al asesor por su orientación, sugerencias y el apoyo para la redacción de esta tesis.

TABLA DE CONTENIDO

JURADO EVALUADOR	2
DEDICATORIA	3
AGRADECIMIENTO	4
TABLA DE CONTENIDO	5
INDICE DE TABLAS	7
ÍNDICE DE FIGURAS	8
RESUMEN	9
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	10
1.1. Realidad problemática.	10
1.2. Formulación del problema	23
1.3. Objetivos	23
1.1.1. Objetivo Principal	23
1.1.2. Objetivos Específicos.	23
1.2. Hipótesis	24
CAPITULO II METODOLOGÍA	25
2.1. Tipo de investigación.	25
2.2. Recepción y preparación mecánica de muestras	27
2.3. Equipos herramientas materiales y reactivos.	34
2.4. Descripción de las pruebas de lixiviación	35
2.5. Aspectos éticos:	36
CAPÍTULO III: RESULTADOS	38
3.1. Evaluación del efecto del nitrato de plomo en un mineral oxidado y sulfurado en distintas proporciones para la recuperación de plata.	38
3.2. Probar el efecto del nitrato de plomo en distintas proporciones y evaluar la recuperación de plata.	40
3.3. Determinar los mecanismos de disolución propuestos y compuestos que forma el nitrato de plomo en el proceso de la lixiviación de minerales para la recuperación de plata.	42
CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	47

4.1.	Discusión de resultados.	47
4.2.	Conclusiones	49
	REFERENCIAS	51
	ANEXOS	52

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Cuadro de resumen de pruebas efectuadas utilizando nitrato de plomo	19
Tabla 2: Resultado de las pruebas de cianuración.....	20
Tabla 3: Tipos de investigación	25
Tabla 4: Caracterización química de las muestras.	27
Tabla 5: Análisis granulométrico - Zona 01	32
Tabla 6: Análisis granulométrico - Zona 02	32

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1:Diagrama esquemático del circuito de molienda y lixiviación	13
Figura 2:Efecto de la adición del nitrato de plomo	13
Figura 3:Efecto del oxígeno y el nitrato de plomo (Mina Mouska).....	14
Figura 4: Efecto del oxígeno y nitrato de plomo en la lixiviación del mineral de mejillón blanco ...	16
Figura 5:- Efecto del oxígeno y nitrato de plomo en la lixiviación del mineral de la mina Sadiola. .	17
Figura 6: Zona 01 - Mineral sulfurado.	28
Figura 7: Zona 02 - Mineral Oxidado.	28
Figura 8: Procedimiento de chancado de mineral	29
Figura 9:Chancadoras de quijadas.	29
Figura 10:Diagrama del homogenizado y cuarteo de mineral	30
Figura 11: Cuarteador automático.	31
Figura 12: Pulverizadoras de disco	31
Figura 13: Porcentaje de peso acumulado	33
Figura 14: Tamizadora de mineral.....	33
Figura 15: Cargado de botellas	35
Figura 16: Rodillo de botellas	35
Figura 17:Lixiviación en jarras	36
Figura 18:Mineral oxidado	38
Figura 19:Mineral sulfurado	39
Figura 20: Mineral sulfurado-efecto Ag	40
Figura 21: Mineral sulfurado-Efecto Au	41
Figura 22: Mineral sulfurado-Efecto Cu.....	42
Figura 23:Mecanismo de disolución.....	46

RESUMEN

En la presente investigación se tuvo como objetivo evaluar la influencia del nitrato de plomo en la cinética y extracción de plata en la cianuración de un mineral aurífero de la encañada, la investigación tuvo una orientación aplicativa y de nivel cuantitativo experimental, las variables en estudio se describen en el objetivo planteado (Uso de distintas dosificaciones de nitrato de plomo que afectan la recuperación plata en minerales auríferos), en cuanto a la población se eligió un mineral de la zona de La Encañada de la cual se seleccionaron 15 muestras en función al contenido Ag, S, Au; dichas muestras fueron preparadas mecánicamente y posteriormente se desarrollaron pruebas de cianuración modificando concentraciones de nitrato de plomo desde aproximadamente 50 hasta 400 g/t. En la experiencia de lixiviación sin nitrato de plomo se logró una recuperación de 63.9%, mientras que agregando el $Pb(NO_3)_2$ se obtuvo un máximo de 88.8% teniendo un aumento significativo de 24.9%, lo cual valida la hipótesis y abre un campo interesante de estudio. Para un mineral oxidado prácticamente no se tuvo efecto, esto se puede entender por el mecanismo electroquímico que genera el $Pb(NO_3)_2$. Las teorías fueron evolucionando referente al entendimiento del mecanismo de lixiviación, pruebas microscópicas del análisis de superficies indican que producto de la reacción se forman hidróxidos de plomo. Un hallazgo importante fue el comportamiento del Cu, sin la adición del $Pb(NO_3)_2$ se disolvió 26.6% y agregando el $Pb(NO_3)_2$ se obtuvo 44.9 teniendo un incremento de 18.3%, es importante mencionar que si se realiza una dosificación excesiva de $Pb(NO_3)_2$ en la lixiviación, el aumento de Cu será perjudicial para el proceso.

PALABRAS CLAVES: Nitrato de Plomo, Lixiviación, Recuperación de Plata.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática.

En el presente estudio se abordó un problema común que se presentaban en las plantas minero metalúrgicas; por un lado, se investigó factores que afectan la cinética de disolución de plata y oro, es decir la velocidad a la que se desarrollan las reacciones químicas y por otro lado, el incremento o mejora de la recuperación total. Ambos aspectos la cinética y la recuperación de los metales de interés, son parte fundamental para el negocio minero, si se mejora la cinética se tiene como respuesta la reducción de los tiempos de residencia y posibilitaría un incremento de la capacidad de la planta y la recuperación total. Impactaría directamente en la producción o recuperación de metales y por consiguiente en los ingresos y ganancias de las plantas o negocio minero.

Un futuro bajo en carbono requiere un aumento sustancial en la producción de minerales y metales. Para asegurar el cumplimiento de objetivos de desarrollo sostenible en América Latina y el Caribe, esta mayor producción debe ser motor de una transformación productiva generadora de empleo de calidad, mayores capacidades tecnológicas y de la implementación de mejores y más efectivas prácticas para proteger el medio ambiente y las comunidades. En ese sentido, los países que hagan un esfuerzo por identificar y aprovechar las oportunidades que este contexto implica podrán capturar en mayor medida el valor compartido que se puede generar en torno a la minería, implementando los ajustes necesarios para hacerlo posible. En efecto, nos encontramos frente a una nueva ventana de oportunidad que exige de manera urgente actuar de forma colectiva para liderar el tránsito hacia una minería que además de competitiva, segura, sea inteligente, inclusiva y sostenible. (Walter, M., Sucre C., Unzueta A., Nunes da Cunha, N. 2022). Tal como indican los autores,

requerimos mejorar la eficiencia de utilización de los recursos e ir a una minería más competitiva y segura.

Antecedentes Internacionales:

En la publicación se revisan los esfuerzos para mejorar la recuperación del uso de nitrato de plomo en la cianuración. El estudio se basa en un enfoque electroquímico para establecer la naturaleza de los mecanismos relacionados con el oro, un estudio de análisis de superficie, utilizando espectroscopía de fotoelectrones de rayos X (XPS), para determinar las modificaciones en minerales de oro y sulfuros (pirita, pirrotita y calcopirita), En una solución de cianuro, el nitrato de plomo, el sulfuro de plomo y el sulfito de plomo reaccionan con el oro para formar compuesto de oro (AuPb_2 , AuPb_3) y plomo metálico, que claramente aceleran la disolución del oro. La naturaleza de los minerales de sulfuro afecta la formación de plomo o aleaciones de plomo en la superficie de oro. XPS no encontró plomo en la superficie del oro en presencia de pirita o pirrotita, pero encontró una capa muy delgada (50 Å) en presencia de calcopirita. Se requiere más investigación para estudiar el efecto de la presencia de otros sulfuros. Se propone que, en presencia de minerales de sulfuro a veces el plomo no se compara con el oro debido a su alta afinidad por los minerales de sulfuro (reacciones de competencia). La pirita, la calcopirita y la pirrotita mostraron diferentes mecanismos de reacción con el nitrato de plomo. El nitrato de plomo forma una capa de hidróxido sobre las partículas de pirita, lo que reduce la velocidad de reacción con el cianuro. En la disolución de la pirita genera una capa de azufre sobre el oro. Esta capa es menos importante en presencia de plomo. El efecto del nitrato de plomo es más sutil para la calcopirita y la pirrotita porque fue menos eficaz para retardar la reacción de los sulfuros con el cianuro y la reacción del hierro con el oxígeno. Para el oro, la adición de nitrato de plomo tiene el mismo efecto con la pirrotita que con la pirita; inhibiendo parcialmente la formación

de una capa de azufre. Esto no se observó para el oro en el sistema de calcopirita. Los resultados indican que la estrategia de adición de nitrato de plomo, para ser óptima, debe estar en función de la composición mineralógica del mineral. La formación de una capa pasiva sobre las partículas de oro tiene una influencia significativa en las etapas iniciales de la lixiviación. La adición de nitrato de plomo disminuyó notablemente su efecto inhibitor. En un estudio científico, el tratamiento con nitrato de plomo incrementó la extracción total de oro y disminuyó el consumo de cianuro. G. Deschenes, R. Lastra, J.R. Brown, S. Jin, O. May, E. Ghali, (2000).

En la operación minera Musselwhite ubicada en el norte de Ontario, Canadá, se procesa un mineral de oro de molienda libre a 5.5 - 5.8 g/t Au y 4.2% de pirrotita. Se realizó una investigación de laboratorio para mejorar la cianuración. Una lixiviación con 8 ppm de oxígeno disuelto produjo solo un 82,3% de extracción de oro con un consumo de NaCN de 0,29 kg/t. La adición de nitrato de plomo, directamente a la lixiviación, mostró una extracción de oro del 94,2% con solo 0,16 kg/t de consumo de NaCN. Se obtuvo una extracción de oro de 95.0% agregando oxígeno con nitrato de plomo. Se encontró que los resultados de laboratorio eran similares a la práctica actual de la planta. Los datos de la planta indicaron que la mejora de la cinética de lixiviación ha dado como resultado un aumento del 0,61% de la recuperación de oro, del 95,20% en 1999 al 95,81% en 2000. Se sabe que la presencia de pirrotita en los minerales de oro tiene un impacto negativo en la disolución del oro y en el consumo de cianuro. (Deschênes. G, Hall. D, and Fulton. M - 2003).

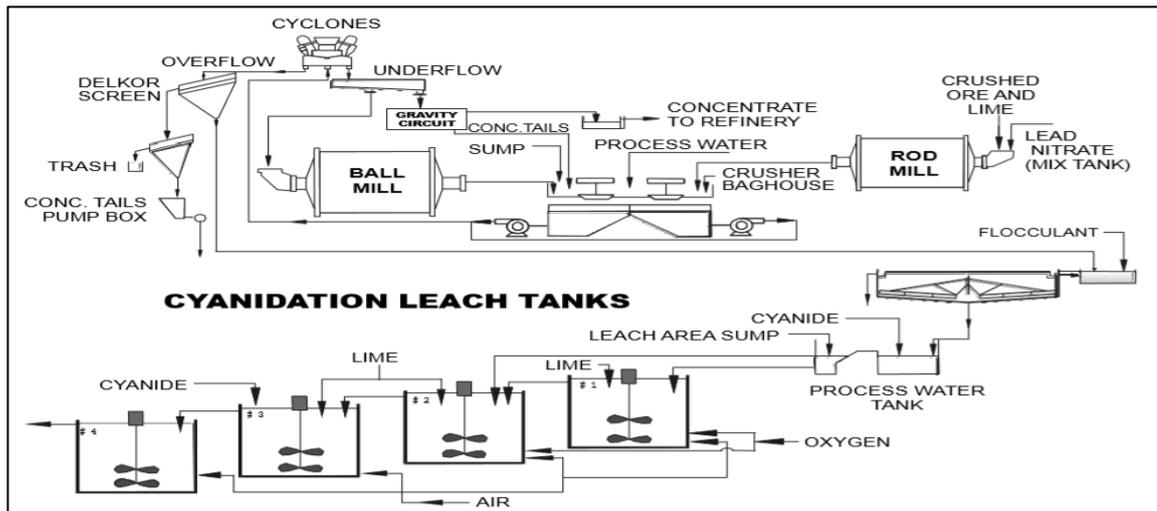


Figura 1: Diagrama esquemático del circuito de molienda y lixiviación

El uso de nitrato de plomo aumenta considerablemente la cinética de disolución de oro, como se muestra en la Figura 2. Se obtuvo una extracción de oro del 93,9% en 24 horas con la adición de 50 g / t de nitrato de plomo en comparación con el 78,1% sin nitrato de plomo.

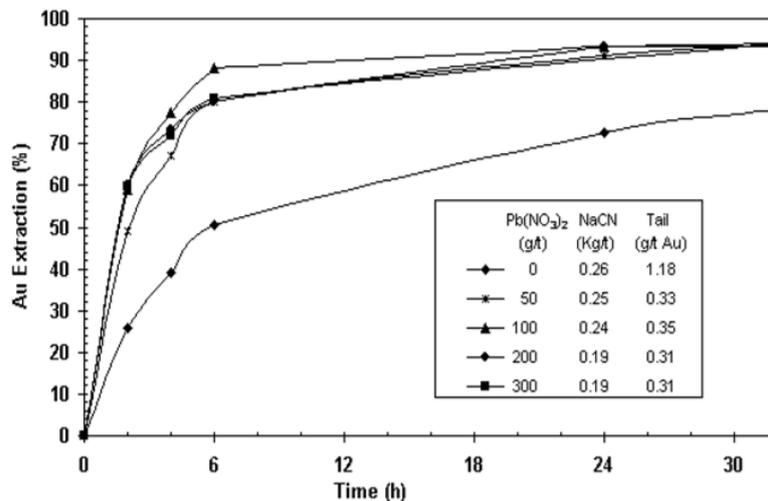


Figura 2: Efecto de la adición del nitrato de plomo

Efecto de la adición de nitrato de plomo en la lixiviación de un mineral de oro que contiene pirrotita (Cianuración: pH 11.2, 380ppm NaCN, 8ppm O₂, 32h)

Mina Mouska, ubicada en el noroeste de Quebec, produce un mineral de cobre y oro que se mezcla y procesa en la planta de cianuración de Yvan Vezina. La muestra utilizada en este estudio consistió principalmente en minerales de ganga (92%). Hubo una cantidad significativa de calcopirita (1.16%), con una cantidad menor de pirrotita y trazas de esfalerita y marcasita. El oro ocurre principalmente como electrum y oro metálico. Se encapsuló algo de oro en pirrotita y silicatos (1%). El contenido de oro fue de 9.95 g/t y la molienda fue de $P_{90} = 75 \mu\text{m}$.

La cinética de lixiviación más rápida se obtuvo con un pretratamiento de 30 minutos con nitrato de plomo de 200 g / t, seguido de cianuración con una OD de 15 ppm. La extracción total de oro del 96,8% se alcanzó en aproximadamente 36 horas.

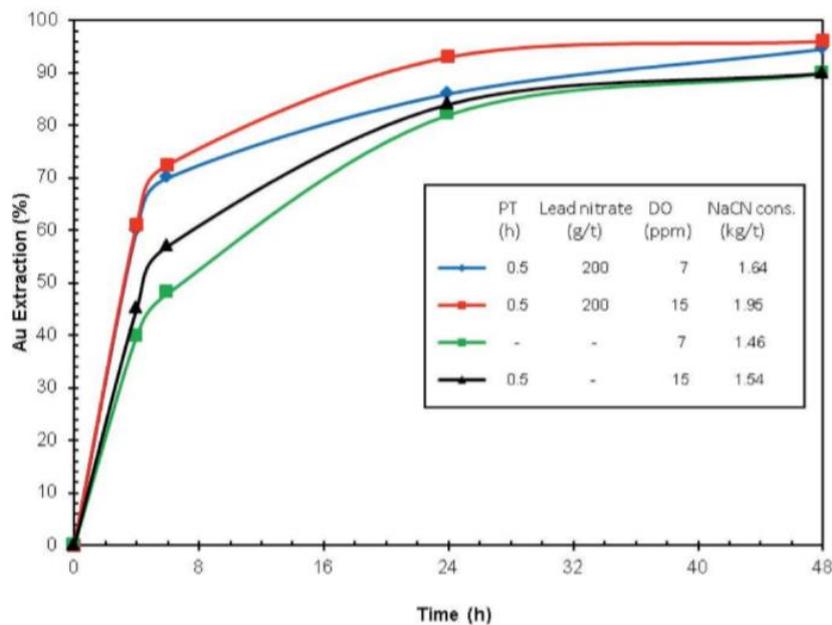


Figura 3: Efecto del oxígeno y el nitrato de plomo (Mina Mouska)

Efecto del oxígeno y el nitrato de plomo en la lixiviación de oro del mineral de la mina Mouska. Pretratamiento 30 min; cianuración: NaCN 700 ppm, pH 10.5.

El efecto de la concentración de cianuro se evaluó usando un pretratamiento con 200 g/t de nitrato de plomo y control de OD a 15 ppm durante la lixiviación. La extracción de oro (96.6%) no fue influenciada por la concentración de cianuro entre 640 a 840 ppm de NaCN

Mina de oro Sadiola Hill; ubicada en Malí, opera una planta de cianuración / carbono en pulpa (CIP) con un rendimiento de 15,000 t/d para un total de 5.4 Mt/a. Mientras que el 96–97% de recuperación de oro se obtuvo al procesar el mineral de óxido de molienda libre, las pruebas indicaron una disminución significativa de la extracción de oro (70–80%) de los minerales de sulfuro. Debido al corto tiempo de retención en el circuito de lixiviación (18 horas), la optimización de la velocidad de lixiviación de oro es crítica. El mineral de sulfuro contiene 4,96 g/t Au y tiene un P80 de 75 μm . La mayor parte del oro es libre y parte está encapsulada en sulfuros. La caracterización mineralógica indicó que el mineral consistía en 95.9% de minerales de ganga, 2.5% de pirita, 1.2% de arsenopirita, 0.2% de pirrotita y estibnita y berthierita menores (<0.1%).

La Figura 3 muestra que la cianuración con 380 ppm de NaCN y 8 ppm de OD produce una cinética de lixiviación lenta con una extracción general de oro del 79,1% en 48 horas y un consumo de cianuro de 0,28 kg/t. El aumento de la concentración de OD a 16 ppm mejoró significativamente la cinética de lixiviación y la extracción de oro alcanzó el 93,7% con un consumo de cianuro de 0,29 kg / t. La cinética de lixiviación se mejoró aún más al agregar 50 g / t de nitrato de plomo directamente a la lixiviación, con una extracción total de oro del 94,2% en 32 horas. También se observó una reducción del 20% en el consumo de cianuro (0.29 kg/t a 0.23 kg/t).

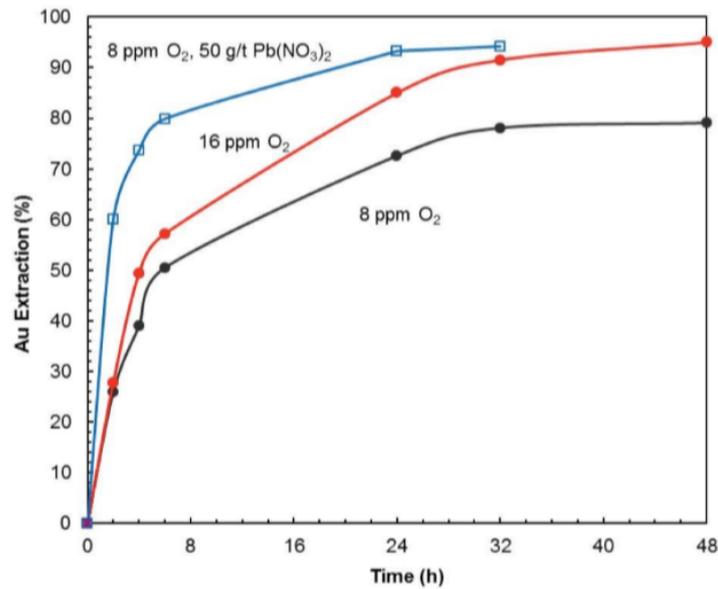


Figura 4: Efecto del oxígeno y nitrato de plomo en la lixiviación del mineral de mejillón blanco

Efecto del oxígeno y nitrato de plomo en la lixiviación del mineral de mejillón blanco. 380 ppm de NaCN, pH 11.2

La Figura 5 ilustra tres modos de lixiviación: OD de 16 ppm en un pretratamiento de 2 horas; OD de 16 ppm con 350 g / t de nitrato de plomo en el pretratamiento, y OD de 8 ppm con 300 g / t de nitrato de plomo en el pretratamiento. La cinética de lixiviación más rápida se obtuvo utilizando un OD de 8 ppm con 300 g / t de nitrato de plomo. El equilibrio se alcanzó en 20 horas con una extracción total de oro del 80.0%. Aumentar el OD en el pretratamiento a 16 ppm junto con la adición de nitrato de plomo no produjo ninguna ventaja. La variación en la tasa de lixiviación es una indicación de que la pasivación de los granos de oro ocurrió en diferentes niveles. La lixiviación con la adición de nitrato de plomo al comienzo de la cianuración, sin un tratamiento previo, disminuyó la extracción de oro en un 3,0%. Extender el pretratamiento a 4 horas también disminuyó la extracción de oro en un 2.8%. (Deschênes. G – 2015)

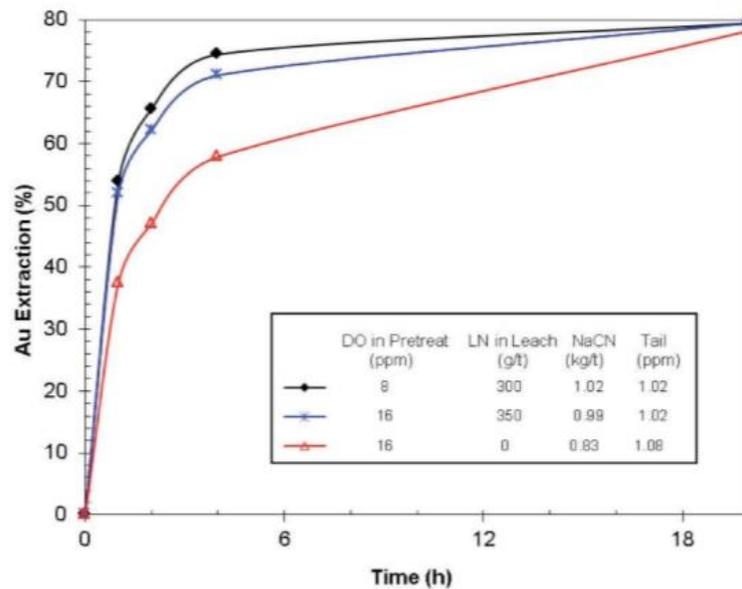


Figura 5:- Efecto del oxígeno y nitrato de plomo en la lixiviación del mineral de la mina Sadiola.

Efecto del oxígeno y nitrato de plomo en la lixiviación del mineral de oro de la mina Sadiola. Pretratamiento: pH 8, 2 horas; cianuración: 450 ppm NaCN, pH 10.2, OD 8 ppm, LN: nitrato de plomo

Antecedentes Nacionales:

En la investigación, “Cinética de lixiviación y recuperación de oro, de finos en la lixiviación por percolación con y sin aglomeración” demuestran la mejora en la cinética de lixiviación de mineral aurífero con la adición de nitrato de plomo, tanto en un mineral conteniendo pequeños porcentajes de arsénico y antimonio como en minerales que no contienen estos elementos, en sus conclusiones indica que la recuperación en el tiempo que duró la primera prueba, con experiencia 1 y 3, fue de 42,29 % y de 46,35 %, pruebas sin nitrato; mientras que en las que se utilizó nitrato experiencia 2 y 4 fue de 53,31 % y de 50,49 %; sus resultados ratificaron su hipótesis de la mejora de la extracción con la adición de nitrato de plomo en el orden de aproximadamente 6%. (Huere, L., 2019).

Compañía Minera Ares - Perú; ubicada a 280 Km. al noreste de la ciudad de Arequipa la mineralización de, Ares se halla hospedada en vetas que se emplazan en rocas volcánicas del Mioceno medio e inferior. La mineralización tiene una baja relación Ag/Au de alrededor de 20. Los minerales de ganga son predominantemente del grupo de la sílice, mientras que la mena se encuentra en pirita y principalmente como Au nativo, electrum, y sulfuros y sulfosales de Ag.

El mineral con contenido de Au (6 g/TM) y Ag (156.0 g/TM) extraído por minado subterráneo es tratado en la planta de beneficio a razón de 42 TM/h, por proceso de cianuración convencional. La planta cuenta con una sección de chancado (30" x 40"), un molino primario SAG 15,5' x 7' y una remolienda de bolas 9' x 13', el mineral por lo general de mina es directamente agregado a la tolva de finos y a continuación es suministrado a la faja de alimentación del molino SAG por medio de alimentadores vibratorios.

Según las pruebas experimentales preliminares que se realizaron se obtuvieron los parámetros operativos: tiempo de molienda 27'51" minutos, tamaño de partícula de 74% - 270 mallas y las pruebas de cinética establecieron un tiempo de lixiviación de 72 horas.

Las variables identificadas para lograr la optimización del proceso fueron la concentración de NaCN (0.2% - 0.3%), Nitrato de Plomo (170 g/TM – 190 g/TM) y el pH de la solución (10 ~ 11), la variación de cada una de estas permitió un mayor porcentaje de extracción de valores de oro y plata en el proceso.

PORCENTAJE EXTRACCIÓN DE ORO - PLATA									
Prueba	Cabeza (g/TM)		Ripio (g/TM)		% Extracción		Pb(NO ₃) ₂ (g/TM)	% NaCN	pH
	Au	Ag	Au	Ag	Au	Ag			
01	6.06	156.95	0.25	20.58	95.91	86.89	170.00	0.20	10
02	6.06	156.95	0.19	19.10	96.57	87.56	190.00	0.20	10
03	6.06	156.95	0.25	20.45	96.85	87.83	170.00	0.30	10
04	6.06	156.95	0.18	18.75	97.01	88.01	190.00	0.30	10
05	6.06	156.95	0.21	19.52	95.98	86.97	170.00	0.20	11
06	6.06	156.95	0.18	18.82	96.84	87.84	190.00	0.20	11
07	6.06	156.95	0.19	19.08	97.00	88.05	170.00	0.30	11
08	6.06	156.95	0.14	17.85	97.60	88.63	190.00	0.30	11
09	6.06	156.95	0.25	20.43	95.95	86.98	180.00	0.25	10.5
10	6.06	156.95	0.24	20.28	96.02	87.08	180.00	0.25	10.5
11	6.06	156.95	0.24	20.44	96.06	86.98	180.00	0.25	10.5

Tabla 1: Cuadro de resumen de pruebas efectuadas utilizando nitrato de plomo

Estudio del uso de nitrato de plomo para optimizar la recuperación de oro en el proceso de cianuración. Se sabe que el nitrato de plomo en el proceso de cianuración de oro, forma una capa de hidróxido en las partículas de pirita lo cual reduce la velocidad de reacción con el cianuro. La disolución de la pirita genera una capa de azufre en el oro. La adición de nitrato de plomo tiene el mismo efecto con la pirrotita que con la pirita; el cual es inhibir parcialmente la formación de una capa de azufre. Esto no se observó en el oro en el sistema de la calcopirita. Los resultados indican que para que la estrategia de agregar nitrato de plomo sea óptima debería realizarse en función de la composición mineralógica del mineral. La formación de una capa pasiva en las partículas de oro tiene una influencia significativa en las etapas iniciales de la lixiviación y la incorporación de nitrato de plomo disminuye notablemente este efecto inhibitor. En este estudio de tratamiento con nitrato de plomo se incrementa el total de oro extraído y disminuye el consumo de cianuro, optimizando la recuperación de oro y plata en la lixiviación de minerales, obteniendo mayores beneficios económicos. En la investigación se aplica el diseño factorial de tipo 2k, con el objetivo de

establecer un modelo matemático que describa la recuperación del oro y de la plata a partir del efecto del uso de nitrato de plomo, como catalizador en el proceso de cianuración.

(Bustinza V.)

Tabla 2: Resultado de las pruebas de cianuración

PORCENTAJE EXTRACCIÓN DE ORO - PLATA Y CONSUMO DE REACTIVOS									
Test	Cabeza g/t		Relave g/t		% Extracción		Pb (NO ₃) ₂ g/t	% NaCN	pH
	Au	Ag	Au	Ag	Au	Ag			
B - 1	6.98	213	0.26	27.02	96.31	87.49	180	0.20	10.8
B - 2	6.98	213	0.32	29.18	95.45	86.30	220	0.20	10.8
B - 3	6.98	213	0.27	26.65	96.10	87.49	180	0.30	10.8
B - 4	6.98	213	0.20	27.02	97.20	87.49	220	0.30	10.8
B - 5	6.98	213	0.26	31.52	96.30	85.20	180	0.20	11.2
B - 6	6.98	213	0.30	23.17	95.70	89.12	220	0.20	11.2
B - 7	6.98	213	0.29	24.79	95.80	88.36	180	0.30	11.2
B - 8	6.98	213	0.25	27.03	96.40	87.31	220	0.30	11.2
B - 9	6.98	213	0.30	25.84	95.69	87.87	200	0.25	11.0
B - 10	6.98	213	0.31	26.58	95.48	87.52	200	0.25	11.0
B - 11	6.98	213	0.31	26.88	95.55	87.38	200	0.25	11.0

Fuente: Elaboración Propia

En la tabla 2, se tiene, que a partir de estos resultados iniciales es posible advertir que para idénticas condiciones de las variables pH, tiempo de cianuración, y porcentaje de cianuro, se obtienen mayores recuperaciones de oro cuando se usan concentraciones variables de nitrato de Plomo.

Con estos antecedentes se pretende realizar pruebas de cianuración utilizando como catalizador el nitrato de plomo, con el propósito de evaluar la posibilidad de incrementar la cinética de recuperación y la recuperación de plata y oro en un mineral aurífero, ambas variables que son la constante preocupación y monitoreo en las faenas mineras auríferas.

1.1.1. Marco teórico:

Nitrato de plomo: Es un compuesto químico, un cristal incoloro o un polvo blanco y un oxidante muy estable y fuerte. Al contrario que otras sales de plomo(II), es soluble en agua.

El mecanismo de acción del Nitrato de Plomo paso a paso es el siguiente:

- El Pb se enlaza con el ion S^{2-} formando PbS, evitando que se forme una capa de sulfuro alrededor del oro y previniendo su disolución.
- El plomo (Pb) reacciona con las películas/recubrimientos de las partículas de oro/plata, ayudando a la disolución del mineral.
- Si el mineral contiene cobre (Cu), el nitrato de plomo evita la formación de la película de CuS, la cual es muy nociva para la disolución de oro y plata.

Esto brinda grandes beneficios al proceso;

- Se inhibe la disolución de sulfuros metálicos.
- Reduce el acomplejamiento del cianuro.
- Disminuye el consumo de cianuro.

El nitrato de plomo es un aditivo fundamental para favorecer la lixiviación del oro y plata.

Cinética Química: Para la química la cinética es el análisis de la velocidad con la cual se desarrolla distintos procesos, está centrada en la rapidez con que se lleva a cabo las reacciones.

La lixiviación: Es la disolución preferente de uno a más componentes de una mezcla sólida por contacto con un disolvente líquido. En el caso de la disolución del oro y plata, este se disuelve en una solución cianurada (generalmente con cianuro de sodio). Dependiendo de las condiciones de concentración del mineral de alta ley o mineral de baja ley y de sus características químicas y mineralógicas, (óxidos, sulfuros) la lixiviación puede realizarse utilizando procesos basados en la irrigación (en pilas, botaderos o in situ) o basados en la agitación (en reactores).

Cianuración: Es un proceso que sigue siendo usado para la extracción de metales preciosos tales como el oro y plata, en un medio alcalino utilizando el cianuro de sodio para minerales aurífero. El proceso químico de las reacciones se basa en condiciones oxidantes del oro y la plata, se disuelven y forman complejos en soluciones de cianuros alcalinos.

El mecanismo de la disolución de oro mediante cianuración: La velocidad inicial de la disolución de oro es en gran parte controlada por factores tales como las concentraciones de cianuro y oxígeno, pH, interfaz solido-líquido, Eh de la mezcla, álcalis, tamaño de partícula y la temperatura, La presencia de otros iones en disolución catalítica y la salinidad del agua también afectan la velocidad de lixiviación.

El uso de oxígeno o de un reactivo oxidante es esencial para la disolución de oro y plata en condiciones normales. Tanto el oro y la plata metálicos pueden ser recuperados de los minerales por procesos de lixiviación que utilizan cianuro para formar complejos estables.

Una vez obtenido el oro y la plata en la solución final de la lixiviación con cianuro de sodio, puede ser separado de la solución por diferentes métodos como son:

- Precipitación con polvo de zinc.

- Adsorción de carbón activado,
- Intercambio iónico, electrodeposición.

1.2. Formulación del problema

Tal como se indicó en los primeros párrafos, existe un constante desafío en todas las plantas metalúrgicas para lograr el incremento en la cinética de disolución de metales y en la recuperación total de los mismos, lo anterior es necesario y útil porque guarda una estrecha relación con los conceptos de sostenibilidad, necesitamos hacer los procesos más eficientes y óptimos, considerando que en la minería aurífera es no renovable. En los antecedentes técnicos se encuentra información variada y con resultados distintos para cada mineral aurífero, es decir la respuesta del nitrato de plomo es particular para cada mineral, esto nos invita a investigar más sobre el tratamiento particular de cada mineral y además sobre los mecanismos y teorías de disolución; finalmente, en la bibliografía no hemos encontrado información específica que reporten el comportamiento de la plata cuando se usa el nitrato de plomo, por todo lo anterior nos cuestionamos:

¿Cuál es la influencia del nitrato de plomo en la cinética y recuperación de plata en la cianuración de un mineral aurífero de la Encañada, Cajamarca 2022?

1.3. Objetivos

1.1.1. Objetivo Principal

- Evaluar la influencia del nitrato de plomo en la cinética y recuperación de plata en la cianuración de un mineral aurífero de la encañada, Cajamarca 2022.

1.1.2. Objetivos Específicos.

- Determinar si existe alguna diferencia en la cinética de la plata al agregar nitrato de plomo en la cianuración de un mineral aurífero.

- Determinar si existe alguna diferencia en la recuperación de la plata al agregar nitrato de plomo en la cianuración de un mineral aurífero.

1.2. Hipótesis

Hipótesis general

- El uso del nitrato de plomo influye en la cinética y recuperación de plata en la cianuración de un mineral aurífero de la encañada, Cajamarca 2022.

Hipótesis específicas.

- El nitrato de plomo muestra un efecto en la cinética de un mineral sulfurado, pero en un mineral oxidado no presenta efecto.
- El mecanismo de disolución que forma el nitrato de plomo en la lixiviación de minerales sulfurados afecta de forma positiva para la recuperación de plata

CAPITULO II METODOLOGÍA

2.1. Tipo de investigación.

El tipo de investigación según su nivel, se puede apreciar en la Tabla 1, donde se describe el criterio de la investigación, su tipo y la razón que determinó este procedimiento.

Tabla 3: Tipos de investigación

Criterio	Tipo de investigación	Razón
Según el propósito	Aplicada	Su objetivo es determinar un problema específico, es decir la recuperación de plata con el uso de nitrato de plomo.
Según la profundidad	Explicativa	Explica el comportamiento de las variables, modificaremos la variable independiente que será las distintas dosis de nitrato y veremos los efectos sobre la recuperación y cinética de disolución de plata.
Según su naturaleza de datos	Cuantitativa	Estudia y analiza la realidad del problema basándose en expresar los resultados en cifras, tales como recuperaciones y comportamientos cinéticos en el tiempo.
Según la manipulación de variable	Experimental	Es experimental debido a que tenemos el control de la variable independiente, que en este caso es el nitrato de plomo, la cual modificaremos para obtener distintas respuestas en la variable dependiente que es la recuperación y el comportamiento cinético de la reacción.

Fuente: Guía de investigación científica UPN 2018.

Si tomamos en cuenta el propósito la presente investigación es debido a que el objetivo principal de la presente investigación procura enmarcar un problema específico. (Hernández. P, 2014, p 40), el cual es el incremento de la recuperación y cinética de reacción con el uso de nitrato de plomo

En el criterio de profundidad, la presente investigación tiene la clasificación de carácter explicativo, porque que analiza y explica cada una de las variables en estudio. (Hernández. P y colaboradores, 2014, p. 34).

Por su naturaleza la presente investigación es considerada de carácter cuantitativa, ya que los datos observados y recolectados fueron debidamente procesados y se presentan las mediciones a través de cálculos y balances de materia para cada prueba. (Hernández. P y colaboradores, 2014. p.89).

Debido a que las variables fueron modificadas en las distintas experiencias, el presente estudio es del tipo experimental ya que el investigador manipula las variables del experimento. (Hernández. P y colaboradores, 2014. p.25).

Carácter aplicado, la presente investigación corresponde a un diseño de corte transversal, lo que indica que la toma de datos o toma de muestras, se dio en único momento del estudio. (Hernández. P y colaboradores, 2014. p.98).

Para la presente investigación, la población está constituida por los minerales auríferos ubicados en la ciudad de Cajamarca, y específicamente dentro del distrito minero de la Encañada, en la sierra norte del Perú. Jakson Vilchez, Karin Dávalos, Richard Pilco y Jesús Reyes (2010)

Las 15 muestras obtenidas de campo, fueron tomadas por un Equipo de Geología con experiencia en el muestreo, ellos desarrollaron composites y recomendaron una serie de

muestras. Las 15 muestras fueron analizadas y seleccionadas considerando el principal criterio de selección, los contenidos de azufre, tal así que podamos estudiar el comportamiento del nitrato de plomo en la cinética y recuperación de la plata.

Tabla 4: Caracterización química de las muestras.

CODIGO DE MUESTRAS	AuFA g/t	Ag g/t	Cu g/t	C-total LECO_CS %	C-carb LECO_CS %	S-total LECO_CS %	SS2 LECO_CS %	SS -RES (sulfuro) %
Zona 01	5.00	87.07	2596.5	0.02	0.02	0.634	7.541	6.907
Zona 02	1.27	23.76	780.86	0.02	0.02	0.698	1.954	1.256

El procedimiento que se realizó para la recolección de datos inició con la búsqueda de información relacionada a cada una de las variables (VI: Uso del nitrato de plomo en la lixiviación de minerales auríferos y VD: para el incremento de la recuperación plata), posteriormente se buscó información de artículos que contenían ambas variables, se buscó en revistas científicas, repositorios de universidades de tesis ya elaboradas concernientes al tema el uso de nitrato de plomo para el incremento de la recuperación de plata, de diferentes universidades, informes, publicaciones, revistas entre otros, como se lista en la bibliografía.

2.2. Recepción y preparación mecánica de muestras

Para la preparación de las muestras se utilizó diversos procesos el cual se describe por etapas:

Recepción de muestras: Procesos mediante el cual podemos identificar y clasificar los minerales para su posterior análisis y desarrollo de prueba metalúrgicas solicitadas.

Para la ejecución de estas pruebas utilizamos 2 muestras: Zona 01-Mineral sulfurado y Zona 02-Mineral oxidado.



Figura 6: Zona 01 - Mineral sulfurado.



Figura 7: Zona 02 - Mineral Oxidado.

Chancado de mineral: Es una operación mecánica mediante la cual se disminuye el tamaño de las rocas mineralizadas, triturándolas en chancadoras de quijadas, cónicas o cualquier elemento diseñado para este fin (combo, martillo, etc.).

Diagrama de operaciones del Chancado de Mineral

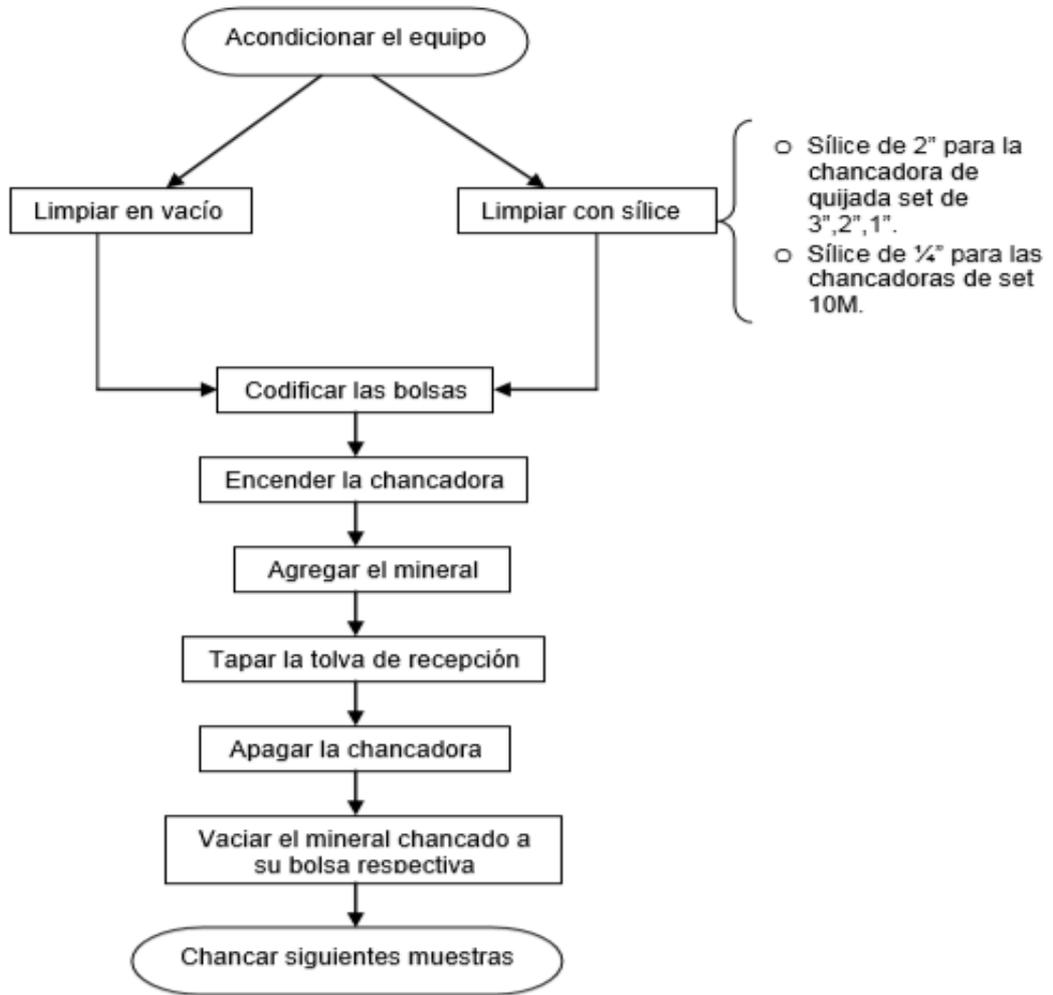


Figura 8: Procedimiento de chancado de mineral



Figura 9: Chancadoras de quijadas.

Homogenizado y Cuarteo de Muestras:

Homogenizado: Operación que consiste en mezclar todo el material con la finalidad de conseguir un producto uniforme.

Cuarteo: Operación mecánica que se realiza para dividir una muestra de mineral en porciones aproximadamente iguales en peso y representativas a la muestra original.

Para realizar esta etapa se utilizó un cuarteador automático donde se desarrolló el homogenizado como el cuarteo del mineral chancado a malla N°-10 (2000 micras).

Diagrama de operaciones del homogenizado y cuarteo de mineral.

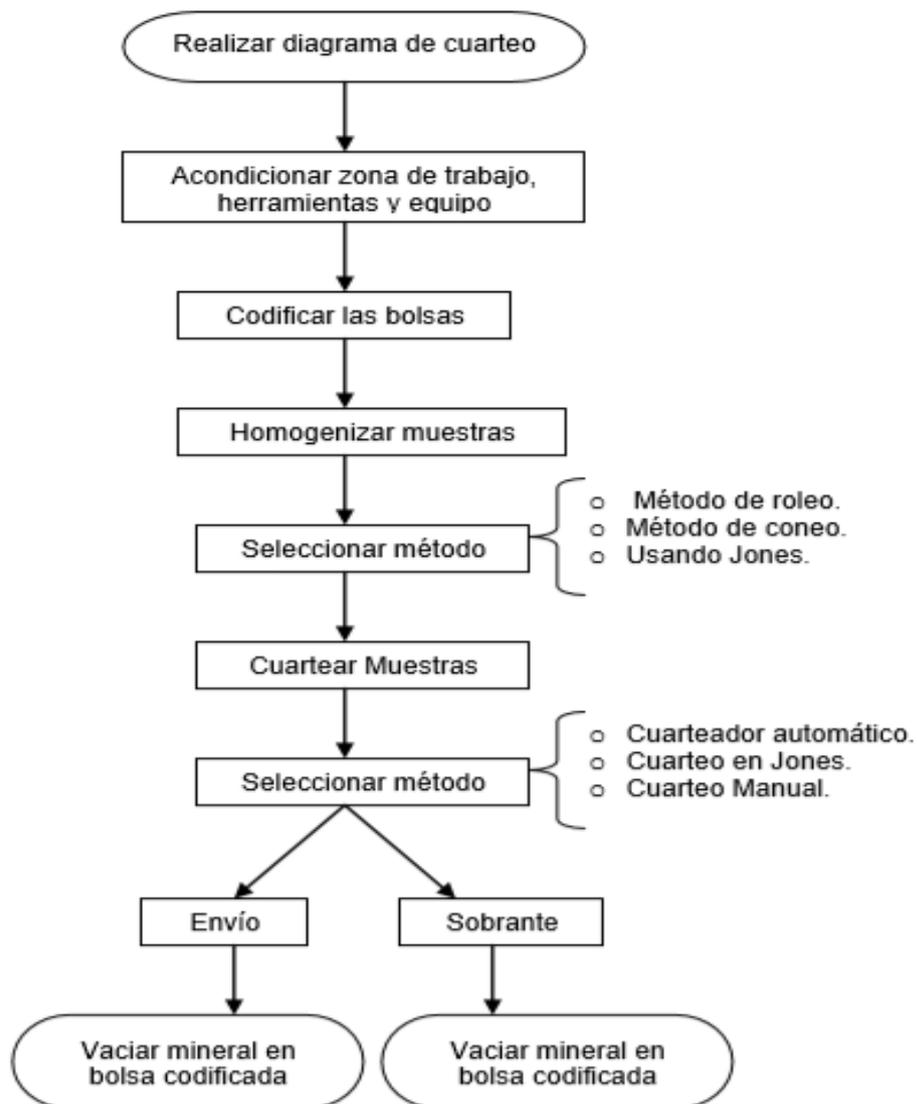


Figura 10: Diagrama del homogenizado y cuarteo de mineral



Figura 11: Cuarteador automático.

Pulverizado de Mineral: Operación mecánica mediante el cual se disminuye el tamaño de las partículas del mineral a un tamaño muy fino, menores a $-10\mu\text{m}$, con el uso de pulverizadoras.

Utilizando este proceso se llegó a la granulometría requerida para el desarrollo de las pruebas de lixiviación.



Figura 12: Pulverizadoras de disco

Tamizado de Mineral: Operación mecánica mediante el cual se logra la separación del material en partículas de diversos tamaños con el uso de tamizadoras y mallas con diferentes medidas el cual puede estar representadas por micrones cumpliendo los estándares ASTM.

Para las pruebas realizadas tenemos las siguientes distribuciones granulométrica.

Tabla 5: Análisis granulométrico - Zona 01

Análisis Granulométrico - Zona 01

Producto		Porcentaje de peso retenido		Acumulativo	
Malla	µm	g	%	Retenido	Pasante
70	212	169.40	8.43	8.43	91.57
100	160	231.70	11.53	19.96	80.04
140	106	227.80	11.34	31.30	68.70
200	75	145.90	7.26	38.56	61.44
270	53	191.30	9.52	48.08	51.92
400	37	117.10	5.83	53.91	46.09
Malla ciega	-37	926.10	46.09	100.00	0.00
Total		2009.3	100.0		

p(80) **160** micrones

Tabla 6: Análisis granulométrico - Zona 02

Análisis Granulométrico - Zona 02

Producto		Porcentaje de peso retenido		Acumulativo	
Malla	µm	g	%	Retenido	Pasante
70	212	163.09	8.14	8.14	91.86
100	160	170.49	8.51	16.65	83.35
140	106	308.13	15.38	32.03	67.97
200	75	102.41	5.11	37.15	62.85
270	53	180.52	9.01	46.16	53.84
400	37	152.74	7.62	53.78	46.22
Malla ciega	-37	925.80	46.22	100.00	0.00
Total		2003.2	100.0		

p(80) **148** micrones

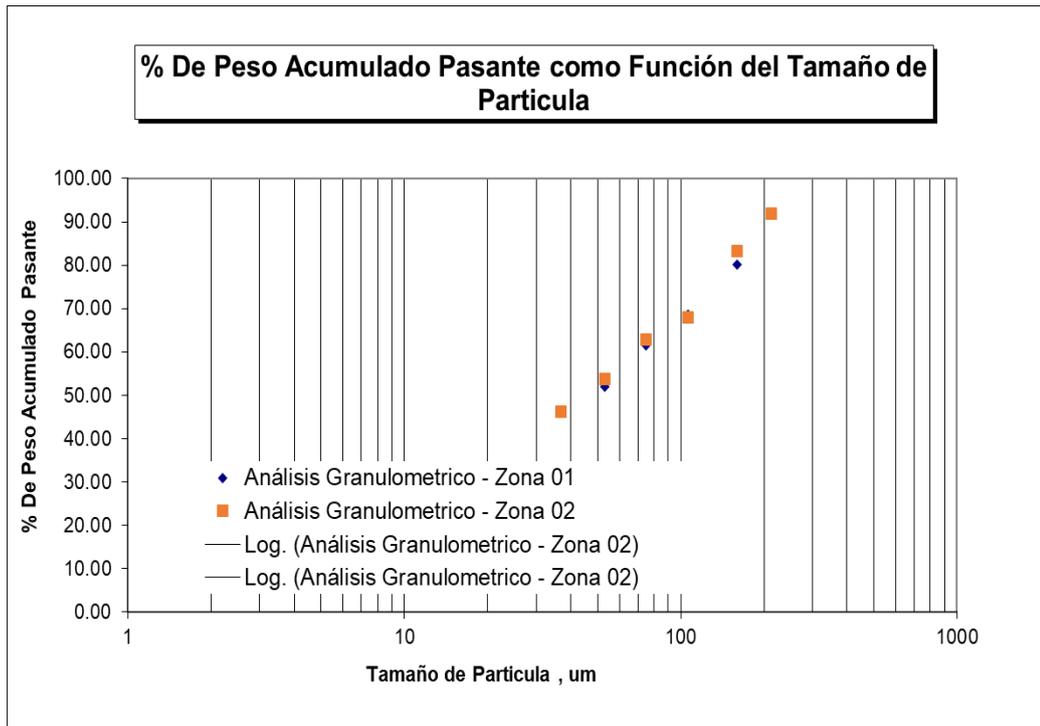


Figura 13: Porcentaje de peso acumulado

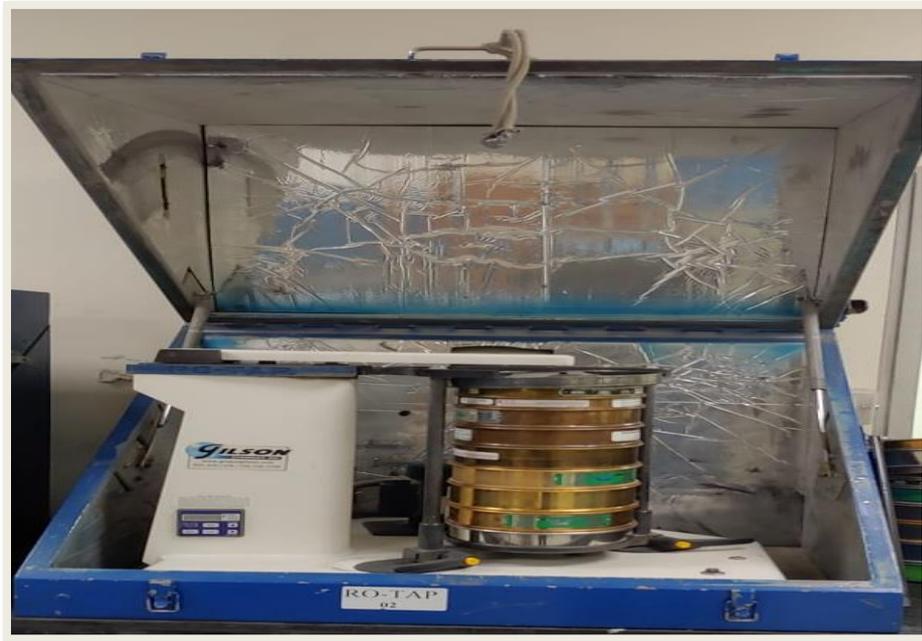


Figura 14: Tamizadora de mineral.

Terminando los procesos se obtiene el mineral con la granulometría necesaria para iniciar las pruebas de lixiviación en botellas y jarras.

2.3. Equipos herramientas materiales y reactivos.

Herramientas:

- Espátulas pequeñas.
- Gradillas.

Materiales

- Botellas grandes de plástico y jarras.
- Botellas chicas vidrios.
- Tapas plásticas grandes y chicas.
- Jeringas de 60 ml.
- Manguera de línea N°14.
- Pastilla magnética.
- Vaso de ensayo de 50 ml.
- Pipeta.
- Tubos de Ensayo.
- Tapas para tubos de ensayos.
- Papel toalla.
- Trapos industriales.

Reactivos.

- Cal viva (CaO) 100% -100M.
- Cianuro de Sodio QP (NaCN).
- Solución de Nitrato de Plata.
- Rodamina al 0.1%.
- Soluciones Buffer: 4, 7, 10 y 12.
- Nitrato de Plomo QP - $Pb(NO_3)_2$.

Cargado de botellas y jarras: Para realizar este proceso es necesario lavar las botellas y jarras para el uso y evitar contaminación de la muestra, utilizaremos la ratio solida/liquido de 1-1.5 para el desarrollo de la cianuración.

Consumo de cal: Se realizo pruebas de alcalinización de 12 horas de agitación hasta obtener el pH de 10.0 para iniciar las pruebas de cianuración y así evitar la generación de HCN.

2.4. Descripción de las pruebas de lixiviación

Colocar las botellas sobre los rodillos para iniciar las pruebas. Una vez agregado el nitrato de plomo dejar acondicionar por un lapso de 30 minutos para que pueda reaccionar y luego iniciar con la lixiviación utilizando el cianuro de sodio.

Para obtener la cinética de la lixiviación se realizará monitoreos de 2, 4, 8 y 24 horas donde se obtendrá muestras líquidas para envío a analizar por Au, Ag y Cu.

Culminado el proceso de lixiviación se procederá a la descarga de las botellas y el lavado de las colas de la lixiviación para posterior análisis del sólido.



Figura 15: Cargado de botellas



Figura 16: Rodillo de botellas



Figura 17: Lixiviación en jarras

2.5. Aspectos éticos:

En referencia a los aspectos éticos se tomaron en cuenta los lineamientos de investigación establecidos por la Universidad Privada del Norte, que constan principalmente en proteger la propiedad intelectual de los autores, respecto a las diferentes teorías y conocimientos, en las que se citan apropiadamente y se manifiestan en las fuentes bibliográficas, teniendo en cuenta las principales características visuales como Tipo de Letra, Títulos, Subtítulos y normativa de citación APA en su séptima edición.

En cuanto a los derechos de autor están asumidos por el investigador, mi persona Eder Jesus Gomez Rivera, declaro la autoría de elaboración de la presente tesis de grado, la

que conservará fuentes informativas de información abierta y será un aporte para la comunidad minera y declaro que será de uso libre para otros investigadores.

CAPÍTULO III: RESULTADOS

3.1. Evaluación del efecto del nitrato de plomo en un mineral oxidado y sulfurado en distintas proporciones para la recuperación de plata.

Tal como indica la teoría, el efecto del nitrato de plomo sobre minerales oxidados es nulo, debido a eso se diseñaron pruebas con minerales oxidados y minerales sulfurados, siguiendo las mismas condiciones en cuanto a la dosificación de reactivos y condiciones de la prueba, el único cambio fue el tipo de mineral.

En el siguiente gráfico se muestra los resultados de las pruebas cuando se experimentó con un mineral oxidado, variando las dosificaciones de nitrato de plomo, desde una línea base, es decir un mineral sin la adición de nitrato de plomo hasta la adición de nitrato de plomo con concentraciones superiores a 400g/t.

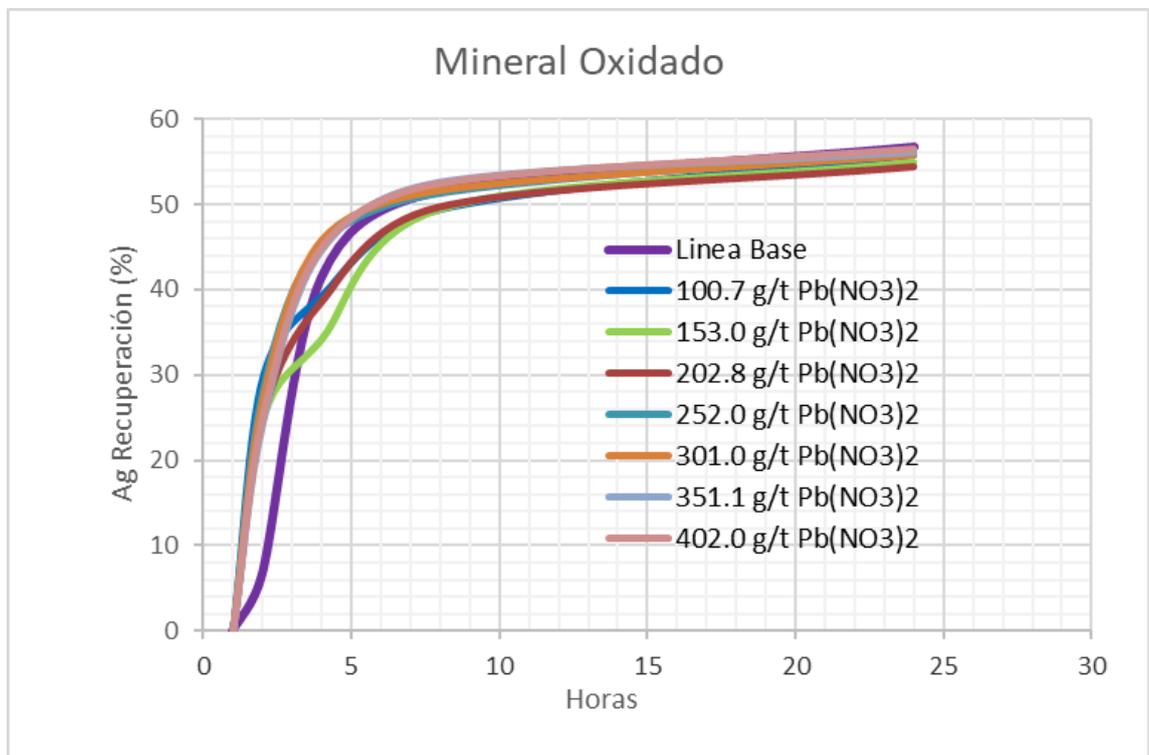


Figura 18: Mineral oxidado

En las pruebas con mineral oxidado no se observa ninguna mejora sustancial en la recuperación de plata llegando a la conclusión que cuando no hay una presencia significativa de mineral sulfurado (pirita, pirrotita, etc). El nitrato de plomo no tiene efecto alguno.

En el siguiente gráfico se muestra los resultados de las pruebas cuando se experimentó con un mineral sulfurado, variando las dosificaciones de nitrato de plomo, desde una línea base, es decir un mineral sin la adición de nitrato de plomo hasta la adición de nitrato de plomo con concentraciones superiores a 350g/t

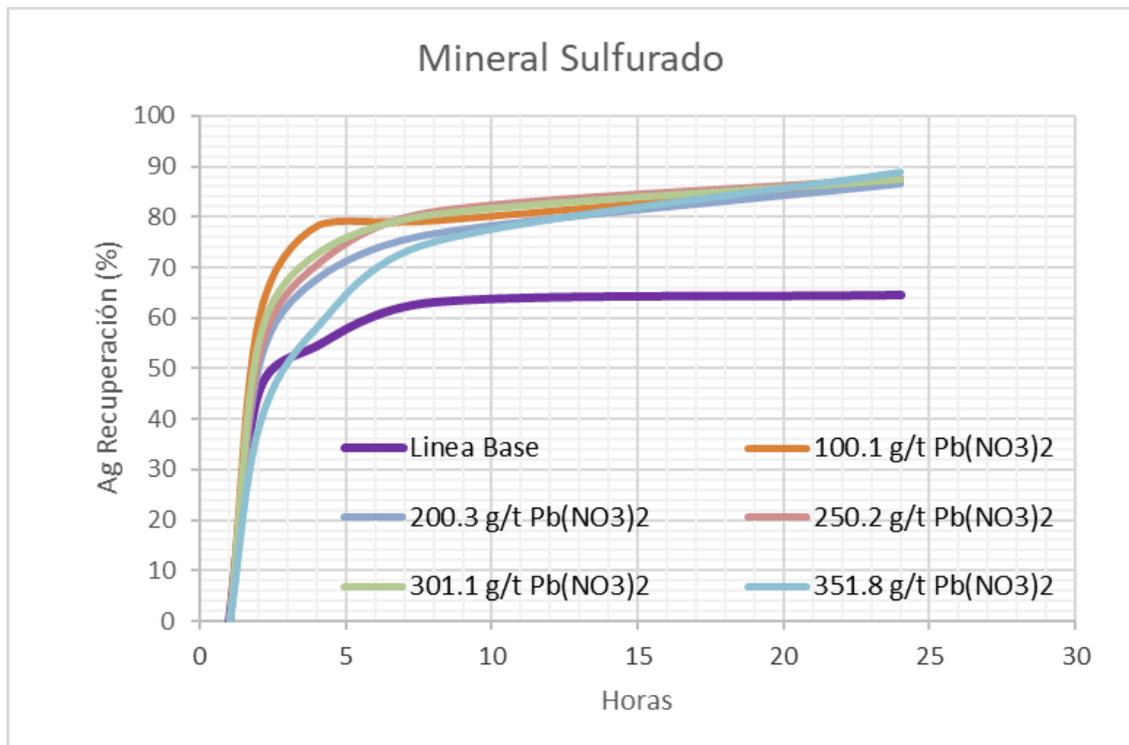


Figura 19: Mineral sulfurado

En la figura 19 se muestra la mejora en la recuperación de plata de acuerdo a las diferentes dosis de nitrato de plomo donde se puede observar que después de obtener la dosis de 100 g/t un exceso de reactivo no influye en nada.

3.2. Probar el efecto del nitrato de plomo en distintas proporciones y evaluar la recuperación de plata.

Para probar el efecto del nitrato de plomo en la recuperación de la plata, se realizaron diversas experiencias modificando la variable independiente que es la concentración de nitrato de plata desde 23.3 g/t hasta valores superiores a 401 g/t.

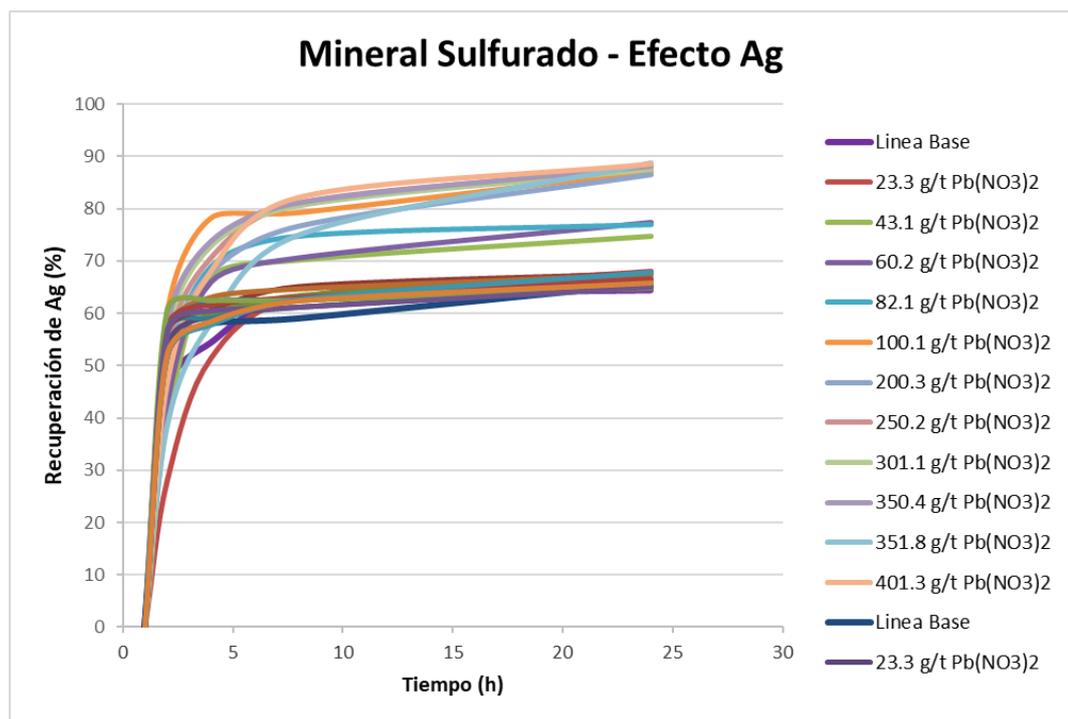


Figura 20: Mineral sulfurado-efecto Ag

En la siguiente figura 20 se puede observar el claro efecto de la adición de nitrato de plomo, a medida que se incrementa el nitrato de plomo, se incrementa la recuperación de plata y también en algunos casos se incrementa la cinética.

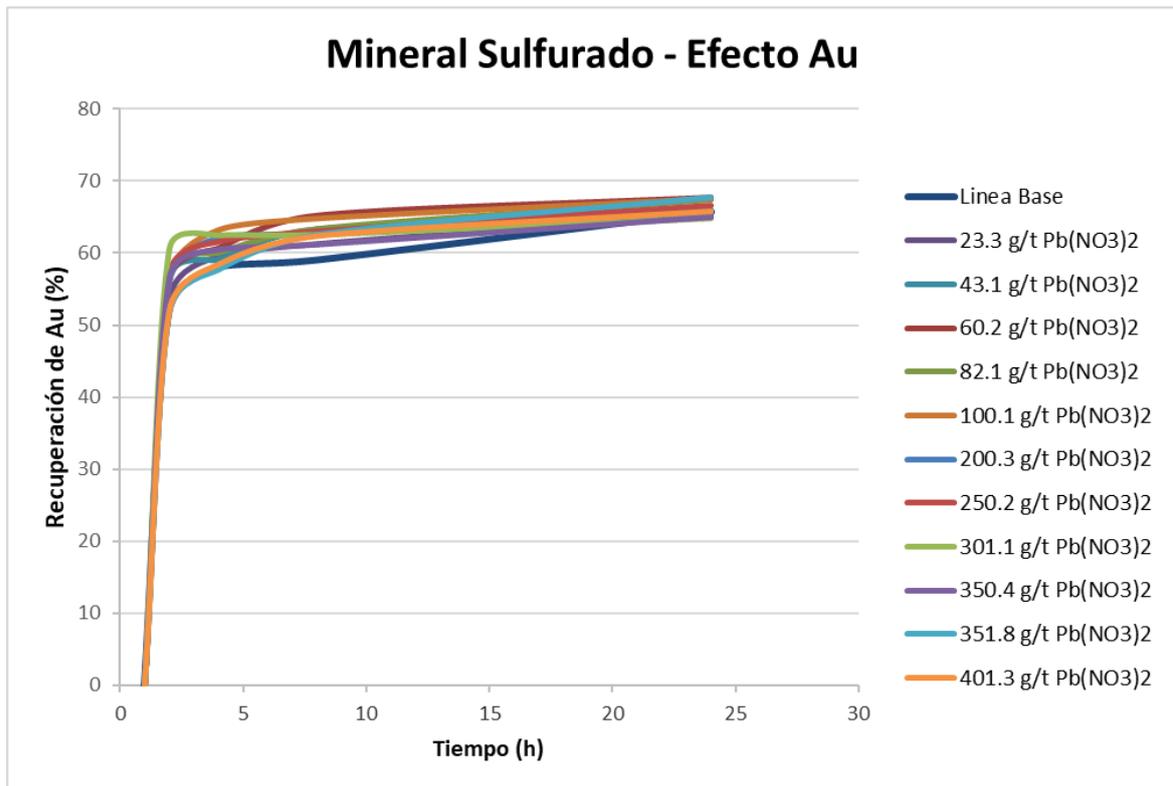


Figura 21: Mineral sulfurado-Efecto Au

En la figura 21 se puede observar que no se presenta un gran efecto en la adición de nitrato de plomo, a medida que se incrementa el nitrato de plomo en la cinética de lixiviación de Au.

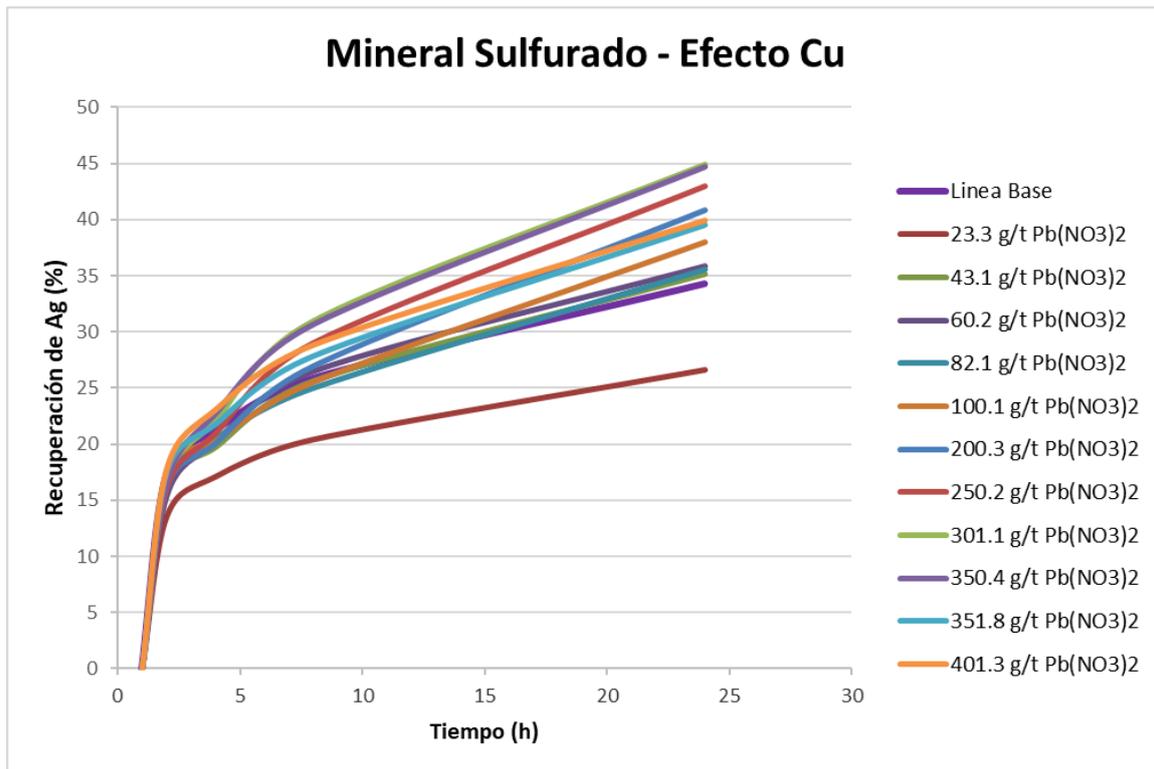


Figura 22: Mineral sulfurado-Efecto Cu

En la figura 22 se puede observar el claro efecto de la adición de nitrato de plomo, sobre la disolución o recuperación de cobre (Cu); a medida que se incrementa el nitrato de plomo.

3.3. Determinar los mecanismos de disolución propuestos y compuestos que forma el nitrato de plomo en el proceso de la lixiviación de minerales para la recuperación de plata.

Es común obtener malos resultados en la recuperación de oro en los procesos de cianuración, cuando los minerales de sulfuro están presentes en las menas de oro. Tal como se vio en los resultados anteriores, la adición de nitrato de plomo afecta a la cinética y a la recuperación total de plata. Esta conocida práctica es beneficiosa y se ha utilizado desde la década de 1930 en las plantas de cianuración. Se informa que otros aditivos (Hg, Tl y Bi) tienen efectos similares Fink. G y Putman (1950), McIntyre y Peck (1976), Chimenos E. (1997).

Existe la sugerencia que el plomo se precipita sobre el oro como plomo metálico Rose y Newman (1898), los mecanismos involucrados estaban, hasta hace poco, en la etapa de hipótesis. Deschenes. G, Lastra. R, Brown. J.R, Jin. S, May. O, Ghali. E, (2000)

- El conocimiento del efecto del nitrato de plomo en las superficies de oro y sulfuros es todavía un caso de estudio y tiene opiniones distintas; se realizó un estudio electroquímico del efecto del plomo sobre el oro, los resultados de las observaciones electroquímicas, infirieron que el plomo en la superficie del oro podría presentarse en dos tipos. Jeffrey (1996):
 - La primera forma, existe la teoría la cual indica que es plomo metálico, el cual mejora la velocidad de disolución del oro.
 - La segunda forma se creía que formaba una especie de película de hidróxido de plomo, que reducía la velocidad de disolución del oro

El estudio electroquímico de Mussatti (1997) el cual abarcó los aspectos de la disolución de oro en medios de cianuro que contienen plomo. En dicho estudio las superficies de oro se caracterizaron mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) y análisis de rayos X de dispersión de energía (EDS). Encontraron pequeños cristales "embrionarios" en la superficie del oro. El análisis EDS de un solo cristal grande (-10 pm) indicó un compuesto de Au-Pb. A partir de la información del monocristal grande, dedujeron que todos los cristales embrionarios también eran Au-Pb. También realizaron cálculos termodinámicos asistidos por computadora, que indicaron que los hidróxidos de plomo son las especies de plomo termodinámicamente predominantes cuando se encuentran en condiciones de cianuración. Llegaron a la conclusión de que el plomo se deposita sobre la superficie de oro y que la especie de plomo probable es $Pb(OH)_3$, resultando en la fase Au-Pb observada por SEM-EDS. Jeffrey (1996) y Mussatti (1997) sugirieron la formación de

plomo metálico u óxido/hidróxido de plomo sobre oro. Sin embargo, estos posibles mecanismos no fueron respaldados por pruebas experimentales. Jin (1998), en estudios electroquímicos fundamentales, también encontraron la formación de plomo y aleaciones de plomo en la superficie del oro. Los mecanismos propuestos fueron apoyados por resultados experimentales.

Liu y Yen (1995) investigaron previamente el efecto de los minerales de sulfuro en la disolución del oro utilizando una amplia variedad de minerales de sulfuro (galena, arsenopirita, pirrotita, pentlandita, esfalerita, molibdenita, calcopirita, pirita, calcocita y estibina). Su estudio se centró en el uso de oxígeno para aliviar el efecto negativo de los minerales de sulfuro. El trabajo concluyó que la presencia de algunos sulfuros como pentlandita, arsenopirita, pirrotita, esfalerita, molibdenita, calcopirita y pirita aumentaban la velocidad de disolución del oro.

La información recopilada de las plantas de cianuración y los estudios de cianuración Deschnes y Fulton (1998) no reportan ningún efecto beneficioso de estos minerales de sulfuro en la cinética de lixiviación de oro, la excepción fue el efecto beneficioso de la galena.

Canmet (1995) inició un proyecto de consorcio para mejorar la práctica industrial de la adición de nitrato de plomo y realizar investigaciones para comprender mejor los mecanismos fundamentales del efecto del nitrato de plomo. El programa de investigación incluyó: una investigación sobre el comportamiento electroquímico del nitrato de plomo durante la cianuración; un estudio de caracterización para examinar las alteraciones provocadas por el tratamiento con nitrato de plomo en la superficie del oro y la superficie de los sulfuros; y una investigación sobre la cinética de cianuración de minerales de oro en

presencia de sulfuros con y sin adiciones de nitrato de plomo, encontraron un efecto sobre el consumo de reactivos, específicamente en la reducción del consumo de cianuro. En una solución de cianuro, el nitrato de plomo, el sulfuro de plomo y el sulfito de plomo reaccionan con el oro para formar AuPb_2 , AuPb_3 y plomo metálico y claramente aceleran la disolución del oro.

La naturaleza de los minerales de sulfuro afecta la estructura en que se formaran los compuestos con plomo o las aleaciones de plomo en la superficie de oro. XPS no encontró plomo en la superficie del oro en presencia de pirita o pirrotita, pero encontró una capa muy delgada (<50 Å) en presencia de calcopirita. Se requiere más investigación para estudiar el efecto de la presencia de otros sulfuros. En presencia de minerales de sulfuro, a veces el plomo no se compara con el oro debido a su alta afinidad por los minerales de sulfuro (reacciones de competencia). Deschênes. G, Hall. D, and Fulton. M (2003).

La pirita, la calcopirita y la pirrotita mostraron diferentes mecanismos de reacción con el nitrato de plomo. El nitrato de plomo forma una capa de hidróxido sobre las partículas de pirita que reduce la velocidad de reacción con el cianuro. La disolución de la pirita genera una capa de azufre sobre el oro. Esta capa es menos importante en presencia de plomo. El efecto del nitrato de plomo es más sutil para la calcopirita y la pirrotita porque fue menos eficaz para retardar la reacción de los sulfuros con el cianuro y la reacción del hierro con el oxígeno. Para el oro, la adición de nitrato de plomo tiene el mismo efecto con la pirrotita que con la pirita; inhibiendo parcialmente la formación de la capa de azufre. Esto no se observó para el oro en el sistema de calcopirita. Deschênes. G, Hall. D, and Fulton. M (2003).

Los resultados del estudio electroquímico y el estudio de los minerales de sulfuro se correlacionan bien con los estudios de casos de cianuración. La estrategia de adición de

nitrate de plomo, para ser óptima, debe estar en función de la composición mineralógica del mineral. Para un mineral de oro con bajo contenido de sulfuro, la adición de nitrate de plomo se puede realizar directamente a la cianuración. Un mineral de oro con un contenido de sulfuro más alto, con un contenido de sulfuro bajo, pero finamente molido, o con una cantidad significativa de minerales de sulfuro de cobre requiere una prelixiviación con una adición de nitrate de plomo. La formación de una capa pasiva sobre las partículas de oro tiene una influencia significativa en las etapas iniciales de la lixiviación. La adición de nitrate de plomo disminuyó notablemente su efecto inhibitor. La mejora de la tasa de lixiviación aumentó sustancialmente el rendimiento. En un estudio de caso, la planta pudo aumentar su rendimiento en un 41 %, aumentar su extracción de oro en un 4 % y reducir su consumo de cianuro en un 37 %.

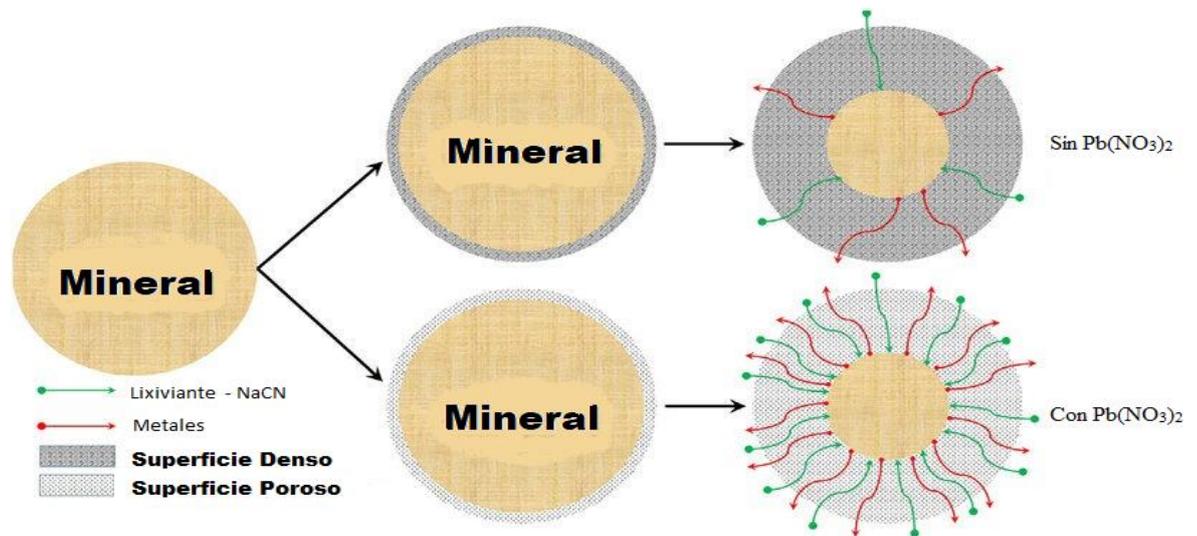


Figura 23: Mecanismo de disolución

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

4.1. Discusión de resultados.

En tiempos pasados existía la sugerencia que el plomo se precipita sobre el oro como plomo metálico Rose y Newman (1898), los mecanismos involucrados estaban, hasta hace poco, en la etapa de hipótesis. Deschenes. G, Lastra. R, Brown. J.R, Jin. S, May. O, Ghali. E, (2000). En la actualidad tenemos información confirmada por mediciones experimentales en los residuos y/o superficies después de la lixiviación, tal como indica el estudio electroquímico de Mussatti (1997) el cual abarcó los aspectos de la disolución de oro en medios de cianuro que contienen plomo. En dicho estudio se demostró que los hidróxidos de plomo son las especies de plomo termodinámicamente predominantes en las superficies de oro que se caracterizaron mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) y análisis de rayos X de dispersión de energía (EDS), dicho estudio encontró compuestos Au-Pb y dichos compuestos formando hidróxidos de plomo $Pb(OH)_3$.

Los resultados de las experiencias corroboran los estudios realizados a nivel laboratorio y en operaciones mineras, en el caso de la planta se muestra un efecto significativo en la recuperación de oro cuando se adiciona el nitrato de plomo. En ninguna de las investigaciones se encontró información que nos indique el comportamiento de la planta cuando se le adiciona el nitrato de plomo, este estudio está sentando las bases para iniciar el desarrollo de esta tecnología en la lixiviación de menas de planta usando el nitrato de plomo.

La investigación demostró que el nitrato de plomo no tiene efecto sobre minerales oxidados, también dicha información se puede corroborar del mecanismo de lixiviación,

donde uno de los agentes para que ocurra esa aceleración o un efecto catalizador de la reacción es que debe existir la presencia de sulfuros. Deschênes. G, Hall. D, and Fulton. M (2003).

Tal como indican Deschênes. G, Hall. D, and Fulton. M (2003), la presencia de sulfuros cataliza la disolución del oro, sin embargo, no han reportado el efecto del nitrato de plomo sobre la recuperación de plata, después de revisar la bibliografía no se encuentran estudios específicos que evalúen este efecto. Los resultados de la presente investigación demuestran un incremento en la recuperación de plata; con una lixiviación convencional, es decir sin la adición de $Pb(NO_3)_2$ para un mineral sulfurado se obtuvo una recuperación mínima igual a 63.9%, en cambio, agregando el $Pb(NO_3)_2$ se obtuvo un máximo de 88.8%, lo cual indica que se tuvo un aumento significativo de 24.9% más.

La principal limitación para realizar dicha investigación fue la falta de análisis más específicos de superficies, es decir un análisis con microscopio electrónico QEMSCAN (Acrónimo en inglés de Evaluación Cuantitativa de Materiales mediante Microscopio Electrónico de Barrido), el cual nos hubiera permitido confirmar los compuestos después de la reacción de disolución del mineral, adicional al QEMSCAN hubiera sido muy importante el uso del análisis XRD. El aspecto económico también fue una gran limitante, debido a que más análisis requieren una mayor inversión, así como el factor tiempo.

4.2. Conclusiones

Como primer objetivo tuvimos que evaluar el efecto del nitrato de plomo en un mineral oxidado y sulfurado. Las pruebas demuestran que el nitrato de plomo no tiene efecto sobre minerales oxidados, también se confirma con el estudio de los mecanismos de reacción, los cuales solo pueden ser explicados en presencia de sulfuros.

Como objetivo específico tuvimos que probar cual es el efecto del nitrato de plomo en distintas proporciones y evaluar la recuperación de plata. Con el uso del nitrato de plomo se llegó a obtener los siguientes resultados en la recuperación de plata; con una lixiviación convencional (Sin la adición de $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$) para el mineral sulfurado obteniendo una recuperación mínima igual a 63.9%, en cambio, agregando el $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ se obtuvo un máximo de 88.8%, lo cual indica que se tuvo un aumento significativo de 24.9% más. Para el mineral oxidado una recuperación mínima de 53.8% llegando hasta una recuperación máxima de 56.8% teniendo como diferencia un aumento de 2.9%, los resultados confirman un efecto mínimo de la adición $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ en la disolución de plata en un mineral oxidado.

Los resultados en la evaluación de disolución de oro desde el mineral fueron los siguientes, realizando una lixiviación convencional para el mineral sulfurado se obtuvo una recuperación mínima de 64.4% y agregando el $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ se obtuvo un máximo de 67.8% teniendo un incremento de 3.4%. para el mineral oxidado se obtuvo un mínimo de 78.7% agregando el $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ se obtuvo un máximo de 82.0% teniendo un incremento de 3.4%.

En el proceso de cianuración de Au y Ag, el cobre es un contaminante y genera problemas en las distintas etapas de los procesos continuos a la obtención de la Ag y Au, es por eso que se evaluó el comportamiento y teniendo una lixiviación convencional para el mineral sulfurado se obtuvo una recuperación mínima 26.6 y agregando el $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ se

obtuvo un máximo de 44.9 teniendo un incremento de 18.3% para el mineral oxidado se obtuvo un mínimo de 35.6% agregando el $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ se obtuvo un máximo de 56.2% teniendo un incremento de 20.6%. Es importante mencionar que si se realiza una dosificación excesiva de $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ en la lixiviación el aumento es significativo y será muy perjudicial para el proceso de cianuración de Au y Ag.

Los mecanismos de disolución que forma el nitrato de plomo en el proceso de la lixiviación de minerales, encontramos que las teorías han ido cambiando a través del tiempo, primero se pensaba que formaban aleaciones con plomo metálico, posteriormente con el avance en la tecnología para analizar las superficies de reacción con XRF y otros métodos, se confirma que los compuestos que se forman son hidróxidos de plomo y que existe un mecanismo electroquímico que aún está en estudio.

REFERENCIAS

- Walter, M., Sucre C., Unzueta A., Nunes da Cunha, N. (2022) “*Recursos mineros, tecnología, medio ambiente e inclusión*” Santiago de Chile.
<https://blogs.iadb.org/energia/es/recursos-mineros-tecnologia-medio-ambiente-e-inclusion/>
- Huere, L., (2019) “*Cinética de lixiviación y recuperación de oro, de finos en la lixiviación por percolación con y sin aglomeración*”. Tecsup, Lima, Perú.
- G. Deschenes, R. Lastra, J.R. Brown, S. Jin, O. May, E. Ghali, (2000) “*Effect of lead nitrate on cyanidation of gold ores: progress on the study of the mechanisms*”, Minerals Engineering, Volume 13, Issue 12, 2000, Pages 1263-1279, ISSN 0892-6875, [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(00\)00109-6](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(00)00109-6).
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0892687500001096>)
- G. Deschênes, D. Hall, and M. Fulton (2003) “Cyanidation of a pyrrhotite-bearing gold ore” Mining and Mineral Sciences Laboratories, CANMET, Natural Resources Canada, 555 Booth Street, Ottawa, Ontario, K1A 0G1 Canada 2 Placer Dome Canada, Musselwhite Mine, P.O. Box 7500, Thunder Bay, Ontario, P7B 6S8 Canada.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). Metodología de la investigación (6a. ed.).
- Jakson Vilchez, Karin Dávalos, Richard Pilco y Jesús Reyes (2010) Zoneamiento y patrones de alteración hidrotermal en el depósito de alta sulfuración cerro Yanacocha distrito minero Yanacocha -Cajamarca Perú, XV Congreso Peruano de Geología. Resúmenes Extendidos.

ANEXOS

ANEXO 1: Resumen de reporte de botellas.

RESUMEN DE REPORTE DE BOTELLAS

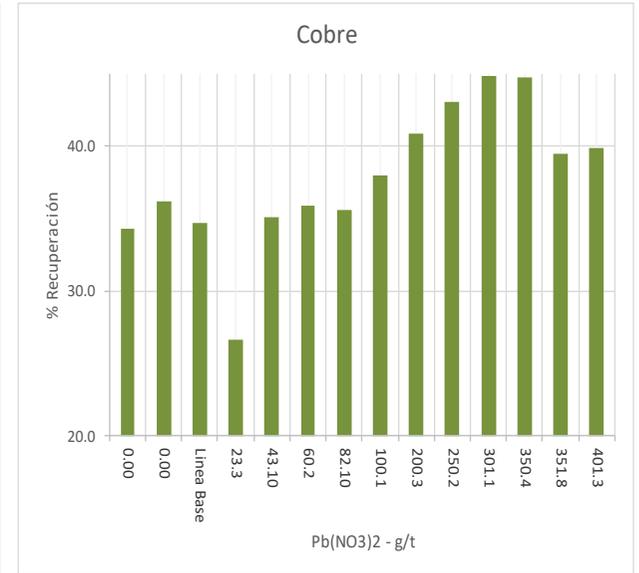
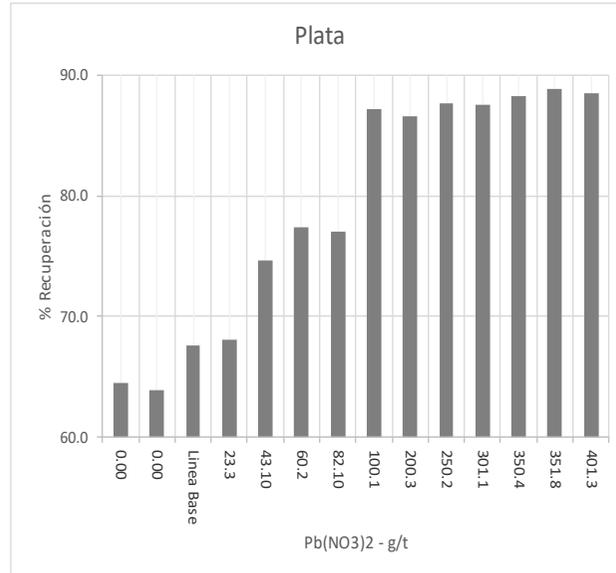
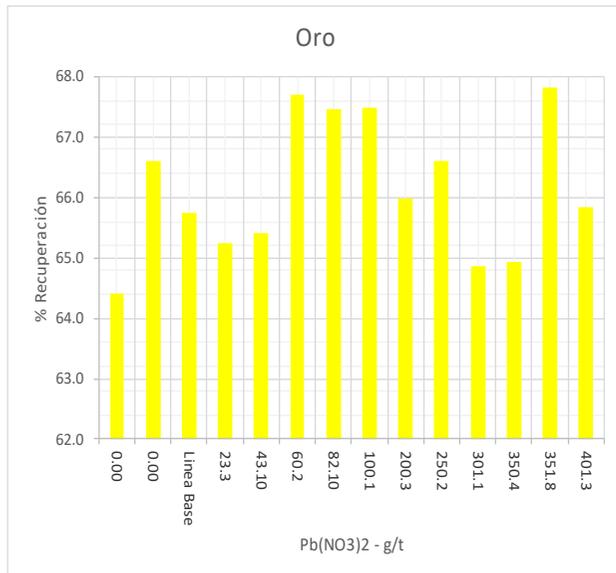
⁽¹⁾ Cabeza ensayada

⁽²⁾ Cabeza Calculada

Código de Muestra	Mineral	Pb(NO ₃) ₂ g/t	CN g/m ³	Malla micrones	Balance metalúrgico de Au						Balance metalúrgico de Ag						Balance metalúrgico de Cu						pH mineral	Reactivos, Kg/t		Time h
					(1)Cabeza g/t	Análisis, g/t		Extracción, %			(1)Cabeza g/t	Análisis, g/t		Extracción, %			(1)Cabeza g/t	Análisis, g/t		Extracción, %				NaCN	Lime	
						(2)Cabeza	Cola	8 h	24 h	Final		(2)Cabeza	Cola	8 h	24 h	Final		(2)Cabeza	Cola	8 h	24 h	Final				
74561_LB_100M1000	Zona 01	0.00	1000	160	4.998	5.418	1.928	63.2	64.4	64.4	87.07	95.63	33.96	63.1	64.5	64.5	2596.5	2648.9	1740.3	25.9	34.3	34.3	3.46	3.12	4.81	24
74561_LB_200M1000	Zona 01	0.00	1000	160	4.998	5.484	1.832	63.0	66.6	66.6	87.07	95.74	34.56	62.1	63.9	63.9	2596.5	2668.6	1703.8	26.8	36.2	36.2	3.31	3.31	4.94	24
74561_T1	Zona 01	Línea Base	1000	160	4.998	5.448	1.866	59.1	65.7	65.7	87.07	98.03	31.81	66.0	67.6	67.6	2596.5	2592.6	1693.4	24.2	34.7	34.7	2.92	4.10	3.90	24
74561_T9	Zona 01	23.3	1000	160	4.998	5.435	1.889	61.2	65.2	65.2	87.07	94.21	30.12	63.0	68.0	68.0	2596.5	2614.0	1918.0	20.4	26.6	26.6	2.92	4.78	3.91	24
74561_T10	Zona 01	43.10	1000	160	4.998	5.419	1.875	63.2	65.4	65.4	87.07	93.38	23.66	70.1	74.7	74.7	2596.5	2610.4	1693.7	25.6	35.1	35.1	2.92	4.73	3.93	24
74561_T11	Zona 01	60.2	1000	160	4.998	5.463	1.764	65.2	67.7	67.7	87.07	95.32	21.54	70.6	77.4	77.4	2596.5	2718.7	1744.0	26.5	35.9	35.9	2.92	4.70	3.93	24
74561_T12	Zona 01	82.10	1000	160	4.998	5.408	1.760	63.4	67.5	67.5	87.07	94.98	21.82	74.8	77.0	77.0	2596.5	2653.7	1709.2	25.0	35.6	35.6	2.92	4.62	3.93	24
74561_T2	Zona 01	100.1	1000	160	4.998	5.251	1.707	64.7	67.5	67.5	87.07	82.54	10.59	79.3	87.2	87.2	2596.5	2485.7	1541.3	25.5	38.0	38.0	2.92	4.32	3.99	24
74561_T3	Zona 01	200.3	1000	160	4.998	5.150	1.752	62.8	66.0	66.0	87.07	94.38	12.65	76.7	86.6	86.6	2596.5	2657.7	1571.7	27.0	40.9	40.9	2.93	3.51	3.73	24
74561_T4	Zona 01	250.2	1000	160	4.998	5.211	1.741	63.0	66.6	66.6	87.07	95.76	11.80	81.1	87.7	87.7	2596.5	2646.1	1507.4	29.1	43.0	43.0	2.92	4.29	3.65	24
74561_T5	Zona 01	301.1	1000	160	4.998	4.925	1.730	62.6	64.9	64.9	87.07	93.46	11.67	80.6	87.5	87.5	2596.5	2687.9	1481.5	31.0	44.9	44.9	2.93	4.24	3.71	24
74561_T6	Zona 01	350.4	1000	160	4.998	5.084	1.783	61.1	64.9	64.9	87.07	93.12	10.93	81.3	88.3	88.3	2596.5	2712.3	1499.3	30.7	44.7	44.7	2.94	4.34	3.61	24
74561_T7	Zona 01	351.8	1000	160	4.998	5.424	1.746	62.6	67.8	67.8	87.07	94.86	10.60	75.1	88.8	88.8	2596.5	2642.5	1599.2	27.8	39.5	39.5	2.94	4.35	3.96	24
74561_T8	Zona 01	401.3	1000	160	4.998	5.426	1.853	62.4	65.8	65.8	87.07	94.70	10.86	82.2	88.5	88.5	2596.5	2621.6	1575.7	28.8	39.9	39.9	2.96	4.45	4.00	24
74562_LB_100M500	Zona 02	0.00	500	148	1.266	1.374	0.247	78.6	82.0	82.0	23.76	24.75	11.42	50.1	53.8	53.8	780.9	787.4	384.6	44.0	51.2	51.2	2.70	1.80	10.34	24
74562_LB_200M500	Zona 02	0.00	500	148	1.266	1.355	0.250	71.3	81.5	81.5	23.76	24.74	11.29	51.9	54.4	54.4	780.9	777.3	367.3	44.9	52.8	52.8	2.75	1.91	10.22	24
74562_T1	Zona 02	Línea Base	500	148	1.266	1.333	0.261	68.1	80.4	80.4	23.76	24.05	10.40	51.6	56.8	56.8	780.9	781.7	350.5	48.3	55.2	55.2	2.89	2.64	10.19	24
74562_T2	Zona 02	100.7	500	148	1.266	1.292	0.253	75.8	80.4	80.4	23.76	24.68	10.90	49.5	55.8	55.8	780.9	789.2	345.9	46.9	56.2	56.2	2.70	2.74	9.91	24
74562_T3	Zona 02	153.0	500	148	1.266	1.282	0.233	78.6	81.8	81.8	23.76	24.96	11.23	49.5	55.0	55.0	780.9	804.2	352.2	48.8	56.2	56.2	2.84	2.85	9.83	24
74562_T4	Zona 02	202.8	500	148	1.266	1.289	0.249	77.6	80.7	80.7	23.76	24.91	11.36	49.7	54.4	54.4	780.9	805.1	347.3	47.6	56.9	56.9	2.76	2.84	9.72	24
74562_T5	Zona 02	252.0	500	148	1.266	1.218	0.260	74.6	78.7	78.7	23.76	25.88	11.33	51.2	56.2	56.2	780.9	801.1	333.0	50.1	58.4	58.4	2.89	1.99	8.48	24
74562_T6	Zona 02	301.0	500	148	1.266	1.226	0.248	70.9	79.8	79.8	23.76	25.88	11.47	51.6	55.7	55.7	780.9	794.1	330.4	52.1	58.4	58.4	2.84	2.10	8.49	24
74562_T7	Zona 02	351.1	500	148	1.266	1.190	0.246	72.2	79.3	79.3	23.76	25.47	11.19	52.6	56.1	56.1	780.9	786.6	318.9	52.6	59.5	59.5	2.81	2.07	8.59	24
74562_T8	Zona 02	402.0	500	148	1.266	1.200	0.243	68.6	79.8	79.8	23.76	25.80	11.21	52.5	56.6	56.6	780.9	808.1	326.8	50.9	59.6	59.6	2.76	2.12	8.56	24
Average					3.443	3.638	1.155	67.2	72.1	72.1	60.69	65.30	16.18	64.0	69.3	69.3	1840.0	1870.7	1101.5	35.9	45.6	45.6	2.9	3.41	6.26	
Max					4.998	5.484	1.928	78.6	82.0	82.0	87.07	98.03	34.56	82.2	88.8	88.8	2596.5	2718.7	1918.0	52.6	59.6	59.6	3.5	4.78	10.34	
Min					1.266	1.190	0.233	59.1	64.4	64.4	23.76	24.05	10.40	49.5	53.8	53.8	780.9	777.3	318.9	20.4	26.6	26.6	2.7	1.80	3.61	

ANEXO 2: Resumen de extracción de metales en un mineral sulfurado.

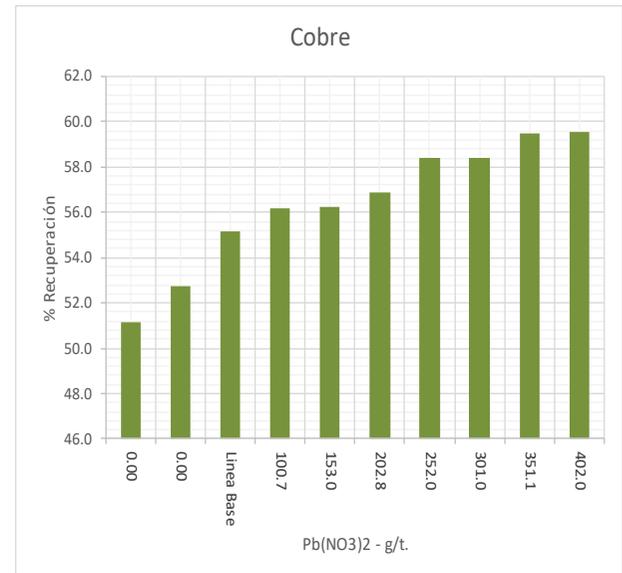
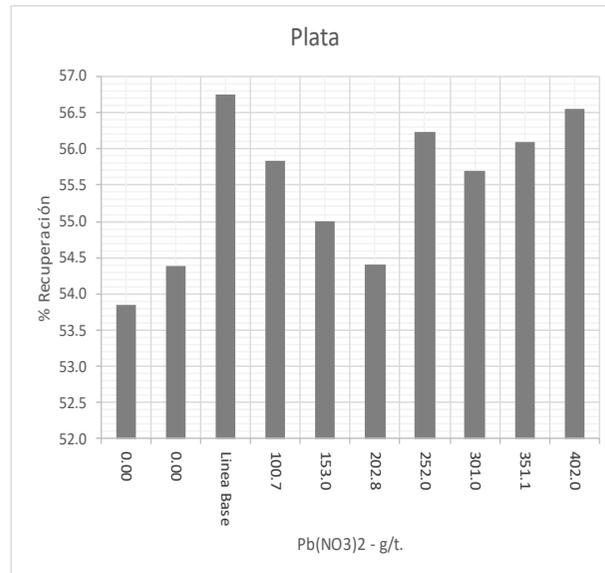
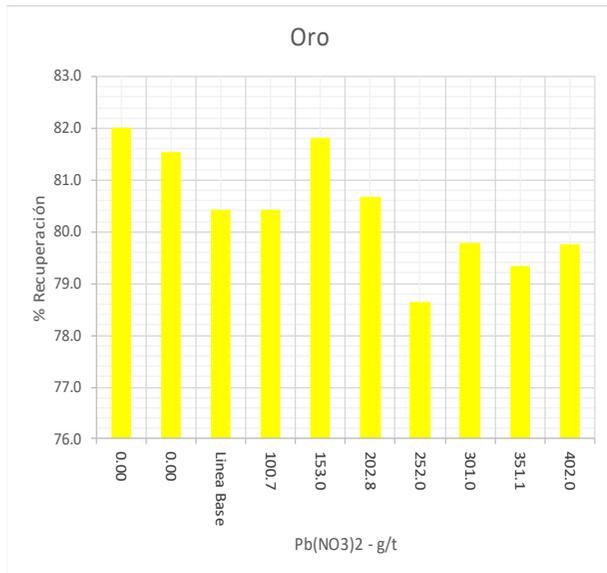
Zona 01 - Resumen de extracción de metales



ANEXO 3: Resumen de extracción de metales en un mineral oxidado.

-

Zona 02 - Resumen de extracción de metales



ANEXO 4: Mineral sulfurado Linea Base.

REPORTE DE PRUEBA DE CIANURACION EN BOTELLA

Cód. Muestra : 74561_T1 Tipo de Prueba : CN [ppm] : 1000 DESCRIPCION : Sulfuro - Linea Base
 MESH : -160M
 PESO BOTELLA : 0.00 g. pH del MINERAL : 2.92 TIEMPO DE LIXIVIACIÓN: 24
 PESO MINERAL : 1007.40 g. LÍQUIDO/SÓLIDO : 1.5 PFINAL DE MINERAL : 1006.80 g.
 PESO SOLUCIÓN : 1511.10 g. PFINAL DESOLUCIÓN : 1511.10 g.
 PESO TOTAL : 2518.50 g.

METALES		Au	Ag	Cu	Hg	S Sulfato %	S Sulfuro %	S Total	C Total %	C Residual %	AuCN [ppm]	CuCN [ppm]
CABEZA ENSAYADA	[ppm]	4.998	87.07	2596.5	41.9	7.541	6.907	0.634	0.02	0.02	3.331	2057
COLA ENSAYADA	[ppm]	1.866	31.81	1693.4	27.3	CONSUMO DE REACTIVO						
RECUPERACIÓN ENSAYADA	[%]	62.7	63.5	34.8								
CABEZA CALCULADA	[ppm]	5.448	98.03	2592.6		Neto		Bruto				
RECUPERACIÓN CALCULADA	[%]	65.7	67.6	34.7	NaCN:	4.101 kg/t						
METAL EN SOLUCIÓN	[mg]	3.606	66.68	905.3		CAL:	3.897 kg/t	5.807 kg/t				
METAL EN COLA	[mg]	1.879	32.02	1704.9								
METAL TOTAL	[mg]	5.485	98.70	2610.20				AuFA/AuCN				
								0.666				

HORAS DE LIXIV.	CN- [ppm]	pH	REACT. AGREGADO		VOLUMEN DESECHADO [ml]	ORO					PLATA					COBRE					PESO Soluc [g]
			NaCN [mg]	CAL [mg]		SOLUCIÓN [ppm]	SOLUCIÓN [mg]	DES. ACUM. [mg]	TOTAL [mg]	% RECUP ACUMUL	SOLUCIÓN [ppm]	SOLUCIÓN [mg]	DES. ACUM. [mg]	TOTAL [mg]	% RECUP ACUMUL	SOLUCIÓN [ppm]	SOLUCIÓN [mg]	DES. ACUM. [mg]	TOTAL [mg]	% RECUP ACUMUL	
0	1000	10.51	2831.4	3767	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00	0.000	0.0000	0.0000	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00	0.000	0.00	1511.1
1	1000.00	10.34	0.0	156	0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00	0.000	0.0000	0.0000	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00	0.000	0.00	1511.1
2	373.00	10.41	1775.2	0	20.00	1.859	2.809	0.037	2.846	51.90	30.864	46.6386	0.6173	47.26	47.88	297.180	449.07	5.94	455.012	17.43	1511.1
4	791.90	10.59	588.5	0	20.00	2.055	3.105	0.078	3.184	58.05	40.349	60.9714	1.4243	62.40	63.22	326.111	492.79	12.47	505.252	19.36	1511.1
8	771.00	10.52	651.7	0	20.00	2.065	3.120	0.120	3.240	59.07	41.639	62.9207	2.2570	65.18	66.04	403.931	610.38	20.54	630.925	24.17	1511.1
24	603.30	10.70	0.0	0	20.00	2.277	3.441	0.165	3.606	65.75	42.076	63.5810	3.0986	66.68	67.56	577.881	873.24	32.10	905.338	34.68	1511.1



ANEXO 5: Mineral sulfurado – Nitrato de Plomo = 100.1 g/t

REPORTE DE PRUEBA DE CIANURACION EN BOTELLA

Cód. Muestra : 74561_T2 Tipo de Prueba : CN [ppm] : 1000 DESCRIPCION : Sulfuro
 Pb(NO₃)₂ 100.1 g/t MESH : -160M

TIEMPO DE LIXIVIACIÓN: **24**

PESO BOTELLA : 0.00 g. pH del MINERAL : 2.92
 PESO MINERAL : 1004.70 g. LÍQUIDO/SÓLIDO : 1.5
 PESO SOLUCION : 1507.05 g. PFINAL DE MINERAL : 1005.3 g.
 PESO TOTAL : 2511.75 g. PFINAL DE SOLUCIÓN : 1507.05 g.

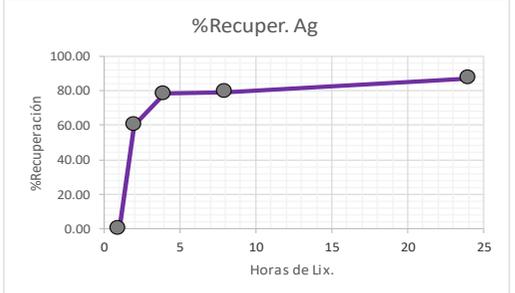
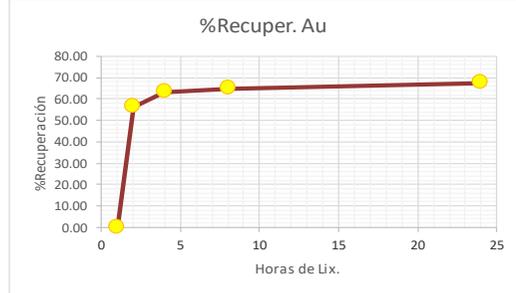
METALES	Au	Ag	Cu	Hg	S Sulfato %	S Sulfuro %	S Total	C Total %	Residual %	AuCN [ppm]	CuCN [ppm]
CABEZA ENSAYADA [ppm]	4.998	87.07	2596.5	41.9	7.541	6.907	0.634	0.02	0.02	3.331	2057
COLA ENSAYADA [ppm]	1.707	10.59	1541.3		CONSUMO DE REACTIVO						
RECUPERACIÓN ENSAYADA [%]	65.8	87.8	40.6		Neto						
CABEZA CALCULADA [ppm]	5.251	82.54	2485.7		Bruto						
RECUPERACIÓN CALCULADA [%]	67.5	87.2	38.0		NaCN: 4.318 kg/t 5.897 kg/t						
METAL EN SOLUCIÓN [mg]	3.563	72.33	949.4		CAL: 3.985 kg/t						
METAL EN COLA [mg]	1.716	10.65	1549.5								
METAL TOTAL [mg]	5.279	82.98	2498.89								

HA calc VS HA ensayada

Au	Ag	Cu
-5.069	5.20	4.3

AuFA/AuCN
0.666

HORAS DE LIXIV.	CN [ppm]	pH	REACT. AGREGADO		VOLUMEN DESECHADO [ml]	ORO					PLATA					COBRE					PESO Soluc [g]
			NaCN [mg]	CAL [mg]		SOLUCIÓN [ppm]	SOLUCIÓN [mg]	DES. ACUM [mg]	TOTAL [mg]	% RECUP ACUMUL	SOLUCIÓN [ppm]	SOLUCIÓN [mg]	DES. ACUM [mg]	TOTAL [mg]	% RECUP ACUMUL	SOLUCIÓN [ppm]	SOLUCIÓN [mg]	DES. ACUM [mg]	TOTAL [mg]	% RECUP ACUMUL	
0	1000	10.48	2842.3	3768.7	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00	0.000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00	0.000	0.00	0.00	0.000	0.00	1507.05
1	1000.00	10.27	0.0	238	0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00	0.000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00	0.000	0.00	0.00	0.000	0.00	1507.05
2	343.20	10.54	1859.6	0	20.00	1.947	2.934	0.039	2.973	56.32	32.590	49.1148	0.6518	49.77	59.98	288.867	435.34	5.78	441.114	17.65	1507.05
4	831.30	10.59	481.8	0	20.00	2.157	3.251	0.082	3.333	63.13	42.109	63.4604	1.4940	64.95	78.28	327.942	494.22	12.34	506.561	20.27	1507.05
8	737.80	10.55	744.5	0	20.00	2.184	3.291	0.126	3.417	64.73	42.109	63.4604	2.3362	65.80	79.29	409.790	617.57	20.53	638.106	25.54	1507.05
24	558.90	10.70	0.0	0	20.00	2.251	3.392	0.171	3.563	67.49	45.835	69.0756	3.2529	72.33	87.17	608.276	916.70	32.70	949.400	37.99	1507.05



ANEXO 8: Cuarteo de mineral – Cuarteador automático.



ANEXO 8: Cargado de Botellas



ANEXO 9: Lixiviación en Jarras.

