

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

**EFFECTOS DE LA CONCENTRACIÓN DE CIANURO DE
SODIO EN LA RECUPERACIÓN DE ORO POR
LIXIVIACIÓN EN BOTELLAS Y COLUMNAS
EN LA UNIDAD MINERA PUCAMARCA –
PALCA**

**TRABAJO DE SUFICIENCIA
PROFESIONAL**

Presentado por:

Bach. Wilver José Mamani Rodriguez

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO METALURGISTA

TACNA – PERÚ

2024

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería


Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales


**EFFECTOS DE LA CONCENTRACIÓN DE CIANURO
DE SODIO EN LA RECUPERACIÓN DE ORO POR
LIXIVIACIÓN EN BOTELLAS Y COLUMNAS EN LA
UNIDAD MINERA PUCAMARCA – PALCA**

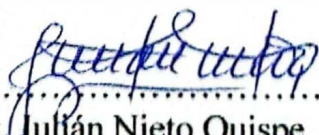
Trabajo de Suficiencia Profesional sustentado y aprobado el 05 de julio de dos mil veinticuatro por el Bachiller Wilver José Mamani Rodríguez; siendo el jurado calificador integrado por:

PRESIDENTE:

Dr. Tolomeo Raúl Soto Pérez

SECRETARIO:

Ing. Julián Nieto Quispe

VOCAL:

Dr. Nataniel Mario Linares Gutiérrez

ASESOR:

Ing. Julián Nieto Quispe



CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo **Julian Nieto Quispe**, docente de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y materiales como asesor designado para realizar la evaluación a través del software de similitud textual **TURNITIN** del informe de TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL, modalidad de titulación acreditada por Resolución de Facultad N°8728-2024-FAIN/UNJBG, certifico que el informe titulado: **EFFECTOS DE LA CONCENTRACIÓN DE CIANURO DE SODIO EN LA RECUPERACIÓN DE ORO POR LIXIVIACION EN BOTELLA Y COLUMNAS EN LA UNIDAD MINERA PUCAMARCA-PALCA** presentado por el Bachiller **WILVER JOSÉ MAMANI RODRIGUEZ** para optar el **Título de Ingeniero Metalurgista**, cumple con lo establecido en el reglamento de originalidad y similitud de trabajos de investigación y producción intelectual, considerando que según la evaluación realizada a través del software de similitud textual TURNITIN con código de identificación de reporte de similitud **oid: 23228:369227480** cuenta con el nivel de similitud que es permitido cuyo porcentaje es de **15 %** por lo que doy fe de la veracidad y queda declarado no cometer el delito de falsedad genérica del contenido del **INFORME DEL TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL** y está de acuerdo con el **NIVEL PERMITIDO**, para continuar con los trámites correspondientes y para su publicación en el repositorio institucional.

Firmo el presente certificado con fines de continuar con los trámites respectivos para su publicación.

Tacna, 22 de Julio del 2024

Firma del Asesor

DNI: 00476093

Ing. Julian Nieto Quispe



Huella dactilar

Firma del Titulante

DNI: 74830089

Wilver José Mamani Rodríguez



Huella dactilar

DEDICATORIA

Dedico esta tesis en primer lugar a Dios, porque es la razón de todo mi existir, él es mi fortaleza y todo lo puedo en él. A mi familia que siempre me apoyó y confió en mí, educándome y enseñándome que siempre hay que salir adelante pase lo que pase.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a cada una de las personas que me ayudaron y acompañaron a seguir adelante con la elaboración y desarrollo de este trabajo, ayudándome a no rendirme, motivándome y siempre haciendo que dé lo mejor de mí, con el gran objetivo de culminar mi formación profesional.

CONTENIDO

DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	iv
INDICE DE TABLAS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
RESUMEN	x
ABSTRACT	xi
INTRODUCCIÓN	12
CAPÍTULO I	2
ASPECTOS GENERALES	2
1.1. Descripción del problema	2
1.2. Justificación de la investigación	3
1.3. Objetivos	3
1.3.1. Objetivo general	3
1.3.2. Objetivos específicos	3
CAPÍTULO II	4
FUNDAMENTO TEÓRICO	4
2.1. Antecedentes del estudio	4
2.2. Marco teórico	7

□	Reacción anódica	25
□	Reacción catódica	25
	CAPÍTULO III	31
	FUNDAMENTO METODOLÓGICO	31
3.2.	Población y muestra	32
3.3.	Técnicas e instrumentos para la recolección de datos	33
3.4.	Desarrollo de las pruebas	35
4.2.	Pruebas de columna	45
	CONCLUSIONES	50
	RECOMENDACIONES	51
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52
	ANEXOS	54

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Propiedades del compuesto del cianuro	21
Tabla 2 Distribución granulométrica	35
Tabla 3 Leyes de cabeza por malla	36
Tabla 4 Condiciones para las pruebas de columnas	41
Tabla 5 Caracterización química del mineral de cabeza	42
Tabla 6 %Extracción Au a diferentes concentraciones	42
Tabla 7 Caracterización química del mineral de cabeza	46
Tabla 8 Resumen de los resultados de pruebas de lixiviación en columnas.	46
Tabla 9 Tabla de evaluación costo/beneficio	49

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Efecto de la concentración de cianuro	13
Figura 2 Diagrama de estabilidad del cianuro	14
Figura 3 Efecto del pH sobre la velocidad de disolución.	15
Figura 4 Efecto de la temperatura de Au en NaCN	18
Figura 5 Velocidad de disolución de Ag a diferentes presiones	20
Figura 6 Especiación de cianuro y ácido cianhídrico en soluciones	22
Figura 7 Diagrama Eh – pH para el sistema CN – H ₂ O	24
Figura 8 Diagrama Eh – pH para el sistema Au – CN – H ₂ O	26
Figura 9 Diagrama Eh – pH para el sistema Ag – CN – H ₂ O a	27
Figura 10 Celda de corrosión	28
Figura 11 Curvas de polarización	30
Figura 12 Localización de la unidad minera	31
Figura 13 Protocolo de pruebas	32
Figura 14 Ubicación de las celdas	33
Figura 15 Análisis granulométrico valorado por Au	36
Figura 16 Relación de la ratio de NaCN, Kg/t vs la ratio de cal	43
Figura 17 Relación de la ratio de NaCN, Kg/t vs la ratio de cal	44
Figura 18 Relación % de Extracción Au vs Concentración de cianuro (BRT)	45

Figura 19 Relación % de Extracción Au vs Concentración de cianuro (CLT)	47
Figura 20 Relación de la ratio de NaCN, Kg/t vs la ratio de cal, en columnas	48

RESUMEN

En este trabajo se desarrolla dos tipos de pruebas fundamentales y básicas en todo laboratorio metalúrgico, las cuales son las pruebas de botellas y de columnas para la evaluación de extracción y comportamiento del cianuro de sodio, que es el reactivo más confiable y usado en la recuperación de oro. Las cuales en esta ocasión se evaluó el consumo y concentración ideal del cianuro de sodio para una obtención de mejores resultados y análisis de su comportamiento, para posteriormente aplicarla a las distintas pruebas que sean solicitadas. Donde se pudo concluir que a medida de más concentración de cianuro la cinética de extracción mejora. Sin embargo, la idea consistió en elegir una concentración no tan elevada por temas de costos, sino una concentración con un buen porcentaje de extracción y que se ajuste a los temas de costos ideales. En este trabajo se desarrolló las pruebas a distintas concentraciones de cianuro de 60ppm, 100ppm, 120ppm, 150ppm y 200ppm.

Donde se pudo concluir que a nivel de recuperación y costo/beneficio la concentración adecuada sería la de 120 ppm, por un buen porcentaje de extracción y aumento de onzas producidas si esta concentración se lleva a las celdas de lixiviación.

ABSTRACT

In this work, two types of fundamental and basic tests are developed in every metallurgical laboratory, which are bottle and column tests for the evaluation of extraction and behavior of sodium cyanide, which is the most reliable reagent used in the recovery of gold. Which on this occasion the consumption and ideal concentration of sodium cyanide were evaluated to obtain better results and analyze its behavior, to later apply it to the different tests that are requested. Where it was possible to conclude that as the concentration of cyanide increased, the extraction kinetics improved, however, the idea was to choose a concentration that was not so high due to cost issues, but rather a concentration with a good extraction percentage and that adjusted to ideal cost issues. In this work, tests were carried out at different cyanide concentrations of 60ppm, 100ppm, 120ppm, 150ppm and 200ppm.

Where it was possible to conclude that at the recovery and cost/benefit level the appropriate concentration would be 120 ppm, for a good percentage of extraction and increase in ounces produced if this concentration is taken to the leaching cells.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, sabemos que el reactivo más usado para el proceso hidrometalúrgico de cianuración de minerales auríferos es el cianuro de sodio por su buena afinidad y sobre todo por el alto impacto en los costos operativos. Es por eso que una adecuada concentración de este reactivo es fundamental para poder obtener una buena extracción y mejoras al proceso, el entender adecuadamente los efectos de sus diferentes concentraciones nos permitirá entender el comportamiento de este reactivo, las pruebas metalúrgicas de estudio se realizaron a escala de laboratorio tanto en botellas como columnas, obteniéndose resultados fáciles de comprender.

El poder realizar estudios de este tipo fortalecerá el conocimiento del comportamiento del cianuro respecto a la recuperación del oro, a medida que uno lo va concentrando más y más en la lixiviación, así las empresas mineras puedan evaluar y determinar qué porcentaje de concentración les es adecuado y rentable implementar para poder mejorar su proceso, en caso utilicen una concentración diferente a las experimentadas en este estudio.

CAPÍTULO I

ASPECTOS GENERALES

1.1. Descripción del problema

En la actualidad, en muchas unidades mineras de oro del Perú se sigue utilizando el cianuro como un reactivo fundamental para la extracción de este metal precioso, cada unidad con diferentes concentraciones de este reactivo debido al comportamiento mineralógico de sus reservas o estudios previamente realizados con el objetivo de una buena recuperación, sin embargo en algunos casos por temas de ahorro de ratios de consumo de cianuro no se llega a acondicionar adecuadamente las celdas de lixiviación y por lo tanto no se logra obtener correctas recuperaciones, es por eso que obtener sólidos conocimientos de los efectos de las concentraciones de cianuro es fundamental para poder optar por una óptima en beneficio de la recuperación del oro.

El siguiente trabajo, propone realizar estudios de estos efectos de concentración del cianuro en dos de las pruebas metalúrgicas más utilizadas a escala laboratorio, como son las de botellas y columnas. Dichas pruebas se llevaron a cabo con diferentes concentraciones de cianuro para comparación de resultados.

1.2. Justificación de la investigación

El presente trabajo realizado a diferentes concentraciones de cianuro nos permitirá comprender mejor los efectos de estos en la recuperación de oro, así optando por uno que sea óptimo para el proceso de lixiviación. Las unidades mineras que procesan minerales auríferos como ésta buscan alternativas de concentraciones óptimas de cianuro en beneficio para una mejor recuperación del oro.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Evaluar el efecto del cianuro a diferentes concentraciones en la recuperación de oro en pruebas metalúrgicas de botellas y columnas, para poder optar por la elección adecuada y poder implementarlo al proceso.

1.3.2. Objetivos específicos

- Evaluar las concentraciones de cianuro a escala laboratorio en pruebas de lixiviación de botellas y columnas.
- Evaluar las diferentes recuperaciones obtenidas en las distintas concentraciones en cada prueba realizada.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del estudio

La historia de la humanidad confirma el reconocimiento generalizado del oro como un metal precioso, caracterizado porque además de su color y consistencia difíciles de copiar, es un metal que favorece la formación de aleaciones. Estas propiedades hicieron del oro la primera opción para acuñar y valorar hace miles de años. Sus propiedades únicas, adaptabilidad, maleabilidad y densidad lo hacen ideal, especialmente en las industrias de joyería y tecnología. La civilización y este metal se desarrollaron en paralelo y lo vieron como un actor importante en el proceso de transformación humana en términos de su uso. (Guillermo Zabaleta, A. 2000).

La gente valora el oro por su color brillante y su resistencia al deslustre, por lo que se utiliza para fabricar joyas y adornos decorativos especiales. El culto al oro por parte de los antiguos llevó a su uso en artefactos religiosos durante muchos siglos. Egipto fue un importante productor de oro en la antigüedad. Heródoto menciona varios grandes centros mineros de oro en Asia Menor, y Estrabón menciona la minería de oro en muchos lugares diferentes.

Para los alquimistas medievales, el oro era considerado metal perfecto. Se identificó con el sol por su color amarillo brillante y se le dio el símbolo de un círculo con un punto en el medio. A lo largo de los siglos, los monarcas y las iglesias han fomentado y prohibido alternativamente la producción de oro. (Adams, 2005).

El oro y su historia comienza desde mucho tiempo atrás. Se han encontrado escamas de oro en cuevas españolas utilizadas por los pueblos del Paleolítico alrededor del 40, 000 a.C. El oro es el "hijo de Zeus", lo escribió el poeta griego Píndaro. Los antiguos romanos llamaron al metal amarillo AURUM ("amanecer brillante"). El oro es el primer elemento y metal en ser nombrado en la Biblia, donde aparece en más de 400 referencias (Yannopoulos, 1990).

En los últimos años, la industria del oro ha estado muy activa en exploración y metalurgia. Muchos desarrollos han dado como resultado calidades económicas de minerales que alguna vez se consideraron no rentables. Incluso el proceso tradicional con cianuro se ha mejorado con el tiempo, haciéndolo más económico y eficiente. Los avances en tecnologías como la lixiviación en pilas, la lixiviación in situ, el carbono en lodo (CIP), la resina en lodo (RIP), el carbono en lixiviado (CIL) y el pretratamiento de minerales refractarios han impactado la industria del oro. También se están realizando investigaciones y desarrollo de agentes lixiviantes menos tóxicos y más eficaces, que eventualmente podrían reemplazar el cianuro tóxico y resolver los

problemas que enfrenta actualmente la industria. El propósito de este artículo es resumir los avances en la recuperación de oro utilizando agentes lixiviantes convencionales y no convencionales. (Udupa et, 1990).

La firma que se especializa en análisis y economía del mercado del oro, dijo recientemente que las crecientes entradas de ETF (258 toneladas) superaron la debilidad en otras partes del mercado e impulsaron la demanda de oro en un 3% en el tercer trimestre. Si bien siguen siendo saludables, las compras de los bancos centrales están muy por debajo de los niveles récord del tercer trimestre de 2018. La persistencia de los precios del oro, que alcanzaron niveles multianuales y en algunos casos récord, así como las preocupaciones de los consumidores sobre la salud de la economía mundial obstaculizaron la demanda de joyería (-16%). Asimismo, la caída de la demanda de lingotes y monedas de oro en el tercer trimestre (-50%) estuvo determinada principalmente por los precios del oro: los inversores privados aprovecharon la oportunidad para obtener ganancias en lugar de realizar nuevas compras. La demanda de oro cayó un 4% a medida que continuaron los problemas económicos, pero la nueva infraestructura 5G ayudó a frenar la caída en la industria electrónica clave. Un aumento del 10% vinculado al precio en el reciclaje de oro impulsó la oferta de oro en un 4% a 1,222 toneladas. (GOLDHUB, 2019).

2.2. Marco teórico

2.2.1. Fundamentos del proceso de cianuración del oro

La cianuración es un proceso de la hidrometalurgia, que utiliza una solución de cianuro alcalino como medio químico para lixiviar el oro y la plata que se encuentran contenidos en minerales de oro/plata. (Valenzuela García, 2011).

Para que ocurra este proceso de lixiviación, la solución lixivante debe presentar tres componentes químicos fundamentales. Los cuales son:

- El ion cianuro (CN^-)
- El oxígeno disuelto en la solución (O_2)
- El ion hidróxilo (OH^-)

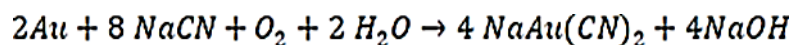
Los dos primeros son reactivos químicos que disuelven metales preciosos, mientras que el último es un componente importante que confiere a la solución propiedades alcalinas, lo que permite que la acción química de los iones de cianuro sea más eficiente, menos riesgosa y más económica debido a los efectos positivos que conlleva. (Valenzuela García, 2011).

2.2.2. Solubilidad del oro en soluciones acuosas de cianuro

Se han propuesto varias teorías para poder explicar el mecanismo por el cual el oro y la plata se disuelven en soluciones acuosas de cianuro. Entre ellos tenemos a continuación:

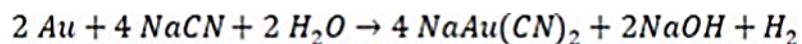
2.2.2.1. Teoría del oxígeno

Propuesto en 1846 por Elsner, quien determinó que el oxígeno era esencial para la disolución del oro en una solución de cianuro, Elsner propuso una reacción química la cual es:



2.2.2.2. Teoría del hidrógeno

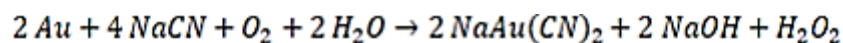
De 1888 a 1892 fue propuesto por J. Janin, quien patentó una solución de oro que demostraba que durante la cianuración del oro se producía gas hidrógeno. La reacción es:

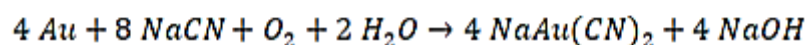


En 1893, McLaurin y en 1896, Chrity concluyeron en pruebas experimentales que el oxígeno es esencial para la cianuración del oro, corroborando así la teoría de Elsner anteriormente mencionada.

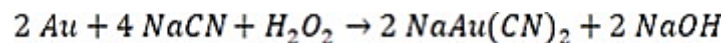
2.2.2.3. Teoría del peróxido de hidrógeno

En 1896, G. Bodlander propuso disolver oro en una solución de cianuro y actuar en dos etapas según la siguiente reacción:

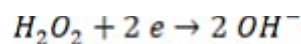




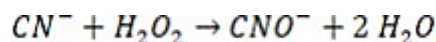
Como se puede apreciar, el peróxido de hidrógeno se forma como intermedio. Bodlander, pudo calcular que según su reacción se formó el 70% de la cantidad teórica. Muchos experimentos han demostrado que la disolución del oro y la plata en ausencia de cianuro de sodio y presencia de oxígeno es un proceso muy lento, por lo que se produce una segunda reacción de Bodlander.:



En donde se produce una reacción de tipo reducción:



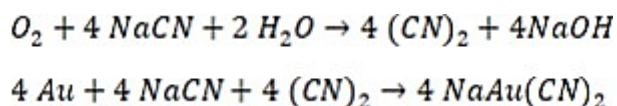
Ocupa una posición relativamente pequeña. De hecho, si hay una gran cantidad de H_2O_2 , la reacción se inhibirá porque los iones cianuro se oxidan a cianato. Los iones cianato no tienen ningún efecto disolvente sobre el oro:



2.2.2.4. Teoría de formación de cianógeno

En 1896 S.B. Christi, creía que el oxígeno era necesario para la formación de

gas cianógeno, que creía que era un agente atacante activo para la disolución del oro y la plata. A continuación, se muestran las reacciones:



La suma de estas dos reacciones resultante nos da como resultado la ecuación propuesta de Elsner.

2.2.2.5. Teoría de la formación de cianatos

En 1905 Mac Acur, planteó la hipótesis de que si se necesitaba oxígeno para la disolución, entonces el cianato de potasio (que creía que se formaba por oxidación del cianuro) podría ser en realidad el agente activo responsable de la disolución. Pero esta hipótesis fue refutada en 1913 por Greene, quien demostró que el cianato no disuelve el oro y la plata

En 1934, Barsky y sus colegas determinaron las energías libres de formación de complejos de cianuro de oro y plata y calcularon los cambios de energía libre de la reacción propuesta a partir de estos datos.

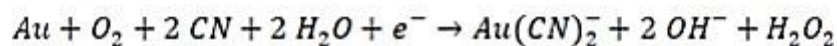
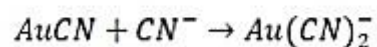
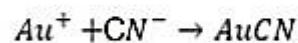
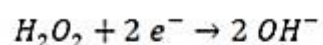
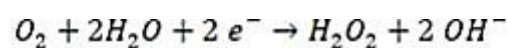
Se prefiere la teoría de Elsner y Bodlander, que muestra una constante de equilibrio más alta, de modo que la ecuación continúa hasta que se consume todo el cianuro o se disuelve todo el oro.

La ecuación de reacción de Janin, es termodinámicamente imposible porque

la constante de equilibrio que presenta es demasiado baja. (Valenzuela García, 2011).

2.2.2.6. Teoría de la corrosión

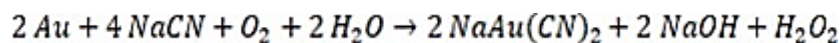
En 1943, B. Boonstra reconoció y demostró por primera vez que la disolución de una solución acuosa de oro en cianuro, es similar al proceso de corrosión de metales, donde el oxígeno disuelto en la solución se reduce a peróxido de hidrógeno y iones de hidróxido. Supongo que la reacción de Bodland se puede dividir en las siguientes etapas (Valenzuela García, 2011):



Más tarde, en 1947, Thompson experimentó y demostró esta teoría.

2.2.2.7. Postulado de habashi

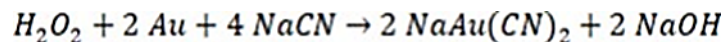
En 1966 – 1967 Habashi apoyó la primera ecuación de reacción de Bodland, que consistía en:



Y considera que el proceso en el cual se disuelve el oro es de naturaleza netamente electroquímica. Esta conclusión se reafirma en los siguientes hechos:

- ✓ Se consume un mol de O₂ por cada dos equivalentes de metal disuelto.
- ✓ Por cada dos equivalentes de metal disuelto se consumen 4 moles de cianuro.
- ✓ El peróxido de hidrógeno se forma durante la disolución del oro y la plata, formándose un mol de H₂O₂ por cada dos equivalentes de metal disuelto.

La disolución tanto del oro y la plata en la solución NaCN + H₂O₂ sin la presencia de oxígeno, se ha podido confirmar que es un proceso lento. A continuación, en la siguiente reacción:



Esto muestra que cuando hay un exceso de H₂O₂, la disolución del oro y la plata se inhibe porque los iones cianuro se oxidan a cianato, y el cianato no tiene disolución metálica.

2.2.3. Efecto de las principales variables de cianuración

Las variables clave involucradas en todo el proceso de cianuración de minerales de oro, son las siguientes:

2.2.3.1. La concentración de cianuro

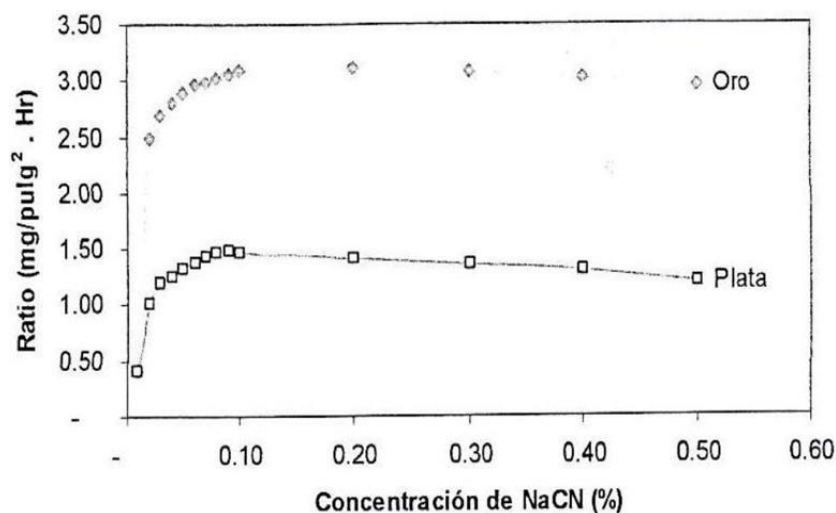
A medida que aumenta la concentración de cianuro, la velocidad de disolución del oro muestra un comportamiento casi lineal y aumenta rápidamente hasta alcanzar un valor máximo, después del cual la cantidad de oro disuelto ya no

aumenta, sino que aumenta ligeramente al aumentar la concentración de cianuro.

Ralentiza el efecto y aumenta el consumo (Valenzuela García, 2011).

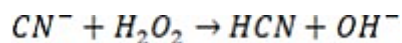
Figura 1

Efecto de la concentración de cianuro

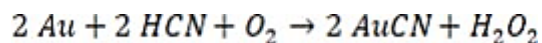


Nota: Hidrometalurgia del Oro Valenzuela García Jesús Leobardo.

A medida que aumenta el pH de la solución, la concentración de cianuro disminuye. Es decir, los iones cianuro se hidrolizan según la siguiente reacción:



El agua, el gas (HCN) y el oxígeno en solución atacan el oro insoluble de AuCN según la siguiente reacción:



En el campo experimental, la concentración de cianuro oscila ente 0,1 y 1,5g/L.

2.2.3.2. Efecto de la alcalinidad

En resumen, es muy importante mantener la solución de cianuro en un ambiente alcalino durante el proceso de lixiviación de oro por dos razones:

- Previene la hidrólisis del cianuro.
- Previene la descomposición del cianuro bajo la influencia del dióxido de carbono atmosférico.

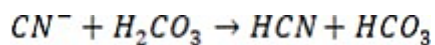
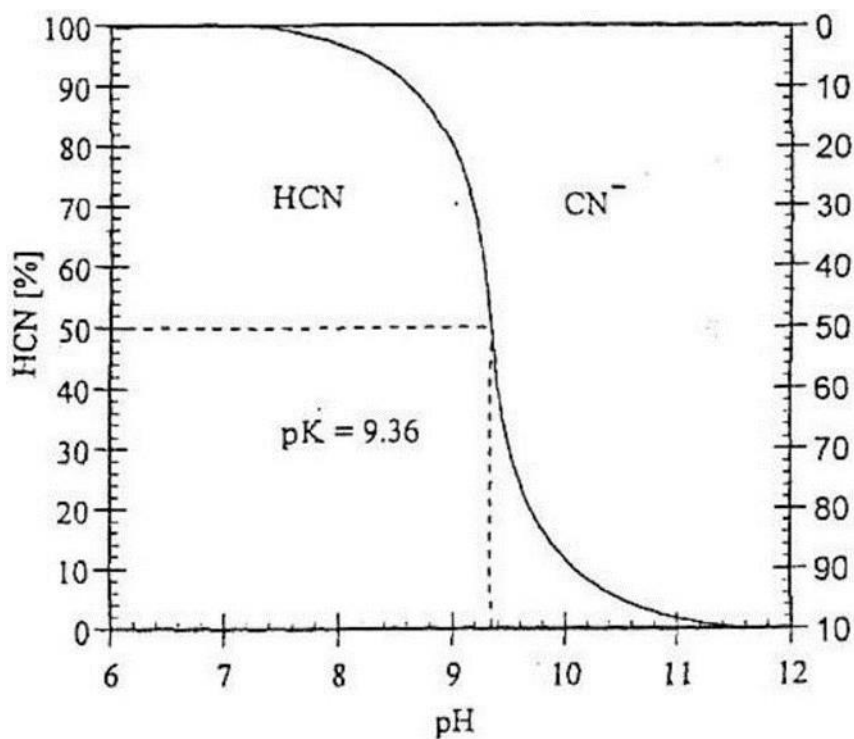


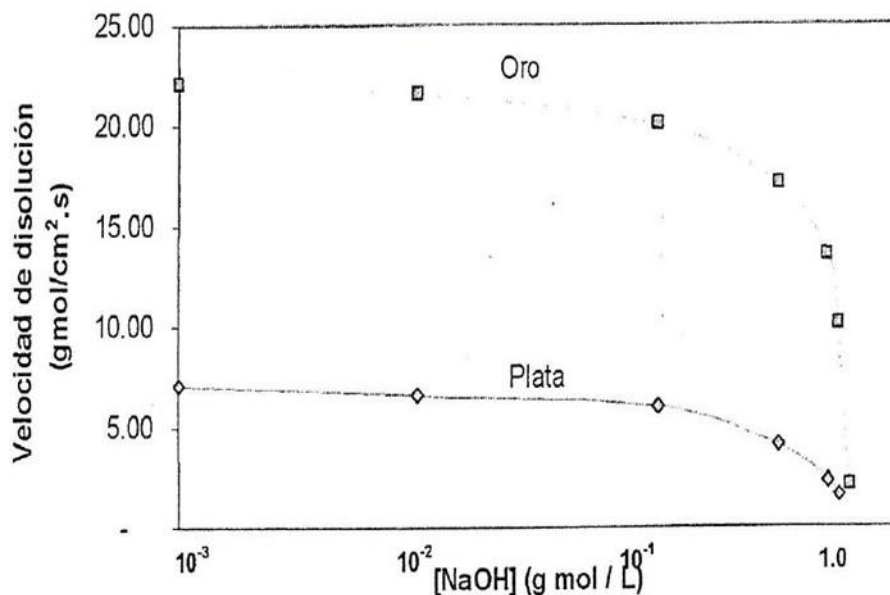
Figura 2
Diagrama de estabilidad del cianuro



Nota: Hidrometalurgia del Oro Valenzuela García Jesús Leobardo.

En ambos casos se libera HCN, que no puede actuar como disolvente del oro y la plata. Sin embargo, una alcalinidad alta disminuye linealmente la velocidad de disolución en el rango de pH de 11 a 13. La alcalinidad de la solución de cianuro debe controlarse con mucho cuidado para lograr altas tasas de disolución del oro y la plata. En realidad, el rango de pH está entre 10,5 y 11,5.(Valenzuela García, 2011). Una elevada alcalinidad por otra parte hace decrecer la velocidad de disolución, como se observa en la siguiente imagen.

Figura 3
Efecto del pH sobre la velocidad de disolución.



Nota: Hidrometalurgia del Oro Valenzuela García Jesús Leobardo.

Por lo tanto, los iones de hidróxido son un componente importante de la solución de cianuro para garantizar que tenga propiedades alcalinas que permitan que

los iones de cianuro funcionen de manera más efectiva y reduzcan el riesgo. Esta alcalinidad también crea aspectos positivos de la cianuración como proceso eficiente y económico, que incluyen:

- La lixiviación en medios alcalinos es más selectiva en cuanto al rendimiento.
- Las soluciones alcalinas son menos corrosivas para los materiales de fabricación de equipos.
- Fácil eliminación de residuos y control de la contaminación ambiental.

Se puede utilizar cal o soda cáustica (NaOH) como agente alcalino para mantener valores de pH de 10,5 y 11,5 en la planta de procesamiento. La cal se usa más comúnmente porque tiene una acción química alcalina más alta y es más barata. El hidróxido de sodio es más caro que la cal, pero tiene la ventaja de ser muy soluble, lo que facilita su preparación, manipulación y dosificación.

Por ello, el uso de cal o soda cáustica como agente de control del pH debe comprobarse con mucho cuidado en cada caso, ya que cada sustancia tiene un efecto químico diferente en el proceso global:

- Efectos incrustantes de sales insolubles como CaCO_3 , Mg(OH)_2 , $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, etc.
- Dispersión y floculación.
- Efecto sobre la viscosidad de la pulpa.

- Impacto en la química de la recuperación de oro a partir de pulpa (CIP) y soluciones claras (CIC y Merrill Crowe).
- Impacto en la composición química de los sedimentos de relaves.
- Impacto de la velocidad de cómo se disuelve del oro y la plata durante el proceso de la lixiviación.

Si se utiliza cal, ésta juega un papel muy importante en todo el proceso de beneficio de cianuro para la minería de oro y plata. Nuestras características clave incluye:

- Inhibe la hidrólisis del cianuro.
- Componentes básicos de minerales neutralizados, agua dulce y productos de reacción.
- Flocculan las llamadas lamas.
- Los finos aglomerados provenientes del pretratamiento del mineral se lavarán y formarán pilas.
- Promover el tratamiento de aguas residuales y el control de la contaminación ambiental.(Valenzuela García, 2011).

2.2.3.3. Efecto del tiempo de cianuración

Esto varía ampliamente y depende de factores como la composición mineral, el tamaño de las partículas de oro, la porosidad del mineral, la concentración de cianuro

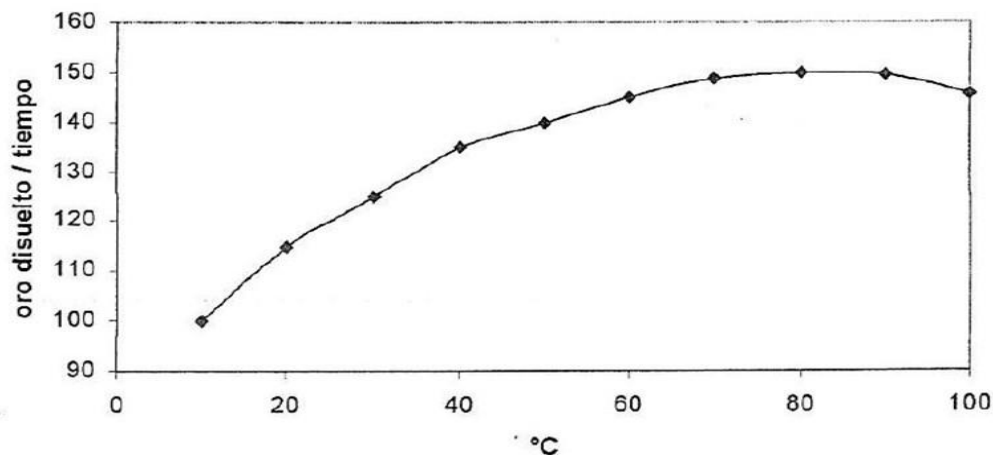
en solución y el grado de liberación (Valenzuela García, 2011).

2.2.3.4. Efecto de la temperatura

Cabe señalar aquí, que un aumento de temperatura también aumenta la velocidad de disolución del oro, pero el contenido de oxígeno de la solución tiende a disminuir. Por tanto, existe una temperatura que da la velocidad máxima de disolución del oro, que es de unos 85°C. (Valenzuela García, 2011).

Figura 4

Efecto de la temperatura sobre la velocidad de disolución de Au en NaCN



Nota: Hidrometalurgia del Oro Valenzuela García Jesús Leobardo.

2.2.3.5. Efecto del tamaño de partícula

El mineral debe triturarse muy finamente para liberar las partículas de oro y hacerlo apto para la lixiviación con una solución alcalina de cianuro. Barrsky y colaboradores (1934) informaron una velocidad máxima de disolución de oro de 3,25

mg/cm²/h en condiciones óptimas de aireación y agitación. Esto corresponde a una tasa de penetración de 1,68 μm/h por lado de una partícula de oro plana; lo que significa que una partícula de oro de 45 μm de espesor (m350) se disuelve a través del cianuro y pierde una reducción total de espesor de 3,36 μm/h. (m100) las partículas se disuelven en 44 horas. Esto está de acuerdo con Hedley y Tabacnick (1958) y Henley (1975). Por tanto, las partículas gruesas se recuperan mediante análisis gravimétrico (Valenzuela García, 2011).

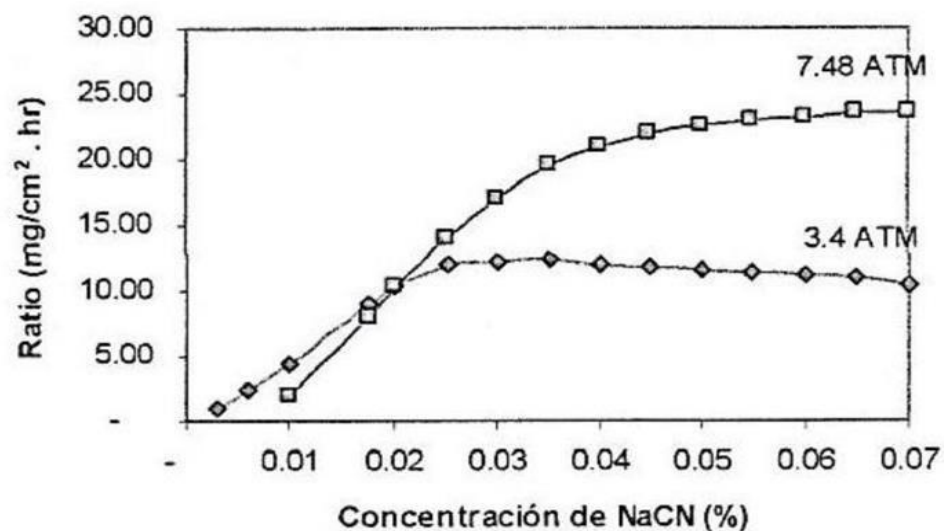
2.2.3.6. Efecto de la aireación

El oxígeno es importante para la disolución del oro, pero la cantidad de oxígeno disuelto en una solución diluida de cianuro depende de los siguientes factores:

- La altura.
- Temperatura de la disolución.
- El tipo de la agitación.
- Fuerza iónica de la disolución.

Figura 5

Velocidad de disolución de Ag a diferentes presiones de O₂ y diferentes concentraciones de NaCN a 24°C



Nota: Hidrometalurgia del Oro Valenzuela García Jesús Leobardo.

2.2.4. Reacciones a las soluciones de cianuración

Las sales de cianuro simples, como el cianuro de sodio, el cianuro de potasio y el cianuro de calcio, se disuelven en agua para formar los respectivos cationes metálicos y los iones de cianuro libres.

La Tabla1, muestra la solubilidad y el contenido presente de cianuro a las diferentes sales. La elección del tipo de cianuro depende del método de aplicación, costo y cantidad del reactivo.

Tabla 1*Propiedades del compuesto del cianuro*

Compuesto	Cianuro Disponible (%)	Solubilidad en agua a 25°C (g/100cc)
NaCN	53,1	48
KCN	40	50
Ca (CN)2	56,5	Se descompone

Nota: Marsden John and House I.

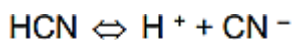
Julian y Smart, compararon los efectos de disolución de los cianuros de amonio, sodio, potasio, magnesio, calcio, estroncio y bario en oro y plata y descubrieron que los radicales alcalinos no afectaban el efecto de disolución específico de los cianuros.

2.2.4.1. Descomposición de las soluciones de cianuro

El cianuro se hidroliza en agua para formar cianuro de hidrógeno (HCN) e iones hidróxido (OH⁻), aumentando respectivamente el pH:



El ácido cianhídrico, es un ácido débil que se disocia parcialmente en agua de la siguiente manera:



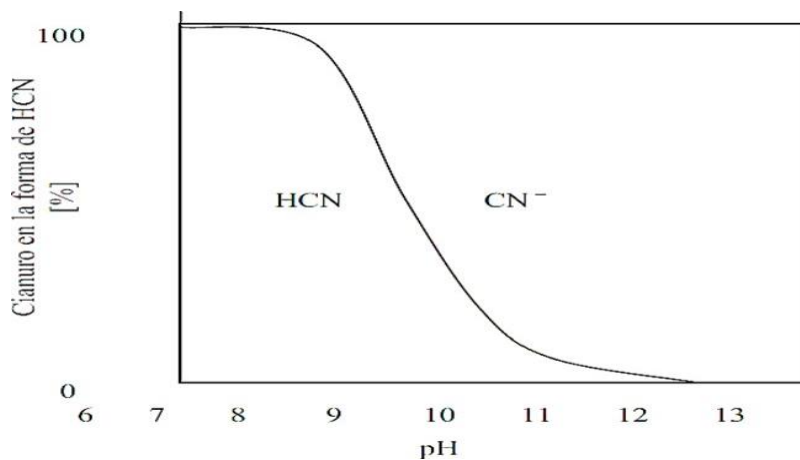
$$K_a (25 \text{ }^\circ\text{C}) = 6.2 \times 10^{-10} \text{ y } \log K = 9.21.$$

La Figura 6, muestra el alcance de la reacción de disociación en estado estacionario en función del pH. A pH 8,4, menos del 90% se encuentra en forma de

ácido cianhídrico. A un pH de aproximadamente 9,3, la mitad del cianuro total existe como ácido cianhídrico y la otra mitad como iones de cianuro libres (CN^-), mientras que a un $\text{pH} = 10,2$ más del 90% del cianuro total existe como cianuro libre (Valenzuela García, 2011).

Figura 6

Especiación de cianuro y ácido cianhídrico en soluciones acuosas como función del pH



Nota: Hidrometalurgia del Oro Valenzuela García Jesús Leobardo.

La pérdida de cianuro en solución se debe al hecho de que el ácido cianhídrico tiene una presión de vapor relativamente alta (100 KPa a 26 °C) y; por lo tanto, se evapora rápidamente en la superficie del líquido en condiciones ambientales. Por lo tanto, muchos sistemas de lixiviación con cianuro operan a un pH que minimiza la pérdida de cianuro, típicamente por encima de 10, pero un pH demasiado alto (por encima de 11,5) puede afectar negativamente la lixiviación de metales preciosos. Las funciones de las bases libres en la cianuración son las siguientes:

- Evita la pérdida de cianuro por hidrólisis.
- Previene la pérdida de cianuro por acción del dióxido de carbono del aire.
- Disolver el bicarbonato en agua antes de usarlo en cianuración.
- Neutralizar compuestos ácidos en el agua como sulfatos de hierro, ferrosos y magnesio antes de agregarlos al ciclo del cianuro.
- Neutraliza los componentes ácidos del mineral.
- Ayuda a sedimentar las partículas de mineral fino.

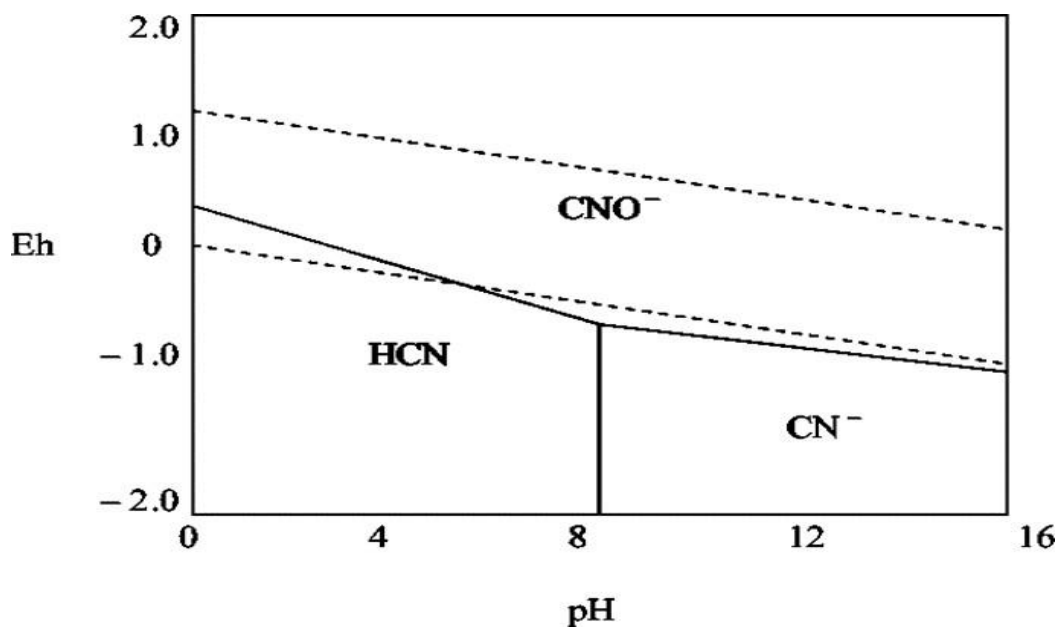
En presencia de oxígeno y en condiciones oxidantes, tanto el hidrógeno como el cianuro libre pueden oxidarse a cianato, como se muestra en la Figura 7, pero el cianato no disuelve el oro.

En la aplicación si se requiere un agente oxidante fuerte, se puede utilizar ozono (O₃), peróxido de hidrógeno (H₂O₂) o ácido hipocloroso (HOCl), para acelerar significativamente la reacción.

El cianuro libre forma complejos con muchas especies metálicas, principalmente metales de transición, cuya estabilidad y solubilidad varían ampliamente.

Figura 7

Diagrama Eh – pH para el sistema CN – H₂O a 25 °C. Concentración de cianuro = 10⁻³ M, P(O₂) = 1 atm

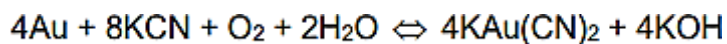


Nota: Misari F. “Metalurgia del Oro”

2.2.5. Disolución de los metales preciosos

2.2.5.1. Naturaleza electroquímica de la cianuración

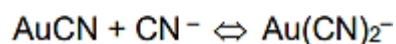
En 1954, Kudrick y Kellogg lograron un avance significativo en la comprensión de la química del cianuro de oro, quienes demostraron las propiedades electroquímicas del cianuro de oro. La reacción de disolución del oro se llama ecuación de Elsner y se puede escribir como:



Esta reacción consta de dos semirreacciones, ánodo y cátodo.

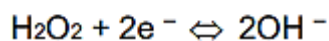
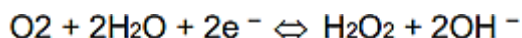
- **Reacción anódica**

La reacción anódica ,implica la oxidación de oro (0) a oro (I) mediante dos pasos: el oro reacciona con iones de cianuro para formar una película superficial (probablemente AuCN) y luego forma un complejo de cianuro de oro (I). – observado en las siguientes reacciones:



- **Reacción catódica**

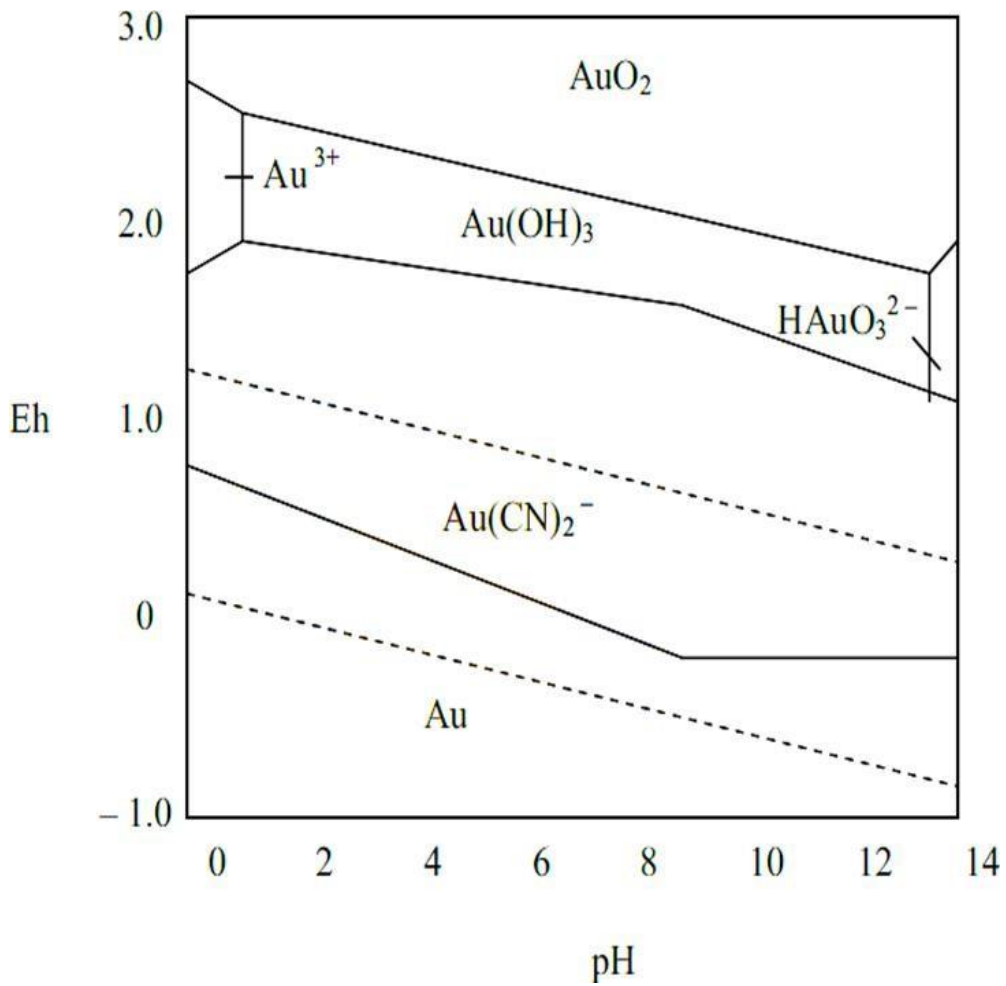
Todas las reacciones anteriores van acompañadas de una reducción catódica de oxígeno en la superficie del metal. En la superficie del oro, la reacción toma la forma de reducción de oxígeno a peróxido y reducción de peróxido a grupos hidroxilo:



La reacción de la solución de plata es similar a la ecuación de la solución de oro. Los diagramas pH – potencial (diagramas de Pourbaix) para los sistemas Au– CN–H₂O y Ag–CN–H₂O se muestran en las Figuras 8 y 9.

Figura 8

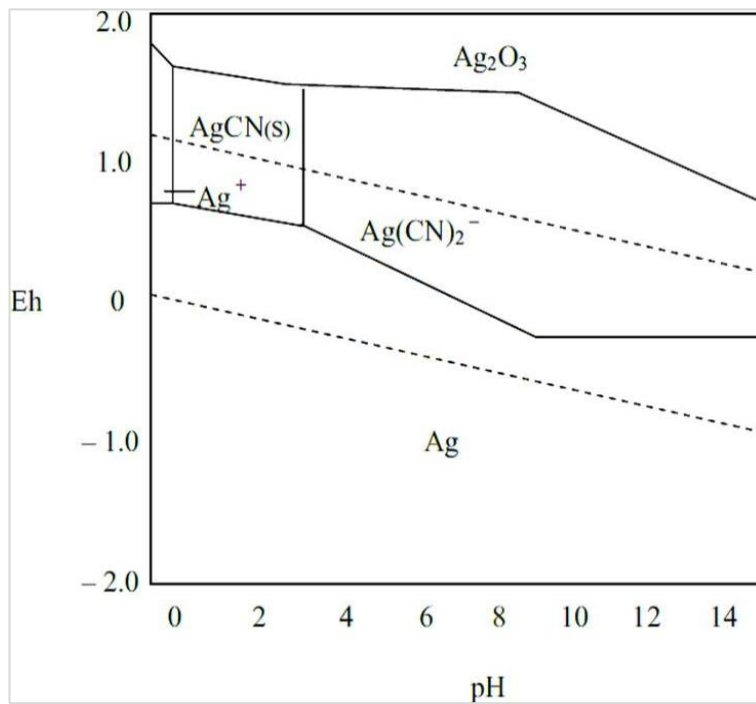
Diagrama Eh – pH para el sistema Au – CN – H₂O a 25 °C. Concentración de todas las especies de oro solubles = 10⁻⁴ M, [CN⁻] = 10⁻³ M, P(O₂) = 1 atm



Nota: Misari F. "Metalurgia del Oro".

Figura 9

Diagrama Eh – pH para el sistema Ag – CN – H₂O a 25 °C. Concentración de todas las especies de plata solubles = 10⁻⁴ M, [CN⁻] = 10⁻³ M, P(O₂) = 1 atm.



Nota: Misari F. “Metalurgia del Oro”

A partir de estos diagramas de estabilidad acuosa se puede observar lo siguiente:

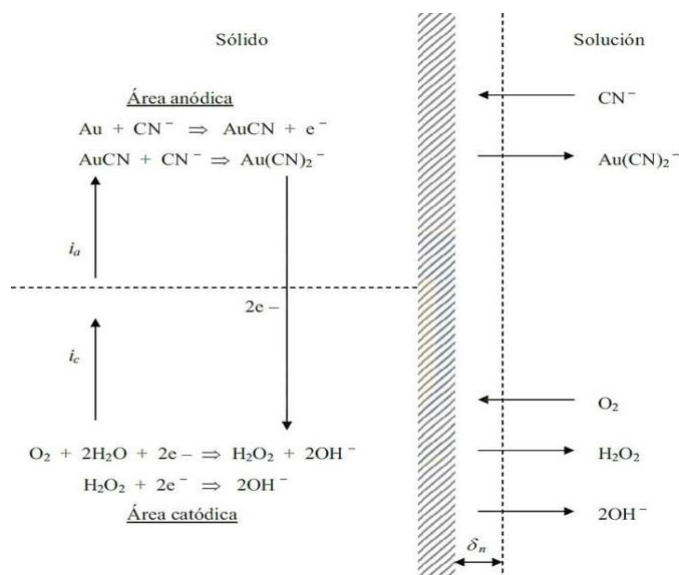
- Tanto el oro, como la plata se comportan de manera similar en soluciones con cianuro.
- El Au (CN)₂ y Ag (CN)₂ son los principales complejos iónicos.
- El sólido AgCN se forma sólo bajo pH (<3,5).

2.2.6. Aspectos cinéticos

El proceso de disolución de oro y plata en solución de cianuro implica reacciones heterogéneas en la interfaz sólido-líquido, como se muestra en la Figura 10.

Figura 10

Celda de corrosión



Nota: Representación esquemática de una celda de corrosión local en la superficie del oro, en contacto con una solución de cianuro que contiene oxígeno, i_a = corriente anódica, i_b = corriente catódica Misari F. “Metalurgia del Oro”.

Por lo tanto, los siguientes pasos secuenciales pueden considerarse como los más importantes en la lixiviación de estos metales preciosos:

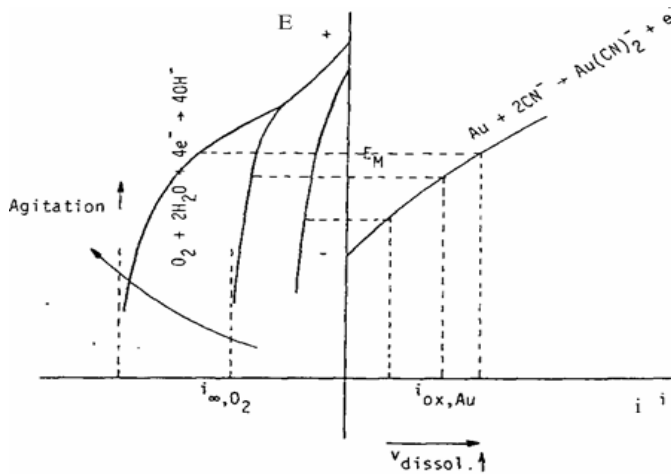
- A. Absorción de oxígeno en la solución.
- B. Transporte de cianuro y oxígeno disuelto al interfaz sólido – líquido.
- C. Adsorción de reactivos (CN^- y O_2) en la superficie sólida.
- D. Reacción electroquímica.
- E. Desorción de complejos solubles de cianuro de oro, cianuro de plata y otros productos de reacción de la fase sólida.
- F. Transportar productos de desorción en solución.

El proceso de cianuración depende de varios parámetros, como la disponibilidad de oxígeno en la interfaz sólido-líquido, la concentración de cianuro en solución, la temperatura de la suspensión, el pH y Eh de la suspensión del solvente sólido, el área de superficie disponible y la velocidad de agitación.

2.2.6.1. Curvas de polarización

Los aspectos cinéticos de la disolución del oro en medios de cianuro también se pueden explorar utilizando las curvas de polarización de los sistemas electroquímicos involucrados, como se muestra en la Figura 11.

Figura 11
Curvas de polarización



Nota: Interpretación de la cinética de cianuración de oro por el intermedio de las curvas de polarización. Misari F. “Metalurgia del Oro”

Por lo tanto, si la concentración de cianuro es suficiente (10-2 M), la velocidad de disolución del oro se controla mediante la difusión del oxígeno disuelto en las partículas de oro. Por tanto, cualquier condición que pueda acelerar o catalizar la reacción de reducción del oro con oxígeno disuelto, como agitación, temperatura, pH, etc., es muy favorable para la disolución del oro en minerales. (Misari, 1993).

CAPÍTULO III

FUNDAMENTO METODOLÓGICO

3.1. TIPO Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

3.1.1. Tipo de investigación

El presente trabajo se realizó de manera experimental, que utiliza experimentos y principios que se encuentran en el método científico.

3.1.2. Diseño de investigación

3.1.2.1. Localización geográfica

La unidad minera se encuentra ubicada en la región sur del Perú, distrito de Palca, provincia de Tacna, muy cercana al hito 52, en la frontera con Perú y Chile.

Figura 12

Localización de la unidad minera



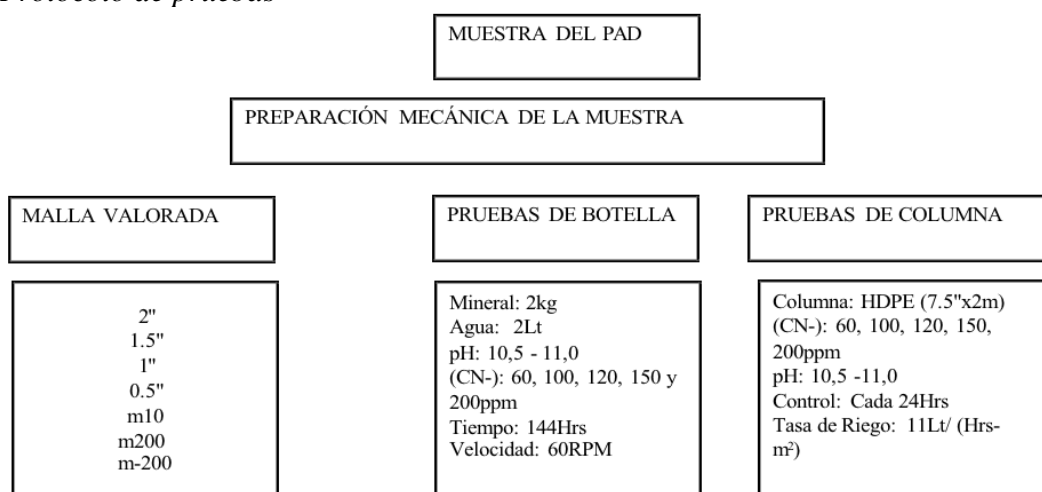
Nota: Google Maps.

3.1.2.2. PROTOCOLO DE PRUEBAS

Se detalla el plan de pruebas a continuación:

Figura 13

Protocolo de pruebas

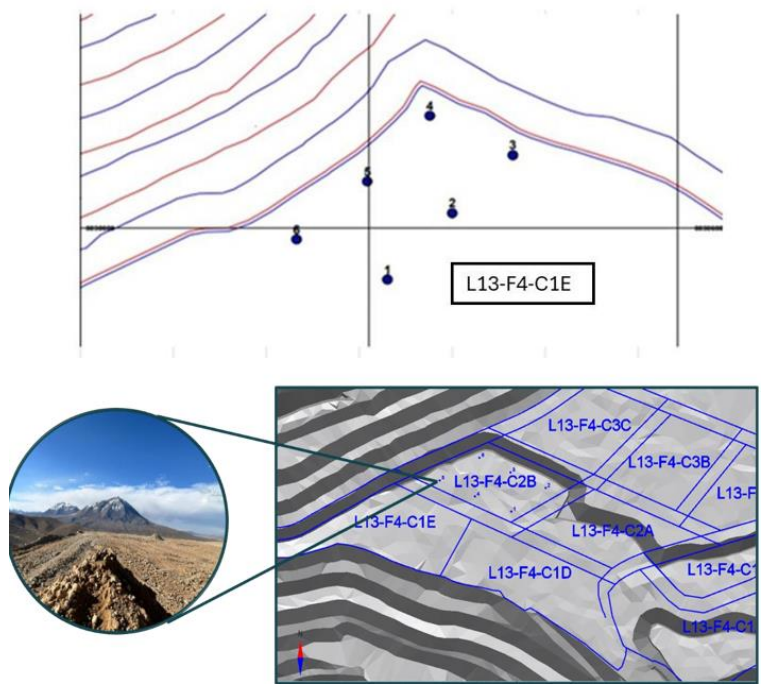


Nota: Preparación de muestras y corrido de pruebas, según laboratorio.

3.2. Población y muestra

Se tomará muestra representativa de la celda de lixiviación L13-F4-C2B para columnas mediante calicatas la cual consta de 6 puntos diferentes distribuidos en dicha celda. Y para las pruebas de botellas se tomará muestras del L13-F4-C1E, la cual comprende también de 6 puntos. Estas muestras son provenientes del tajo Checocollo, la cual es un depósito epitermal que provee todas las celdas de lixiviación en su mayoría en esta unidad minera.

Figura 14
Ubicación de las celdas



Nota: Planos proporcionados por el área de geología.

3.3. Técnicas e instrumentos para la recolección de datos

3.3.1. Técnica de análisis de datos

Para el presente estudio desarrollado se realizó los análisis estadísticos en la hoja de cálculo Microsoft Excel.

3.3.1.1. Materiales y equipos

- Chancadora primaria.
- Chancadora secundaria.

- Cuarteador Gilson.
- Tamizador Gilson.
- Horno de secado.
- Balanza digital.
- Mesa de rodillos.
- Botellas.
- Columnas HDPE.
- pH metro.
- Papel filtro.
- Materiales de vidrio.
- Tubos de ensayo.
- Bandejas.
- Pizetas.
- Palas.

3.3.1.2. Reactivos

- Cianuro de Sodio.
- Cal.
- Agua de proceso.
- Agua destilada.

- Solución Barren.
- Nitrato de plata.
- Rodamina.

3.4.Desarrollo de las pruebas

3.4.1. Datos iniciales

3.4.1.1.Análisis granulométrico de cabeza

Tabla 2
Distribución granulométrica

Distribución Granulométrica					
Nº Malla	Abertura (µm)	Masa Retenido (Kg)	Retenido (%)	Retenido Acumulado (%)	Pasante Acumulado (%)
7"	177800	0,00	0,00	0,00	100,00
6"	152400	0,00	0,00	0,00	100,00
5"	127000	0,00	0,00	0,00	100,00
4"	101600	0,98	4,02	4,02	95,98
3"	76200	2,63	10,79	14,80	85,20
+2"	50800	2,38	9,76	24,57	75,43
+1 1/2"	38100	1,32	5,41	29,98	70,02
+1"	25400	1,68	6,89	36,87	63,13
+1/2"	12700	2,64	10,81	47,67	52,33
+10M	2000	6,54	26,82	74,50	25,50
+200M	75	3,85	15,79	90,29	9,71
-200M	10	2,37	9,71	100,00	0,00

Nota: Datos obtenidos del área de Metalurgia

3.4.1.2. Leyes de cabeza

Tabla 3

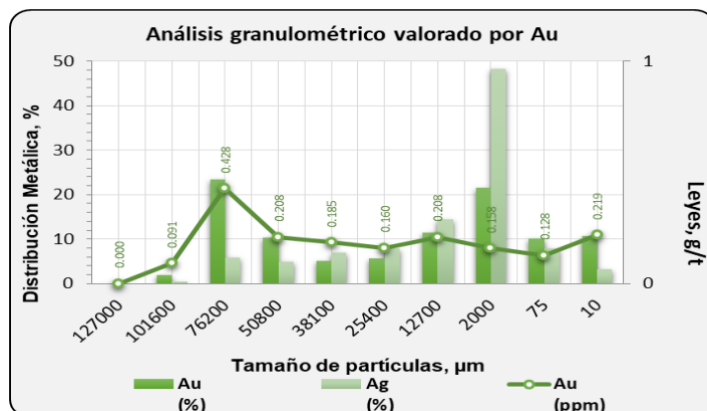
Leyes de cabeza por malla

Leyes Cabeza		
Nº Malla	Au (ppm)	Ag (ppm)
7"	0,00	0,00
6"	0,00	0,00
5"	0,00	0,00
4"	0,09	0,30
3"	0,43	1,50
+2"	0,21	1,40
+1 1/2"	0,19	3,60
+1"	0,16	3,20
+1/2"	0,21	3,70
+10M	0,16	5,00
+200M	0,13	1,40
-200M	0,22	0,90
Cabeza calculada	0,20	2,78
Cabeza ensayada	0,21	2,76

Nota: Datos obtenidos de Metalurgia

Figura 15

Análisis granulométrico valorado por Au



Nota: Dato proporcionado por el área de metalurgia.

3.4.2. Descripción de las pruebas

Con el propósito de poder estudiar los diferentes efectos de las concentraciones de cianuro respecto a la extracción de oro se realizaron pruebas Bottle Roll Test (BRT) y pruebas Column Leaching Test (CLT).

El mineral usado para las pruebas es proveniente de la celda de lixiviación L13-F4-C2B para columnas y para botellas de la celda L13-F4-C1E, el cual es preparado a una granulometría 100% 2,5", dicho mineral es pasado en su totalidad por el tamizador Gilson obteniendo selectivamente sus pesos por malla con el objetivo de poder distribuir la cantidad necesaria para las pruebas, una vez obtenido el total de pesos por malla se homogeniza cada malla, hasta obtener el peso requerido que fue calculado por su distribución por pesos, el mineral con un tamaño superior a las 2,5" es chancado y luego tamizado para obtener los pesos post chancado y añadirlas a las respectivas mallas inferiores a 2,5"; todo esto con el fin de obtener la granulometría requerida según procedimiento para llevar a cabo las pruebas correspondientes.

Dicho procedimiento de determinación de análisis granulométrico se desarrolló respecto al PETS ANA-PO-NR-ONSITE. 15 correspondiente para la preparación de muestras.

3.4.3. Descripción de las pruebas en botella (brt)

Las muestras para BRT a distintas concentraciones una vez preparadas y distribuidas por peso son llevadas al horno de secado a 50°C por un tiempo de 12 horas, en total serán 8 muestras de 2,5Kg aproximadamente para hacer pruebas tanto en granulometría fina como gruesa. Las muestras que serán llevadas a condiciones finas son chancadas en su totalidad hasta llevarlas a cabo a una granulometría 100% m10 mientras que las muestras gruesas se quedarán con la granulometría inicial de 100% 2,5". Una vez teniendo las muestras chancadas y secadas se procede a pesar 2kg y se prepara las botellas con una relación S/L de 1/1, una vez obtenida la pulpa por la mezcla sólido – líquida se determina su pH inicial y posterior acondicionamiento con cal para obtener la alcalinidad necesaria de entre 10,5 a 11,0. Después de haber acondicionado el tema del pH y verificado que cumpla con los rangos de alcalinidad necesarias utilizando el pH metro, se pesará el cianuro correspondiente para llevarlas a las concentraciones solicitadas. Así sucesivamente para cada botella.

La fórmula para calcular el peso necesario para cada concentración es la siguiente:

$$\text{Peso de cianuro} = \frac{\text{Volumen} \times 1.885 \times [\text{CN}^-]}{980 (\text{Pureza NaCN})}$$

Todo este procedimiento se llevó a cabo siguiendo a detalle el PETS ANA-P-NR-ONSITE.24 correspondiente al laboratorio metalúrgico.

El control de estas pruebas se da en 4, 8, 24, 48, 72, 96, 120 y 144 horas según a como vaya la curva de extracción. En las horas ya mencionadas, se hace el control de la fuerza de cianuro y la medición de pH, dichos controles se le hace a la solución filtrada de la pulpa, donde también sacamos un tubo de ensayo con esta solución para su respectivo análisis químico; a la misma vez se reajusta la concentración tanto de cianuro como de alcalinidad para poder mantener las condiciones iniciales de las pruebas.

Al final del tiempo de lixiviación por botellas, la pulpa es lavada hasta eliminar los restos de cianuro que pudiese tener y se traspasa a una bandeja limpia cubierta con papel craft para mandar al horno de secado por 24 horas. Una vez seca la muestra se alista para ser enviada a análisis químico, para su análisis de ripio.

3.4.4. Descripción de las pruebas en columnas (CLT)

Las muestras para preparar columnas una vez entregadas del área de preparación mecánica de minerales es homogenizada tres veces, una vez homogenizada se toma una muestra representativa de 5kg y se mezcla con 5L de agua a relación 1/1 para poder determinar su pH inicial y calcular su ratio de cal respecto a los kilos de mineral que ingresarán a las columnas, una vez obtenido este ratio se compara con el ratio previamente realizado en las pruebas de botellas y al ser similares se pesa la cal calculada y se le echa al mineral previamente homogenizado para volver a homogenizar

y distribuir la cal de manera uniforme. Una vez el mineral ya acondicionado se carga en sacos, se pesa y es llenado a las columnas HDPE con una dimensión de 7,5"x2m, donde anotamos el dato de su altura libre.

Una vez cargado el mineral en las columnas, se procede a hacer la instalación de bombas peristálticas y conexión de mangueras para su respectiva alimentación, siguiendo con los procedimientos establecidos se llevará a cabo una densidad de riego de 11L/hr-m² y con las concentraciones de cianuro a evaluar.

Los controles de columnas se harán cada 24 horas, pesando su solución rica que percoló en el periodo de tiempo fijado y hacer los controles de fuerza de cianuro y alcalinidad, donde también se enviará un tubo de ensayo para su análisis químico.

El tiempo de lixiviación de las columnas dependerá hasta que su ley de solución percolada sea entre 0,02 y 0,025ppm. Una vez llegada a estas condiciones se detendrá la alimentación con solución lixivante y se procederá a hacer un lavado con agua y cal hasta que la concentración de cianuro esté totalmente baja.

Al terminar el proceso de lavado, se deberá dar un tiempo de drenado hasta que ya no caiga ninguna gota de la columna, al culminar el drenado se procederá a la descarga de mineral de la columna, donde se determinará el porcentaje de mineral con el cual está saliendo. Una vez descargado y oreado se preparará una muestra

representativa para ser mandado al laboratorio químico para su análisis por ripio.

Tabla 4

Condiciones para las pruebas de columnas

Columnas	1	2	3	4	5
Granulometría	100% 2,5"	100% 2,5"	100% 2,5"	100% 2,5"	100% 2,5"
Densidad de riego (L/hr-m ²)	11	11	11	11	11
Peso Húmedo (Kg)	90,7	90,6	90,8	90,6	90,9
Humedad (%)	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16
Peso Seco (Kg)	89,6	89,5	89,7	89,5	89,8
Ratio de cal (Kg/Tm)	1,55	1,55	1,55	1,55	1,55
Fuerza de cianuro (ppm)	60	100	120	150	200

Nota: Dato proporcionado por el área de metalurgia.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS ESPERADOS

4.1. PRUEBAS DE BRT

Tabla 5

Caracterización química del mineral de cabeza

MUESTRA	Au, g/t	Ag, g/t	Cu, g/t	Hg, g/t	AuCN,ppm
L13-F4-C1E	0,3	3,92	96	24,12	0,3

Nota: Dato proporcionado por el área de metalurgia.

El cuadro siguiente, representa el % de recuperación de Au y consumo de reactivos en un resumen general de datos obtenidos a través de diferentes concentraciones.

Tabla 6

%Extracción Au a diferentes concentraciones

Concentración		%Extracción Au					
PPM	% Au. Fino BRT	FINOS NaCN, Kg/t	Cal, Kg/t	GRUESOS % Au. Grueso BRT	NaCN, Kg/t	Cal, Kg/t	
60	69,5	0,27	2,15	52,6	0,22	2,45	
100	70,2	0,38	1,95	55,1	0,34	2,3	
120	71	0,43	1,85	57,1	0,37	2,3	
150	71,5	0,55	1,8	59,3	0,58	2,25	
200	72,8	0,75	1,8	60,6	0,8	2,17	

Nota: Dato proporcionado por el área de metalurgia.

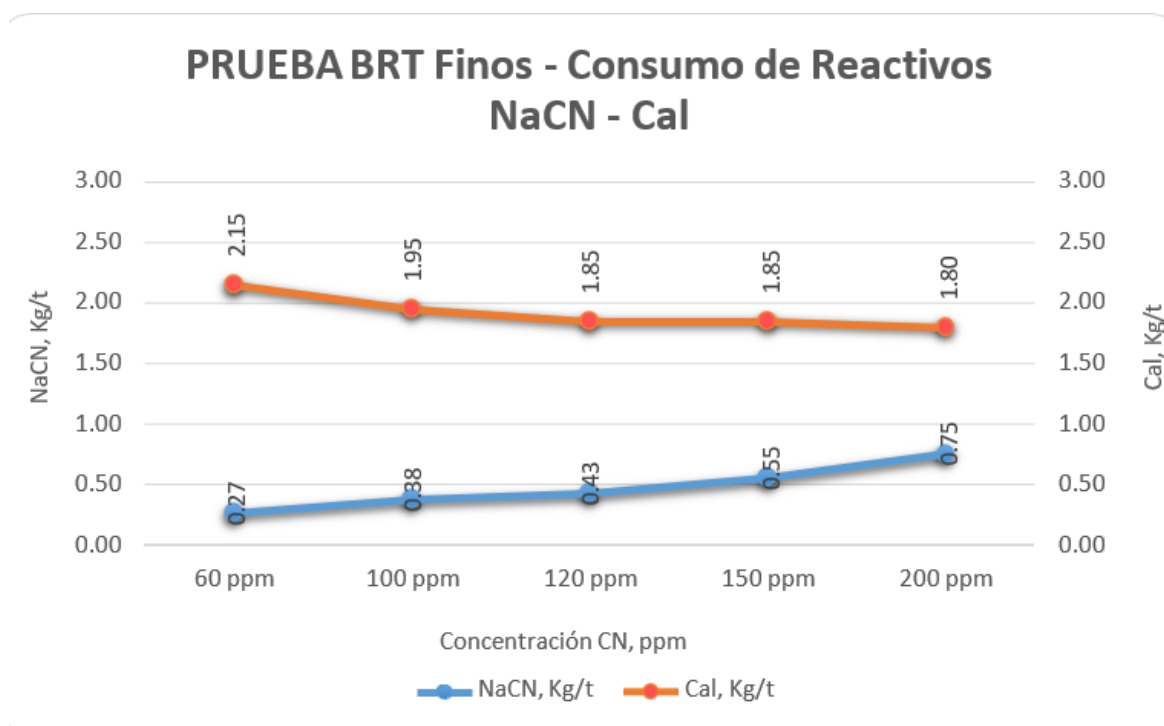
La tabla mostrada de los resultados, nos indica que a medida que se incrementa la concentración de cianuro desde 60ppm hasta 200ppm, el % de Extracción de Au

aumenta y en el que mejor se obtiene una recuperación es a 200ppm.

A continuación, se muestra la gráfica donde se evalúa el consumo de reactivos de acuerdo con las distintas concentraciones a las que se llevó a cabo las pruebas.

Figura 16

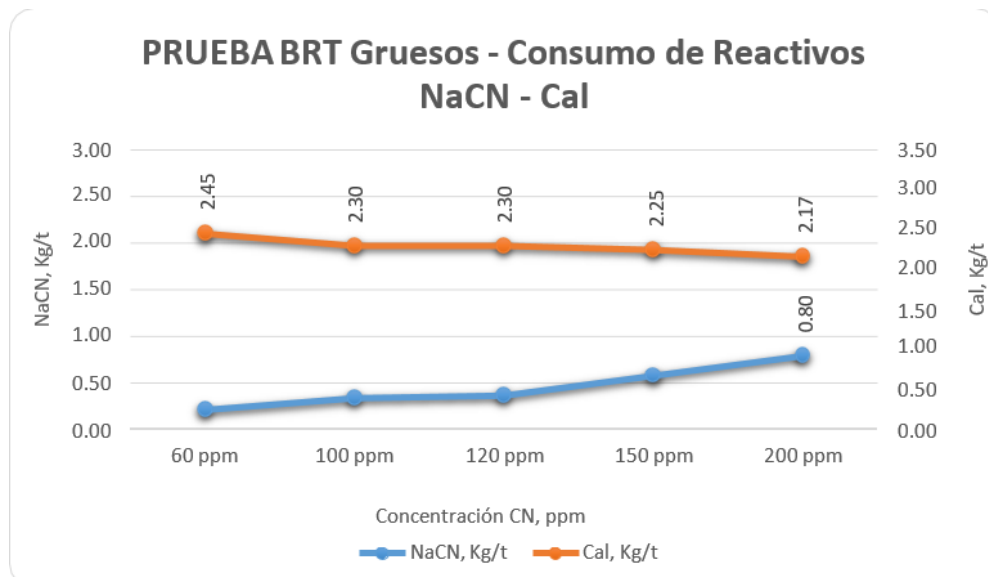
Relación de la ratio de NaCN, Kg/t vs la ratio de cal, Kg/t en FINOS



Nota: Dato proporcionado por el área de metalurgia.

Figura 17

Relación de la ratio de NaCN, Kg/t vs la ratio de cal, Kg/t en GRUESOS



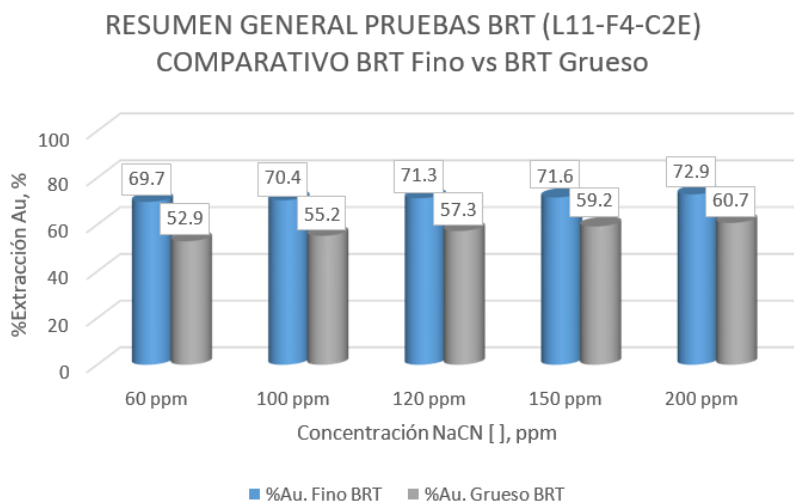
Nota: Dato proporcionado por el área de metalurgia.

Las gráficas mostradas del consumo de cianuro vs el consumo de cal nos demuestran que a medida que se incrementa la concentración de cianuro disminuye el consumo de cal, por lo que se añade que es inversamente proporcional.

La siguiente gráfica nos detalla el resumen general de la evaluación del % de Recuperación del Au vs las diferentes concentraciones de cianuro realizadas en las pruebas en botellas tanto en finos como gruesos.

Figura 18

Relación % de Extracción Au vs Concentración de cianuro (BRT)



Nota: Dato proporcionado por el área de metalurgia.

Estos resultados nos demuestran que a medida que vamos aumentando la concentración de cianuro obtendremos una mejor extracción. Donde una concentración de 200 ppm de fuerza de cianuro se obtuvo la recuperación de oro más alta, tanto en granulometría fina como gruesa.

4.2. Pruebas de columna

Se realizó las pruebas en columnas con las distintas concentraciones ya mencionadas obteniéndose los siguientes resultados.

Tabla 7*Caracterización química del mineral de cabeza*

Ley de Cabeza					
Muestra	Au g/t	Ag g/t	Cu ppm	Hg ppm	Au-CN ppm
CLT_1 (60ppm)	0,259	3,7	72	13,768	0,228
CLT_2 (100ppm)	0,259	3,7	72	13,768	0,228
CLT_3 (120ppm)	0,259	3,7	72	13,768	0,228
CLT_4 (150ppm)	0,259	3,7	72	13,768	0,228
CLT_5 (200ppm)	0,259	3,7	72	13,768	0,228

Nota: Dato proporcionado por el área de metalurgia

La tabla mostrada nos proporciona los valores iniciales que tiene cada columna, siendo las mismas puesto que todas se prepararon con el mismo mineral traído de la celda, se realizó un análisis químico de cabeza para determinar las leyes de cada elemento.

Tabla 8*Resumen de los resultados de pruebas de lixiviación en columnas.*

RESUMEN DE PRUEBAS				
Concentración	%Extracción Au		Consumo de reactivos	
PPM	Au,%	Ag,%	NaCN, Kg/t	Cal, Kg/t
60	65,7	11	0,051	1,045
100	66,58	12,6	0,091	1,001
120	68,05	12,29	0,098	0,987
150	68,75	12,2	0,125	0,975
200	71,6	15,29	0,132	0,96

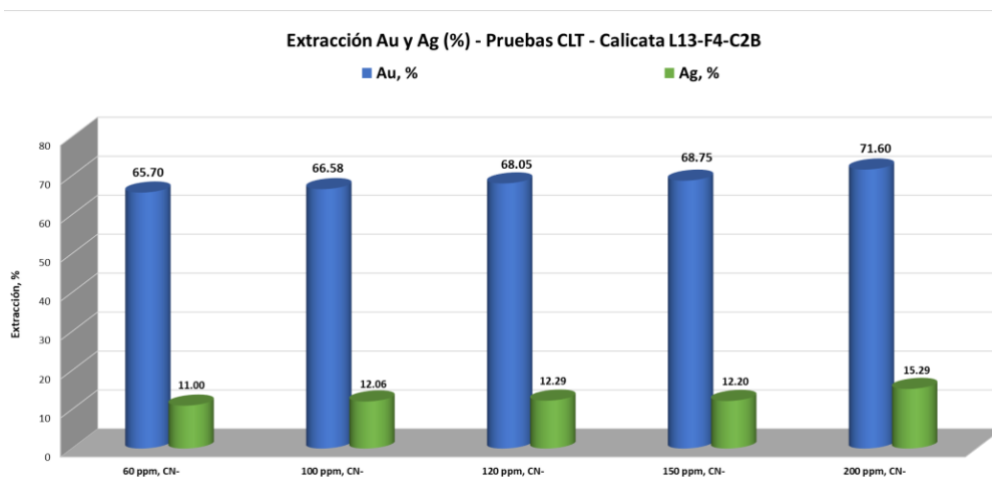
Nota: Dato proporcionado por el área de metalurgia

La tabla nos proporciona las recuperaciones tanto del oro y de la plata como sus respectivos consumos de reactivos, observando que a 200 ppm de fuerza de cianuro se obtuvo una mejor recuperación de oro, mayor consumo de cianuro, pero menos consumo de cal.

La siguiente gráfica, nos detalla el resumen general de la evaluación del % de recuperación del Au vs las diferentes concentraciones de cianuro realizadas en las pruebas en columnas.

Figura 19

Relación % de Extracción Au vs Concentración de cianuro (CLT)



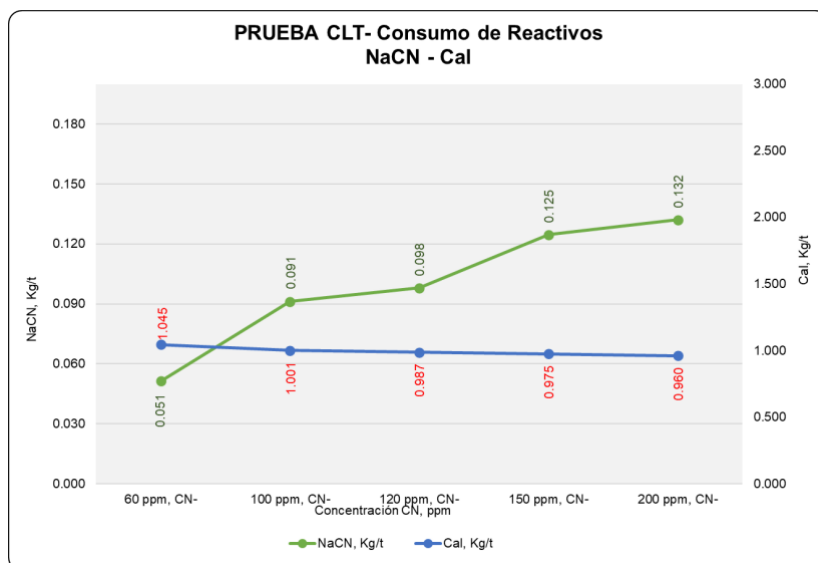
Nota: Dato proporcionado por el área de metalurgia

La gráfica nos muestra que a medida que nosotros vayamos incrementando la fuerza de concentración de cianuro obtendremos una mejor recuperación del oro, así como de la plata. Observamos que con la concentración más alta de 200 ppm de cianuro

se obtuvo una recuperación de 71,60%.

Figura 20

Relación de la ratio de NaCN, Kg/t vs la ratio de cal, Kg/t en columnas



Nota: Dato proporcionado por el área de metalurgia

Como la figura nos muestra, a medida que vayamos incrementando la concentración de cianuro el consumo de cal será totalmente opuesto, porque como vemos va disminuyendo. Esto por el efecto que tiene el cianuro de influenciar en la alcalinidad.

Para la evaluación costo/beneficio se considera una producción promedio T/día de 24 000T y 5 000 Oz/mes. A continuación, se muestra la siguiente tabla:

Tabla 9*Tabla de evaluación costo/beneficio*

Fuerza de cianuro, ppm	60	100	120	150	200
Kg Cianuro/día	1 233	2 190	2 154	2 991	2 929
Precio cianuro, USD/Kg	\$2,51	\$2,51	\$2,51	\$2,51	\$2,51
USD/mes	\$92 814	\$164 902	\$162 198	\$225 223	\$220 546
USD/mes adicional	-	\$72 088	\$69 384	\$132 409	\$127 732
Precio del Au USD/oz	-	\$1 600	\$1 600	\$1 600	\$1 600
Rec. Adicional esperada (PAD)		43,94	117,49	152,28	294,89
Oz/mes adicional (para pagar el cianuro)	5 000	5 044	5 119	5 152	5 295
%Rec adicional (para pagar el cianuro)	-	0,88%	2,35%	3,05%	5,90%
Precio Ganado por Au USD/Oz		\$70 308,86	\$187 981,99	\$243 674,00	\$471 828,00
USD/mes beneficio	-	\$1 779,89	\$118 598,08	\$111 238,35	\$344 096,13

Nota: Dato proporcionado por el área de metalurgia

Respecto a la figura mostrada podemos observar y según criterio de laboratorio, la concentración de cianuro a 120 ppm, nos otorga un costo/beneficio adecuado a poder implementar y recomendar su aplicación para iniciar el riego con esta concentración a las celdas.

Respecto a la concentración actual que se realiza en la unidad que es 60 ppm de fuerza de cianuro, sería tener que incrementar al doble esa concentración y aunque parezca tener que gastar más cianuro en la preparación, económicamente es más rentable ya que se obtendrá más onzas de oro por mes.

CONCLUSIONES

1. El incremento de la concentración de CN^- a 200ppm en la solución de riego afecta positivamente la extracción y cinética de Au y también Ag, así como en la evaluación económica.
2. En la evaluación costo/beneficio se observa que a 120ppm se logra un incremento en la recuperación de 2,35%, a 150ppm un incremento de 3,05% y a 200ppm un incremento de 5,90%, siendo la más rentable USD la de 120ppm.
3. El incremento de la concentración de CN^- desde 60, 100, 120, 150 y 200 ppm en la solución de riego tiene efectos positivos en la extracción y cinética del oro.
4. A medida que aumentamos la concentración de cianuro, hay una reducción de consumo de cal, por lo que la ratio de cal al reducirse genera ahorro de este reactivo.

RECOMENDACIONES

- 1.** Se recomienda evaluar las pruebas de lixiviación a una escala mayor para tener datos muchos más reales, puesto que un cambio de concentración de cianuro conlleva gastos operativos y el poder maximizar su extracción traerá mejoras en el costo/beneficio. Realizar pruebas no solo incrementado su concentración de cianuro, sino también su densidad de riego y en columnas mucho más grandes en caso de no poder hacer un pilotaje.
- 2.** Es importante la adecuada preparación mecánica de los minerales a realizar pruebas puesto que si su ley de cabeza no es la correcta habrá mucha variación en los resultados y nos llevará al error.
- 3.** Cumplir en todo momento con los protocolos de seguridad y tener presente que el cianuro de sodio es un reactivo peligroso, por lo que los cuidados serán muy necesarios en todo momento del desarrollo de las pruebas metalúrgicas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Zabaleta, G. (2000). *El oro: comercio, obtención y aplicaciones*.
- Adams, M. D. (2005). *Advances in Gold Ore Processing*. En Elsevier (Ed.), *Developments in Mineral Processing*.
- Yannopoulos, J. C. (1990). *The extractive metallurgy of gold*. Van Nostrand Reinhold.
- Udupa, A. R., Kawatra, S. K., & Prasad, M. S. (1990). *Developments in Gold Leaching: A Literature Survey*.
- GOLDHUB. (2019). *Gold Demand Trends*.
- Habashi, F. (1967). *Kinetics and mechanism of gold and silver dissolution in cyanide solution*. Butte: Montana College of Mineral Science and Technology.
- Hedley, N. y Tabachnick, H. (1968). *Mineral Dressing Notes No. 23. Chemistry of Cyanidation*, American Cyanamid Company, New Jersey, USA.
- Samper, J. S. y Martín-Torres, M. (2012). *El oro en América*.
- Cahuana, A. E. (2021). *Evaluación de la cianuración de concentrados de oro y plata*. [Tesis Pregrado]: Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.
- Misari, S. F. (1993). *Metalurgia del Oro*. Lima: Centro de Estudios y Promoción en ciencias de la tierra.
- Saavedra, L. (2022). *Aplicación del reactivo Goldmax para la lixiviación de oro en la*

unidad minera Pucamarca. [Tesis Pregrado]: Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann.

Valenzuela García, J. L. (2011). *Hidrometalurgia del Oro: Extracción por solventes.* Ciudad de México: Editorial Académica Española.

ANEXOS

Recepción de la muestra



Homogenizado de la muestra



Uso del tamizador Gilson para separación por mallas



Cuarteador Gilson para sacar las muestras en botellas



Mesa de Rodillo donde se lleva a cabo la prueba de botellas



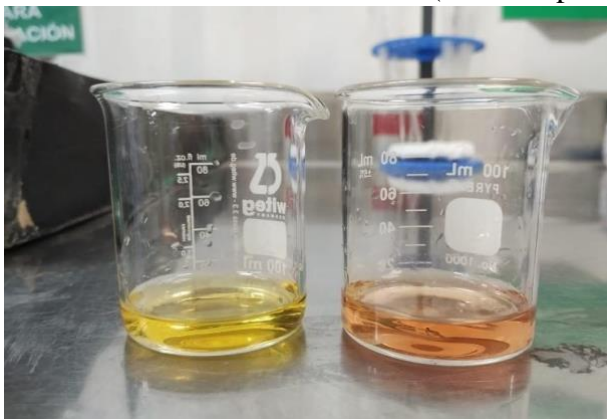
Botellas que se utilizan para las pruebas BRT



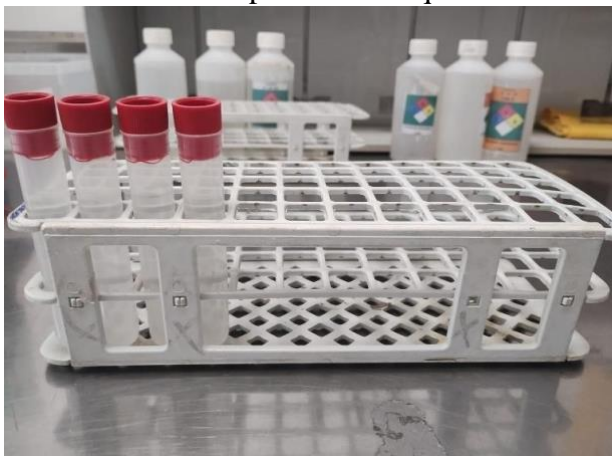
Filtrado de muestras



Titulación de solución cianurada (antes/después)



Envío de muestras para análisis químico



Reactivos de titulación (Rodamina/Hidróxido de sodio)



Agente titulante (Nitrato de Plata)



Cianuro de sodio



Balanza digital



pH metro



Sección de columnas HDPE

