

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN – TACNA

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

**PRUEBAS DE CIANURACIÓN EN BOTELLAS Y
COLUMNAS PARA MINERALES MIXTOS
AURÍFEROS EN LA EMPRESA MINERA J.J.
INVERSIONES MINERA SAC EN ABANCAY**

TESIS

Presentada por:

Bach. Hebert Jesús Isidro Perca

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO METALURGISTA

TACNA – PERÚ

2018

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN – TACNA

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales


**PRUEBAS DE CIANURACIÓN EN BOTELLAS Y COLUMNAS
PARA MINERALES MIXTOS AURÍFEROS EN LA
EMPRESA MINERA
J.J. INVERSIONES MINERA SAC
EN ABANCA Y**

Tesis sustentada y aprobada el día 20 de setiembre de 2018, estando integrado el Jurado Calificador por:

PRESIDENTE


:.....
Dr. Tolomeo Raúl Soto Pérez.

SECRETARIO


:.....
Ing. Zoilo Edgardo Valdivia Infantas

VOCAL


:.....
Mgr. Raúl Del Pozo Tello

ASESOR


:.....
Mgr. Matías Carlos Vivar Colquicocha

DEDICATORIA

A mis padres Ernesto Isidro y Julia Perca, por su cariño, afecto y aprecio. A mis hermanos, por la suerte de haber crecido junto a ellos. A mis amigos, por las conversaciones y los buenos momentos. A mis seres queridos por su amor y su paciente espera.

AGRADECIMIENTO

En primer término, debo manifestar mi eterna gratitud a mis padres, que inspiraron en todo momento mi desarrollo académico.

A la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, por permitir realizar los estudios.

A mis profesores, Dr. Raúl Soto Pérez, Mgr. Matías Carlos Vivar Colquicocha y a mis compañeros de la promoción 2015.

CONTENIDO

DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	iv
CONTENIDO	v
ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
RESUMEN	xiv
ABSTRACT	xv
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	
1.1. Descripción del problema	3
1.1.1. Antecedentes del problema	3
1.1.2. Problemática de la investigación	4
1.2. Formulación del problema	5
1.3. Justificación e importancia	7
1.4. Alcances y limitaciones	7
1.5. Objetivos	8
1.5.1. Objetivo general	8
1.5.2. Objetivos específicos	8
1.6. Hipótesis	8

1.7. Variables	9
1.7.1 Identificación de las Variables	9
1.7.2 Caracterización de las variables	9
1.7.3 Definición operacional de las variables	10
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	
2.1. Antecedentes del estudio	11
2.2. Bases teóricas	13
2.2.1. Concepto de lixiviación	13
2.2.2. Ubicación y accesibilidad de la región Apurímac	16
2.2.3. Marco geológico	19
2.2.3.1. Depósitos eluviales	20
2.2.3.2. Franja XV de pórfidos-skarns de Cu-Mo (Au, Zn) y depósitos de Cu-Au-Fe relacionados con intrusiones del eoceno- oligoceno	20
2.2.3.3. Franja XXI de epitermales de Au-Ag del mioceno hospedados en rocas volcánicas cenozoicas.	22
2.2.4. Procesos previos para la lixiviación	23
2.2.4.1. Geología	23
2.2.4.2. Metalurgia extractiva	23

2.2.5. Tipos de lixiviación	24
2.2.5.1. Lixiviación por agitación	24
2.2.5.2. Lixiviación en Pila o Montón	26
2.2.5.3. Lixiviación Intensiva	28
2.2.5.4. Lixiviación en Bateas	29
2.2.5.5. Lixiviación <i>In Situ</i>	31
2.2.6. Variables en el proceso de lixiviación de oro	33
2.2.6.1. Densidad de pulpa	33
2.2.6.2. Efecto de la concentración de cianuro en la disolución del oro	33
2.2.6.3. Efecto de la concentración de oxígeno sobre la disolución del oro	34
2.2.6.4. Tiempo de cianuración	35
2.2.6.5. Efecto de la alcalinidad sobre la disolución del oro	36
2.2.6.6. Efecto de la lixiviación por agitación sobre la disolución del oro	36
2.2.6.7. Efecto de la temperatura sobre la disolución del oro	37
2.2.6.8. Influencia en el proceso de cianuración de otros constituyentes en la pulpa	37

2.2.7. Termodinámica de la cianuración de oro	38
2.2.8. Lixiviación de oro y plata por cianuración	40
2.2.9. Procesos de cianuración	42
2.2.10. Química de las soluciones de cianuración	43
2.2.10.1. Descomposición de las soluciones de Cianuro	45
2.2.11. Disolución de metales preciosos	49
2.2.11.1. Naturaleza electroquímica de la cianuración.	49
2.2.12. Cinética de la reacción de cianuración de oro	55
2.2.13. Adsorción con Carbón Activado	57
2.2.13.1. Mecanismo de Adsorción	58
2.2.13.2. Especificación del carbón.	58
2.2.14. ¿Cuándo usar Adsorción con Carbón?	64
2.3. Definición de términos	67
CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO	
3.1. Tipo y diseño de la investigación	72
3.2. Población y muestra	73
3.3. Técnicas e instrumentos para recolección de datos	74
3.4. Procesamiento y análisis de datos	75
3.4.1 Métodos	75
3.4.2 Muestreo de materiales	76

3.4.3 Pruebas experimentales para determinar consumo de cianuro	78
3.4.4 Pruebas experimentales en columna	81
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	
4.1. Resultados	84
4.2. Discusión	91
CONCLUSIONES	98
RECOMENDACIONES	99
REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA	100

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Propiedades de compuestos de cianuro simple.	44
Tabla 2 Análisis químicos de muestras de minerales	76
Tabla 3 Composición química típica de la muestra de mineral	77
Tabla 4 Minerales típicos contenidos en la alimentación.	77
Tabla 5 Resultados del análisis granulométrico del mineral	
440,4 g 90 % -malla 0,0125 m (1/2")	85
Tabla 6 Resultados del análisis granulométrico del mineral 440,4 g	86
Tabla 7 Pruebas de consumo de cianuro en botellas	87
Tabla 8 Condiciones operacionales de las pruebas de lixiviación	88
Tabla 9 Pruebas de lixiviación en columna 80 % malla – 0,0125 m (-1/2")	89
Tabla 10 Pruebas de lixiviación en columna 80 % malla -0,00625 m (-1/4")	90

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Lixiviación de minerales	14
Figura 2. Mapa de Ubicación de la Región Apurímac	18
Figura 3. Lixiviación por agitación con dos sistemas de Agitación mecánica y neumática.	26
Figura 4. Sistema de lixiviación en pilas	27
Figura 5. Planta de cianuración intensiva – Antapite	29
Figura 6. Equipo de lixiviación en batea.	30
Figura 7. Lixiviación <i>in situ</i>	32
Figura 8. Diagrama Eh – pH para el sistema Au – CN – H ₂ O, en donde se muestra el aurocianuro y los rangos de operación para los distintos procesos industriales de extracción de oro.	39
Figura 9. Especiación de cianuro y ácido cianhídrico en soluciones acuosas como función del Ph	47
Figura 10. Diagrama Eh – pH para el sistema CN – H ₂ O a 298 K (25 °C). Concentración de cianuro = 10 ⁻³ M, P(O ₂) = 1 atm	49
Figura 11. Diagrama Eh – pH para el sistema Au – CN – H ₂ O	

<p>a 298 K (25 °C). Concentración de todas las especies de oro solubles = 10^{-4} M, $[\text{CN}^-] = 10^{-3}$ M, $P(\text{O}_2) = 1$ atm</p>	53
Figura 12. Diagrama Eh – pH para el sistema Ag – CN – H ₂ O	54
Figura 13. 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	56
Figura 14. Configuración de un circuito con columnas de carbón activado	60
Figura 15. Esquema del proceso CIC	62
Figura 16. Esquema del proceso CIP	63
Figura 17. Esquema del proceso CIL	64
Figura 18. Proceso MERRIL CROWE	67
Figura 19 Etapas de las pruebas a realizadas	72
Figura 20: Consumo de cianuro vs tiempo acumulado	93

Figura 21 Extracción del Au y Ag: mineral 90% -malla 0,0125 m	94
Figura 22 Disolución del Au y Ag: mineral 90 % -malla 0,0125 m	95
Figura 23 Extracción del Au y Ag: mineral 80% -malla 0,00625 m	96
Figura 24 Disolución del Au y Ag: mineral 80 % -malla 0,00625 m	97

RESUMEN

Los procesos de tratamiento de minerales auríferas que existen actualmente en la zona minera de J.J. Inversiones Mineras, conllevan a sistemas poco eficientes en la extracción de oro no mayor de 40 %. El presente trabajo involucra pruebas de consumo de cianuro y pruebas de lixiviación en columnas con resultados de análisis y caracterización de minerales auríferos de dicha zona minera ,según los resultados obtenidos durante esta investigación ,es posible lograr porcentajes de disolución de oro de hasta el 90 % para los minerales de la zona .esta afirmación fue posible a las mejores condiciones de las pruebas metalúrgicas planteadas para el control del proceso.

Palabras clave. Lixiviación, auríferos, menas, in situ, cementación

ABSTRACT

Gold ore processing processes currently exist in the J.J. mining area. Mining Investments, lead to inefficient systems in the extraction of gold no greater than 40%. The present work involves tests of consumption and leaching tests in columns, the results of analysis and characterization of gold minerals of said mining area, according to the results obtained during this investigation, it is possible to achieve percentages of gold dissolution of up to 90 % for minerals of the zone. This affirmation was possible to the best conditions of the metallurgical tests raised for the control of the process.

INTRODUCCIÓN

La tecnología de cianuración de minerales auríferos es muy conocida y tiene la ventaja que en muchos casos permite evitar el uso del mercurio, además esta técnica deja aprovechar mejor los recursos ya que permite recuperar oro a un de minerales marginales. Los montos de inversión son relativamente bajos si se les compara con la inversión en plantas de cianuración por agitación. Los costos de operación son mucho más bajos, y el control de la operación en si es además muy sencilla.

Las operaciones mediante el uso de cianuros alcalinos se viene aplicando desde casi un siglo, y de hecho la mayor parte de plantas de tratamiento obtienen el oro mediante esta tecnología. Aunque en el pasado se decía que las operaciones de cianuración estáticas no tenían altas recuperaciones los hechos demuestran que cuando el oro es liberado las recuperaciones metalúrgicas obtenidas son aceptables.

Así aunque en operaciones de cianuración por agitación se alcanzan recuperaciones de más de 90 %, también se alcanzan cotidianamente en

plantas de cianuración Vat Leaching recuperaciones similares, aunque los tiempos de tratamiento debe ser mucho más prolongados.

El presente trabajo surge por el interés de desarrollar una mejora a la recuperación de los minerales mixtos, donde se trabaja con leyes menores a 0,88 g/t de oro.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.2. Descripción del problema

1.2.1. Antecedentes del problema

La lixiviabilidad es una herramienta analítica que fue desarrollada por Anglo American Research Laboratories (AARL) a mediados de 1980. Esta técnica ha sido usada durante estos años por varias instituciones con resultados variados.

El proceso de cianuración para extraer el oro de sus minerales viene empleándose hace casi un siglo, en 1898 se utilizó por primera vez en Nueva Zelanda y en África. Es un proceso muy eficiente, capaz de extraer oro cuando está presente en cantidades tan pequeñas como un 0,25 por ciento de onza en una tonelada de roca, con un rendimiento del orden del 90 %. La recuperación del oro una vez disuelto es igualmente eficaz.

Ante esta problemática se desarrolla un procedimiento de pruebas y análisis de resultados. Evidentemente la mineralogía del material matriz (muestra) es el principal factor que determina cuáles son los pasos necesarios para alcanzar resultados óptimos.

1.2.2. Problemática de la investigación

Ante la problemática de la investigación deducimos que, en la actualidad, en todo lugar las leyes de los minerales vienen bajando de manera considerable, esto es debido a la explotación de las leyes más altas hechas ya en épocas pasadas. Por esta razón las empresas mineras tienen que ver la mejor forma de poder recuperar este contenido valioso con costos de producción a bajo costo que aseguren buenas utilidades y sean rentables para los distintos accionistas comprometidos con estos procesos.

Actualmente algunas empresas mineras no logran sacar un buen provecho de aquellos minerales de baja ley, siendo esto el motivo de hacer pruebas de cianuración en botellas y columnas para minerales mixtos auríferos en la empresa minera J.J. inversiones mineras SAC, en Abancay, estos minerales están con una ley de

corte de 0,8-0,7 g/t esto indica que es necesario buscar nuevos métodos de tratamiento para poder recuperar eficientemente y bajando los costos de producción que son materias primas para conceptualizar cualquier proyecto debido a esto el área de investigaciones está en la posibilidad de brindar y hacer pruebas de lixiviación por cianuración en botellas y columnas para minerales mixtos auríferos nuevos métodos que deben hacer posibles el tratamiento de estos minerales para obtener la mayor recuperación que es lo que preocupa a la empresa.

1.3. Formulación del problema

Una de las principales dificultades que se presentan en plantas de lixiviación está en cumplir los planes de producción por la presencia de minerales mixtos auríferos, ya sean estos a corto o largo plazo. Esto se relaciona con la inconsistencia entre las características de los materiales que envía la mina y lo que se planificó previamente, así como también la inconsistencia frecuente entre la respuesta real de la planta y la respuesta de esta. La dinámica de una planta de lixiviación es comparativamente lenta y depende de diversas variables como la tasa de riego, entre otras,

que influyen directamente en la respuesta a corto o largo plazo. Por lo anterior, es muy conveniente la realización de pruebas en botella y luego en columna con los minerales a lixiviar, y de esta manera poder determinar el tratamiento adecuado, lo cual nos va permitir controlar las demás variables, obteniendo soluciones ricas cargadas con buena cantidad oro y contenidos bajos de impureza. Y ante la formulación del problema se coplantea la siguiente interrogante:

¿Será factible obtener una buena recuperación del oro haciendo pruebas de cianuración en botellas y columnas para minerales mixtos auríferos en la empresa minera J.J. inversiones mineras SAC, en Abancay?

1.4. Justificación e importancia

Se justifica esta investigación con la aplicación de estudios a minerales mixtos para ser procesados mediante la cianuración y su recuperación del oro mediante la aplicación de carbón activado desde soluciones cianuradas sigue siendo un proceso importante en todo el mundo.

Es importante porque tiene la finalidad de permitirnos investigar, conocer y experimentar el desarrollo tecnológico de la industria minera que ha experimentado varias innovaciones desde sus inicios en nuestro país, la lixiviación de minerales auríferos aparece como un área muy evolucionada en lo que a tratamiento de minerales de oro y plata se refiere. Así entonces se muestra como la vía de proceso más económica para producir oro en la forma de *dore* o bien oro refinado.

1.5. Alcances y limitaciones

La empresa minera, no cuenta con juego de mallas.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Estudiar los minerales mixtos auríferos mediante pruebas de cianuración en botellas y columnas.

1.5.2. Objetivos Específicos

- Determinar la cinética del consumo de reactivos para minerales mixtos de oro.
- Estudiar la cinética de disolución de oro a diferentes granulometrías.
- Determinar el porcentaje de recuperación de oro.

1.6. Hipótesis

- Es posible obtener buenas recuperaciones de oro, en minerales mixtos auríferos haciendo pruebas de cianuración en botellas y columnas, considerando variables como la granulometría del mineral, concentración de la solución lixivante, porcentaje de sólidos.

1.7. Variables:

1.7.1. Identificación de las Variables:

- Recuperación (%)
- Granulometría
- Dosificación de la solución lixivante
- Concentración de la solución lixivante
- Tiempo de aglomeración
- Tiempo de lixiviación

1.7.2. Caracterización de las variables:.

Variables independientes

- Dosificación de la solución lixivante (mL/s)
- Concentración de la solución lixivante (g/L)
- Granulometría (μm)
- Tiempo de aglomeración
- Tiempo de lixiviación (h)

Variables dependientes

- Recuperación (%)

1.7.3. Definición operacional de las variables:

Procedimiento que permite verificar si las variables son medibles o no. Permite identificar los indicadores para la construcción de los instrumentos de medición. Constituye la base para la recolección de la información que permitirá la comprobación de las hipótesis.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del estudio

Se tiene los siguientes antecedentes de estudio:

Aquino y Aduato (2011) manifestaron que la extracción del oro por medio de técnicas metalúrgicas tales como la lixiviación en pilas, la adsorción-desorción y el electrowining constituyen un ejemplo de los cambios surgidos para tales propósitos. Minera IRL aplica las técnicas mencionadas para el tratamiento de sus minerales que cada vez en todas partes del mundo se encuentran con leyes que antes eran económicamente hablando imposible de recuperar. La necesidad de encontrar mejores condiciones de lixiviación, adsorción, desorción, electrodeposición y regeneración del carbón activado han incentivado la realización de pruebas a nivel laboratorio que incluyen la variación de parámetros, las mismas que han permitido el mejoramiento de los aspectos técnicos y económicos en la planta de producción.

INACAP (2006), indica que las menas molidas a tamaños menores a las 150 mallas (aproximadamente tamaños menores a los 105 micrones), es agitada con solución cianurada por tiempos que van desde las 6 hasta las 72 horas, también que el pH debe ser alto, entre 10 y 11, para evitar la pérdida de cianuro por hidrólisis (generación de gas cianhídrico, CNH, altamente venenoso) y para neutralizar los componentes ácidos de la mena.

Rojas (2003), en su trabajo realizado indica que el oro presente en el residuo se encuentra en forma de electrum, liberado y que puede recuperarse en forma completa es posible obtener igual recuperación con iguales condiciones en un tiempo de 24 horas y a temperatura de 295 K (75 °C) La plata contenida en el residuo es posible recuperarla en forma parcial (< 60 %), con una concentración de KCN de 1,2 g/L, pH entre 10,5 y 11, temperatura de 293 K (20 °C) y un tiempo superior a 72 horas de lixiviación. El consumo de KCN para la recuperación de oro que corresponden al tratamiento de minerales cupríferos que contienen metales nobles. Este consumo se disminuye cuando la temperatura del sistema aumenta. El poco

consumo de cianuro se debe en gran medida a la baja solubilidad del cobre presente en el residuo.

Tremolada, (2011), demostró experimentalmente que los minerales arcillosos y/o coloides arcillosos evidenciaron el fenómeno de la adsorción y / o precipitación del oro a partir de soluciones cianuradas, concluyéndose que el efecto preg robbing contribuye a una pérdida de oro y plata en una cianuración convencional. La pérdida de oro es dependiente del tipo de arcilla y aparece ser afectada por la extensión del tiempo de cianuración. Fue observado que la capacidad de adsorción de la plata fue arriba del 80 % y que el grado de adsorción del oro oscilo entre 1,68 % y 7,49 %.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Concepto de lixiviación

El proceso de lixiviación es la etapa fundamental en un proceso hidrometalúrgico, que involucra la disolución del metal a recuperar desde una materia prima sólida, en una solución acuosa mediante la acción de agentes químicos. Esta transferencia del metal hacia la fase acuosa, permite la separación del metal

contenido en la fase sólida de sus acompañantes no solubles (Chahuayo & Márquez, 2012).

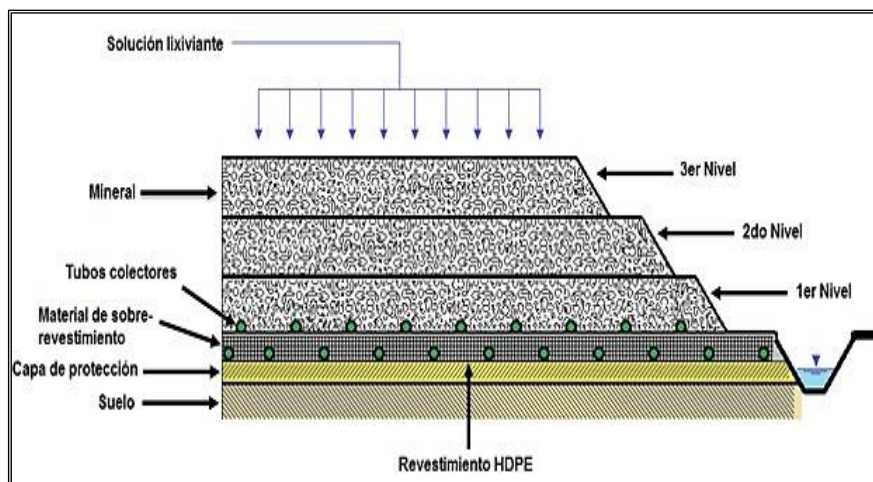


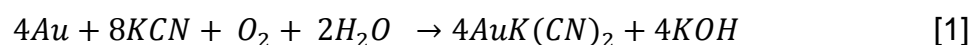
Figura 1. Lixiviación de minerales
Fuente: <https://hydrometallurgyperu.wordpress.com/lixivacion-en-pilas/20/05/2018>

El proceso de cianuración es usado en tratamientos de minerales auríferos, este proceso se completa en dos etapas, la primera etapa se efectúa la disolución de metales preciosos, oro y plata, y la segunda etapa es la solución rica obtenida puede ser tratada por otros procesos como la precipitación con polvo de zinc o absorción con carbón activado.

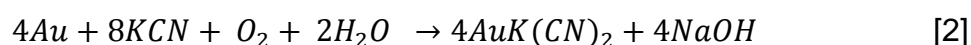
No está de más mencionar que la solución de cianuro siempre tiene preferencia por los metales preciosos presentes en el

mineral procesado y que la rapidez de la disolución de oro depende de la concentración de cianuro, la alcalinidad del medio lixivante, tiempo de lixiviación y el pH, el cual suele considerar entre 10,5 y 11, Así mismo, para poder efectuarse una eficiente cianuración de un mineral aurífero, el oro debe estar en forma libre y en tamaño fino. La presencia de acompañantes como minerales oxidado de cobre y sulfuros es negativo para en el proceso porque ellos se tienden a disolver en primera instancia, quedando muy poco cianuro libre para lixiviar al oro o también puede causar que el complejo aurocianuro sea absorbido por algún constituyente orgánicos (Michaud, 2015).

El principio básico de la cianuración es aquella en que las soluciones alcalinas débiles tienen una acción directa disolvente preferencial sobre el oro y la plata contenidos en el mineral. La reacción enunciada por Elsner en su Journal Prakchen (1946), es la siguiente:



La mayoría de autores concuerdan en la reacción global de la disolución de oro propuesta por Elsner (Vargas, 1990):



2.2.2. Ubicación y accesibilidad de la región Apurímac

Apurímac es una región del Perú, situada en la sierra sur del país, en la vertiente oriental de la Cordillera de los Andes. Apurímac tiene una superficie territorial de 20 895,8 km² y representa el 1,6 por ciento del territorio nacional, siendo la provincia de Aymaraes la más extensa con el 20,2 por ciento de la superficie territorial del departamento. Apurímac está situada en la zona elevada de los Andes centrales. Sus coordenadas son 13° 10' de latitud sur y entre los meridianos 73° 45' 20 y 73° 50' 44,5 de longitud oeste (INGEMMET, 2011).

Limita por el norte con la región Ayacucho y Cuzco; por el sur con Arequipa; por el este con la región del Cuzco; por el oeste con la región de Ayacucho. La altura promedio de la región es de 2 900 msnm. Su población asciende a 404,190 (INGEMMET, 2011).

La capital de la región es la ciudad de Abancay. Allí se realiza la mayor actividad económica, social y cultural de la región. Es la sede del Gobierno Regional y sede de las instituciones públicas y privadas de representación nacional. La Región de Apurímac está conformada por siete provincias y 80 distritos (INGEMMET, 2011).

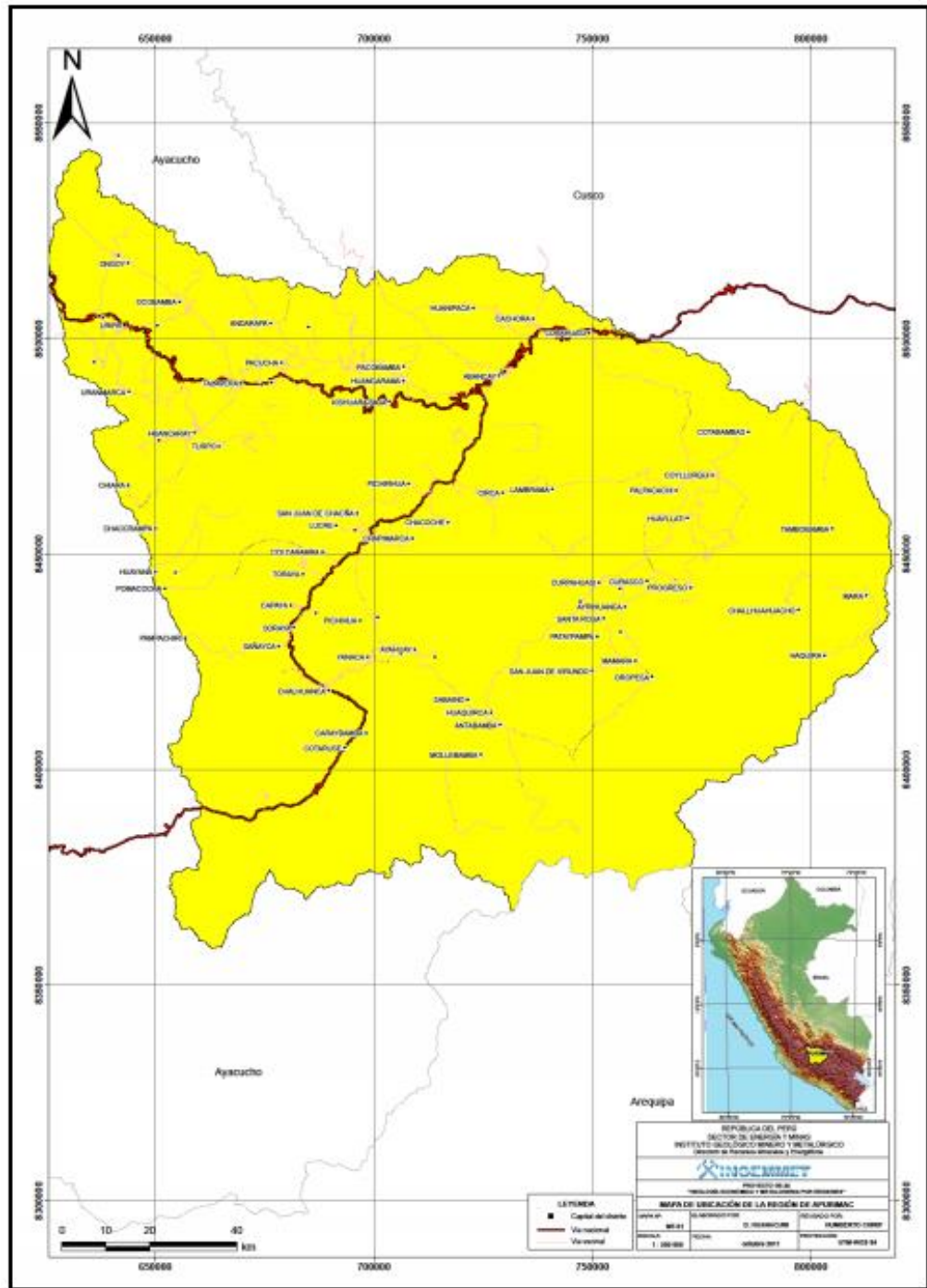


Figura 2. Mapa de Ubicación de la Región Apurímac
Fuente: INGEMMET, 2011

2.2.3. Marco geológico

La geología es compleja y selectiva, consiste de una secuencia cretácica regresiva de areniscas y cuarcitas de la formación Soraya, areniscas, limonitas rojas y lutitas de la formación Mara y las calizas de la formación Ferrobamba (Formación Arcurquina). Esta secuencia está intruída por las rocas del batolito de Andahuaylas-Yauri del Oligoceno-Mioceno, compuesto por intrusiones de composición diorítica-granodiorita a monzonita de facies hipabisales (INGEMMET, 2011).

Este sector está comprendido dentro de la franja de pórfidos-skarns de cobre-molibdeno (hierro, oro) del Eoceno-Oligoceno. Se ubica en el borde noreste de la cordillera Occidental y en el Altiplano del sur del Perú. La franja está controlada, por una parte, por el sistema de fallas Urcos-Sicuani-Ayaviri, Cusco-Lagunillas-Mañazo, Abancay-Andahuaylas, y por otra parte por el Alto Condoroma-Caylloma. Las estructuras tienen dirección NO-SE y cambian a E-O al nivel de la Deflexión Abancay (INGEMMET, 2011).

2.2.3.1. Depósitos eluviales

Los depósitos cubren grandes extensiones en los flancos de los valles principales, cerca de la ciudad de Abancay y en los flancos del río Apurímac. Bajo la acción del agua, los productos eluviales se pueden movilizar y formar huaycos o flujos de barro (cantos angulosos de tamaño muy variable, envueltos por una matriz areno-arcillosa), de color rojizo. Algunas veces los depósitos eluviales alcanzan un espesor de varios centenares de metros y son muy antiguos (INGEMMET, 2011).

2.2.3.2. Franja XV de pórfidos-skarns de Cu-Mo (Au, Zn) y depósitos de Cu-Au-Fe relacionados con intrusiones del eoceno-oligoceno

Esta es la franja más importante de esta región. La mineralización está relacionada con granitoides dioríticos a granodioríticos del Batolito Andahuaylas-Yauri del Eoceno-Oligoceno, emplazados en condiciones transpresionales (Carlotto, 1999; Perelló et al., 2003) y controlados, por los sistemas de fallas Cusco-Lagunillas-Mañazo, Abancay-Andahuaylas- Totos - Chincheros - Licapa y Abancay Condorama - Caylloma. Los

intrusivos intermedios a ácidos están relacionados con la mineralización Cu-Mo (Au) y en el contacto con secuencias carbonatadas del Albiano-Turoniano desarrollan cuerpos de skarn de Cu-Zn. Los intrusivos más básicos están relacionados con las mineralizaciones de Fe-Cu-Au, que se presentan a manera de cuerpos, en el contacto con secuencias carbonatadas del *Albiano Turoniano* y vetas principalmente de Au-Cu en los intrusivos. Los depósitos más representativos de esta franja son Las Bambas, Cotabambas, Haquira, Los Chancas, Antilla, Trapiche, entre otros. Las edades de mineralización están registradas entre 42 y 30 Ma. Otro depósito es el denominado prospecto Utupara de edad de mineralización posiblemente temprana de 51 Ma (Pb-Pb), en una roca diorítica hospedante de edad K-Ar entre 63,1 y 61,5 Ma, indicando este hecho que la mineralización habría ocurrido después de la cristalización de la roca intrusiva (Bustamante, A, 2008).

2.2.3.3. Franja XXI de epitermales de Au-Ag del mioceno hospedados en rocas volcánicas cenozoicas.

Esta franja es la que tiene mayor extensión en el territorio nacional y se distribuye ampliamente en el dominio volcánico Cenozoico de la Cordillera Occidental. En Apurímac, la franja se encuentra ubicada al sur y está controlada por fallas NO-SE de los sistemas de fallas Abancay-Condorama-Caylloma y Cusco-Lagunillas-Mañazo. En esta franja se encuentran los depósitos epitermales de Au-Ag preferencialmente de baja sulfuración como la Mina Selene. En este sector la mineralización tiene una edad entre 12-8 Ma (INGEMMET, 2011).

En el norte de la región Apurímac se encuentran dos franjas de menor extensión como son los segmentos de la franja XVII epitermales de Au-Ag del Eoceno y depósitos polimetálicos del Eoceno – Oligoceno -Mioceno y la franja III de pórfidos-skarns Cu-Mo-Zn y depósitos de Au-Cu-Pb-Zn relacionados con intrusivos del Pérmico. En el sur se encuentra el segmento de la franja XXIII de epitermales de Au-Ag del Mio-Plioceno (INGEMMET, 2011).

2.2.4. Procesos previos para la lixiviación

2.2.4.1. Geología

Es el aspecto fundamental, porque se determina la mineralogía, su génesis y su dimensionamiento hasta el yacimiento a través de la cubicación, la cual proporciona las reservas probables del mineral valioso, con los datos que se obtiene es factible realizar pruebas metalúrgicas, para determinar un posible estudio acerca del tratamiento a realizar al mineral valioso para su buena recuperación.

2.2.4.2. Metalurgia extractiva

La metalurgia extractiva corresponde al conjunto de procesos que se llevan a cabo para separar selectivamente las especies de interés de aquellas sin valor

Dentro del área de metalurgia extractiva se encuentran aquellas de hidrometalurgia, pirometalurgia y electrometalurgia.

Entre las áreas de investigación del grupo se encuentran los procesos de lixiviación bacteriana, los nuevos procesos de conversión continua de mata a cobre blíster y el desarrollo de instrumentación en el proceso de flotación de minerales, entre otras.

2.2.5. Tipos de lixiviación

En la lixiviación se tienen diferentes métodos de lixiviación que a continuación se describen:

2.2.5.1. Lixiviación por agitación

Es uno de los métodos de disolución de oro más utilizado en el mundo, es la cianuración por agitación, debido a la elevada velocidad de reacción, las altas recuperaciones de oro obtenidas y porque funciona para una amplia variedad de minerales. En contraposición tiene costos más altos de instalación y operación respecto de los métodos en pilas, por lo que se aplica solo a menas que poseen leyes económicas. La elevada cinética de lixiviación de oro se debe primordialmente a la mejor liberación del oro, producto de una reducción de tamaño mayor.

El proceso de agitación funciona muy bien para minerales con tamaños inferiores a 150 μm , tamaños mayores incrementan el desgaste de las paletas de agitación por efecto de la abrasión y existe mayor dificultad de mantenerlos en suspensión (Ramírez y Sánchez, 2016).

La densidad de pulpa utilizada varía entre 35–50 % de sólidos, dependiendo del tamaño de las partículas, la gravedad específica y la presencia de minerales que incrementan la viscosidad de la pulpa, como las arcillas. El proceso de cianuración se inicia con la regulación del pH de trabajo entre 9,5 – 11,5, mediante la adición de la cal o soda cáustica, previa a la adición de cianuro. Estas adiciones pueden realizarse en el tanque de cianuración o previamente en el molino. (Marsden y House, 1992).

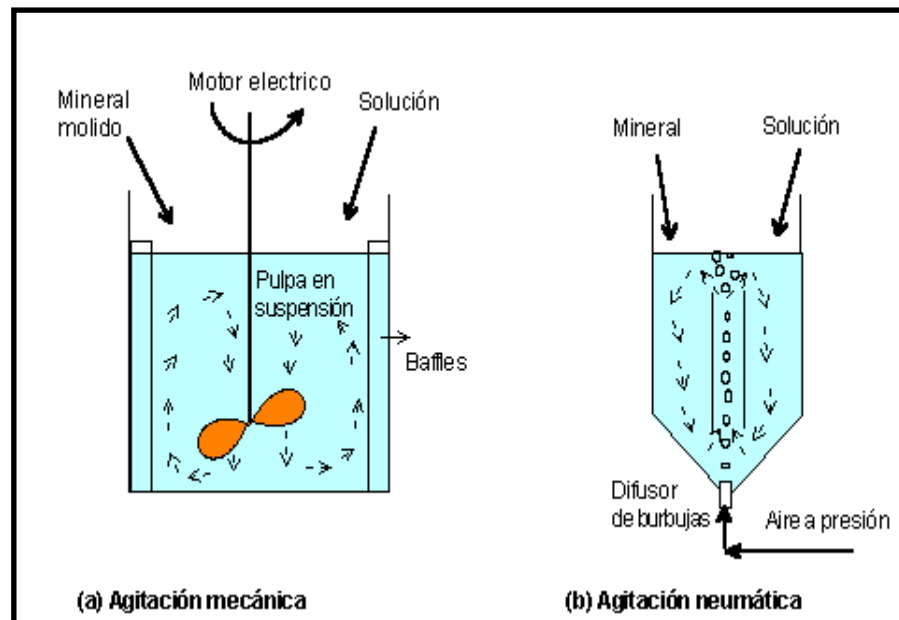


Figura 3. Lixiviación por agitación con dos sistemas de agitación mecánica y neumática.
 Fuente: <http://docplayer.es/10211823-Ing-juan-vega-gonzalez-f-bernui-r-cieza-r-lucano-lab-procesamiento-de-minerales-unt.html> 20/05/2018

2.2.5.2. Lixiviación en Pila o Montón

La lixiviación en pila es un proceso económico conveniente para el tratamiento de materiales de bajo grado, los cuales no justifican el alto costo de la molienda y lixiviación por agitación. La lixiviación en pilas significa cianurar las menas que han sido minadas, trituradas y transportadas a plataformas impermeables para lixiviación por regado o inmersión y percolación de la solución a través de la mena apilada. La elección para usar este

proceso de lixiviación depende de la ley, toneladas de mena disponible y además de su permeabilidad, que es un factor crítico. Sin una adecuada permeabilidad no habrá percolación, disolución ni extracción de oro económicamente aceptable (Azañero, 2001).

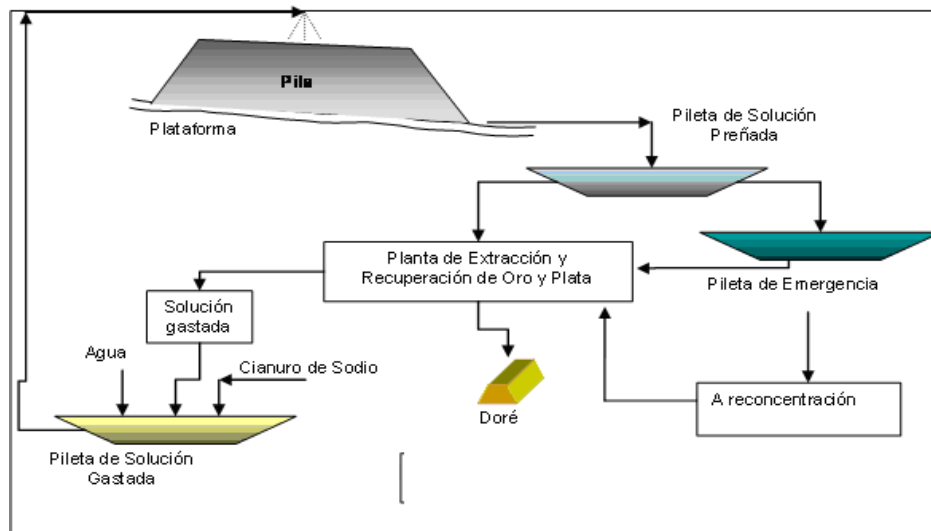


Figura 4. Sistema de lixiviación en pilas

Fuente: <http://laboratorio-quimico.blogspot.com/2014/08/como-es-usado-el-cianuro-en-la-mineria.html-23/05/2018>

2.2.5.3. Lixiviación Intensiva

El proceso de lixiviación intensiva utiliza una concentración de reactivo alta, principalmente cianuro y oxígeno y frecuentemente se eleva la temperatura y/o la presión para incrementar la velocidad de disolución de los metales nobles. Esto es aplicado a materiales de alto grado los cuales pueden justificar al elevado costo de tratamiento para alcanzar una elevada recuperación. Tales materiales incluyen concentrados de flotación y gravimétricos que pueden contener oro grueso o en los que el oro puede estar presente en minerales solubles en 7 cianuro como sulfuros o donde el oro puede aparecer con otros minerales que interfieren en la cianuración estándar, tales como telurio y mercurio (Rojas, 2003).

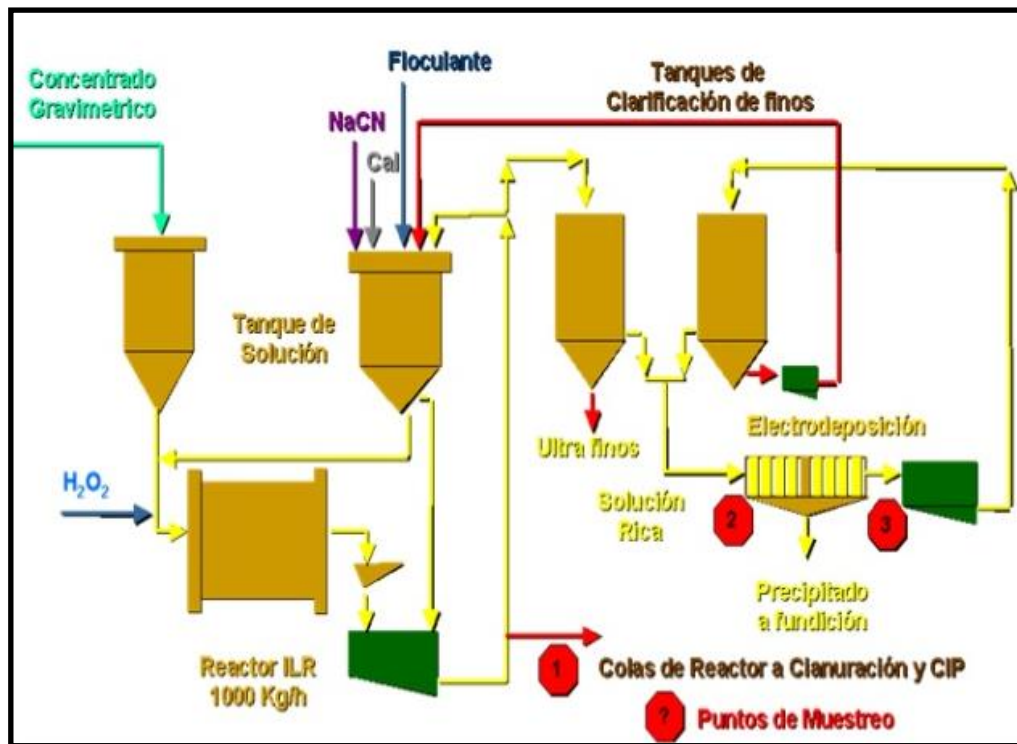


Figura 5. Planta de cianuración intensiva – Antapite

Fuente: <https://www.slideshare.net/TimmyManuelPiminchum/> fundiciondeor o-23/05/2018

2.2.5.4. Lixiviación en Bateas

La lixiviación en tinas (estanques) es por definición, inundar o sumergir la mena finamente triturada 0,0254 m (– 1 plg.) en una solución de cianuro, en grandes tinas capaces de recibir miles de toneladas de mena. El grado de trituración y aglomeración debe ser justificado por una mejora en la recuperación de oro. El

objetivo de la lixiviación de menas de oro en tinas, es reducir el tiempo de lixiviación e incrementar la extracción y contenido de oro de la solución cargada, en comparación con los otros tipos de lixiviación. Este proceso es poco utilizado debido al alto costo de capital asociado con la construcción de las bateas, pero posee la ventaja de un eficiente mojado de toda la superficie del mineral (Rojas, 2003).

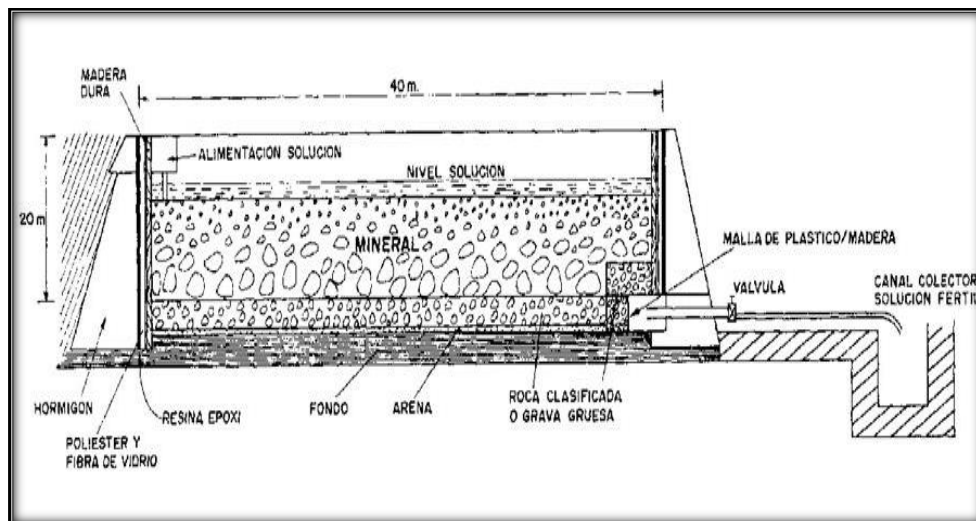


Figura 6. Equipo de lixiviación en batea.
Fuente: <http://slideplayer.es/slide/38254-23/05/2018>

2.2.5.5. Lixiviación *In Situ*

Este proceso consiste básicamente en la aplicación de la solución de cianuro diluida en un mineral directamente en el lugar en donde se encuentra. Para esto se requiere que la permeabilidad del mineral sea tal que la solución pueda tener acceso a una porción económicamente significativa de metal noble. El requerimiento de permeabilidad puede ser una propiedad del cuerpo mineral (poroso o fracturado) o puede ser inducido por voladura para crear suficiente fragmentación. En la práctica el proceso ha sido aplicado solo en contados casos debido a la baja eficiencia de contacto metal – solución, baja recuperación de las soluciones cargadas y restricciones medioambientales (Rojas, 2003).

La lixiviación *IN SITU* consiste en la solubilización de las especies mineralógicas valiosas existentes en un yacimiento sin necesidad de mover el mineral del lugar donde se encuentra ver Figura 7.

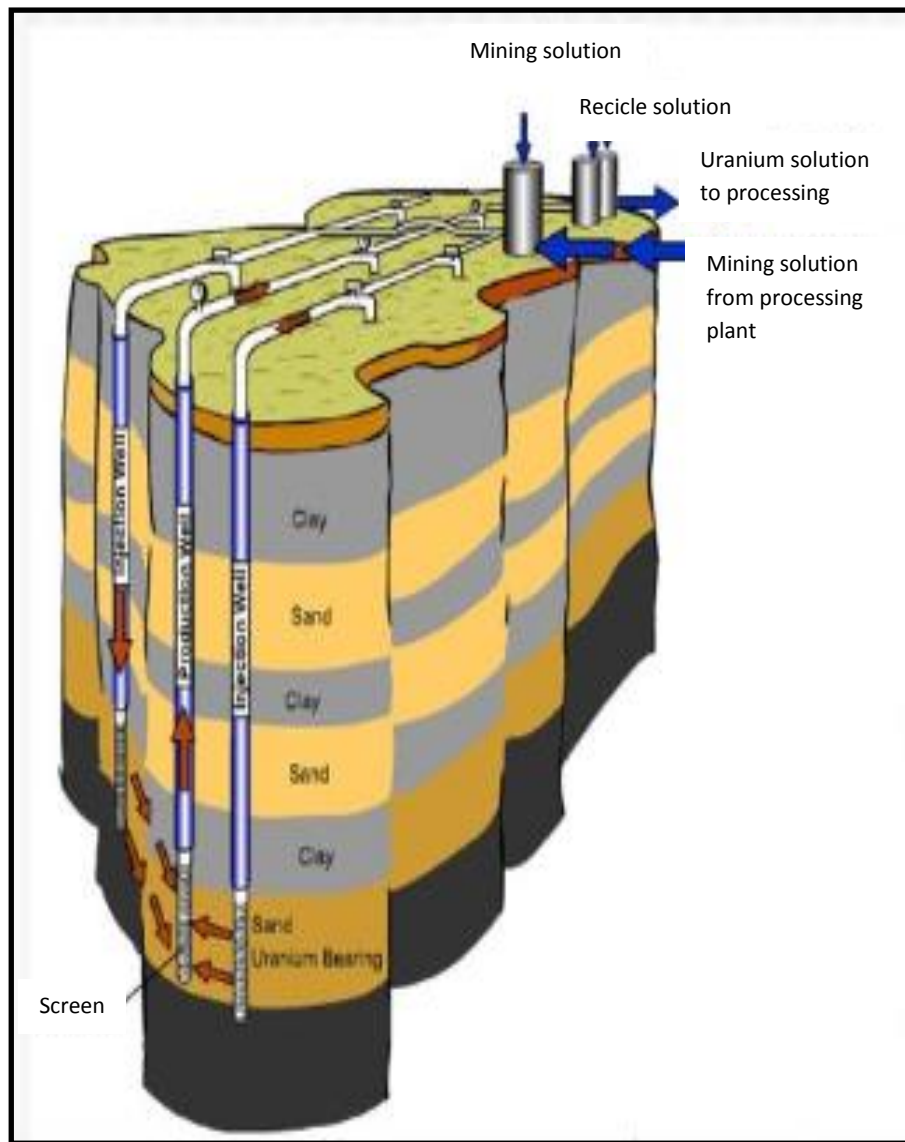


Figura 7. Lixiviación *IN SITU*

Fuente: <http://docplayer.es/10211810-Extraccion-solido-liquido-metodos-de-operacion-en-la-extraccion-solido-liquida.html-23/05/2018>

2.2.6. Variables en el proceso de lixiviación de oro

2.2.6.1. Densidad de pulpa

La pulpa es la mezcla constituida por sólidos de una granulometría casi uniforme y otra constituida por un líquido, generalmente el agua. Tiene características propias tales como gravedad específica, peso y volumen (Ramírez & Sánchez, 2016).

El porcentaje de sólidos por peso en la pulpa por lo general deben estar comprendidos entre 30 y 60 %. A bajos porcentajes de sólidos existe mayor cantidad de soluciones en contacto con la partícula mineral y se obtiene una disolución mayor, sin embargo, aumenta el consumo de cianuro (Flores, 1992).

2.2.6.2. Efecto de la concentración de cianuro en la disolución del oro

La velocidad de disolución de oro aumenta linealmente con el aumento de cianuro hasta un cierto límite más allá del cual un

aumento adicional cianuro tiene un efecto más bien retardante en la disolución de oro (Ramírez & Sánchez, 2016).

La disminución de oro a concentraciones altas de cianuro se debe al aumento de pH de la solución producida por la hidrólisis del cianuro, la concentración de cianuro apropiada para disolver porcentajes elevados de oro, depende de la naturaleza mineralógica del material a ser tratado (Flores, 1992).

En las operaciones de minería del oro utilizan soluciones muy diluidas de cianuro de sodio (NaCN), típicamente entre 0,01 % y 0,05 % de cianuro (100 a 500 partes por millón). (Logsdon, Hagelstein & Mudder, 2001).

2.2.6.3. Efecto de la concentración de oxígeno sobre la disolución del oro

El oxígeno es un agente oxidante, esencial para la disolución de oro bajo condiciones normales de cianuración, la tasa de disolución de oro en soluciones de cianuro es en cierto proporcional a la tasa de disolución de oxígeno.

El oxígeno es difícil de controlar debido a su escasa solubilidad en agua bajo condiciones atmosféricas, a nivel del mar y 298 K (25° C) (Romero & Flores 2010).

2.2.6.4. Tiempo de cianuración

El tiempo es muy variable y depende de factores como la composición mineralógica, tamaño de las partículas de oro y plata, grado de liberación, concentración de cianuro en la solución y la temperatura del ambiente (Armijos, 2011).

También menciona que mientras más largo sea el tiempo de cianuración requerido para alcanzar una recuperación deseada de una mena de oro, mayor la capacidad requerida de los tanques de lixiviación, y por tanto, mayor el costo de capital de la planta. En la práctica, se encuentra que el tiempo de residencia en plantas de oro, varía en un amplio rango (10 a 72 horas) (Ramírez y Sánchez, 2016).

2.2.6.5. Efecto de la alcalinidad sobre la disolución del oro

El operar en un medio alcalino, no solo evita la hidrólisis del cianuro, sino también las pérdidas de éste por contacto con el CO₂ de la atmósfera, neutraliza los compuestos ácidos de las sales ferrosas y férricas, neutraliza así mismo la acción ácida de cualquier sal que se forme por descomposición de los minerales y mejora la extracción de teluros, plata, rubí y otros componentes difíciles de disolver de los metales preciosos (Vesga, 2010).

El pH varía entre 10 a 12 como rango óptimo para disoluciones de minerales auríferos (Armijos, 2011).

2.2.6.6. Efecto de la lixiviación por agitación sobre la disolución del oro

La lixiviación por agitación puede realizarse de forma intermitente, continua, en contracorriente, o continuo en paralelo. Se recurre a la agitación mediante burbujeo o bien a la agitación mecánica para mantener la pulpa en suspensión, hasta que se logra la disolución completa, siendo el tiempo de contacto de los sólidos con la solución del orden de horas, comparado con el

proceso de lixiviación en montones que requiere meses (Vesga, 2010).

2.2.6.7. Efecto de la temperatura sobre la disolución del oro

La disolución del oro y la plata tiende a aumentar conforme aumenta la temperatura de la pulpa. Sin embargo, cuando se aumenta la temperatura, disminuye la cantidad de oxígeno disuelto en el agua y también la solubilidad de los metales preciosos. Normalmente se opera a la temperatura ambiente y solo se calienta las soluciones cuando se trata de despojar al oro del carbón activado o cuando se cianuran concentrados con muy altas leyes. (Vesga, 2010).

2.2.6.8. Influencia en el proceso de cianuración de otros constituyentes en la pulpa

Los compuestos minerales de mena, donde se incluyen algunas especies de cobre, hierro, zinc, plomo, arsénico, antimonio, otros, consume cianuro y oxígeno, por ello se requiere

mayor concentración en solución para lograr tasas aceptables de extracción (Ramírez & Sánchez, 2016).

Las sustancias carbonáceas adsorben el oro disuelto, lo que disminuye la extracción del metal precioso y el material arcilloso genera problemas de recuperación si el oro está asociado directamente a las arcillas (Marsden & House, 1992).

2.2.7. Termodinámica de la cianuración de oro

Para poder comprobar los mecanismos físico-químicos de la lixiviación, será necesario hacer una revisión de sus principales propiedades termodinámicas y en particular de sus estados estables y metaestables, representadas clásicamente en el diagrama de Pourbaix, el cual se grafica teniendo en cuenta el potencial de oxidación y/o reducción química propuesta y el pH a la cual se lleva a cabo ésta. (Presión y temperatura = cte).

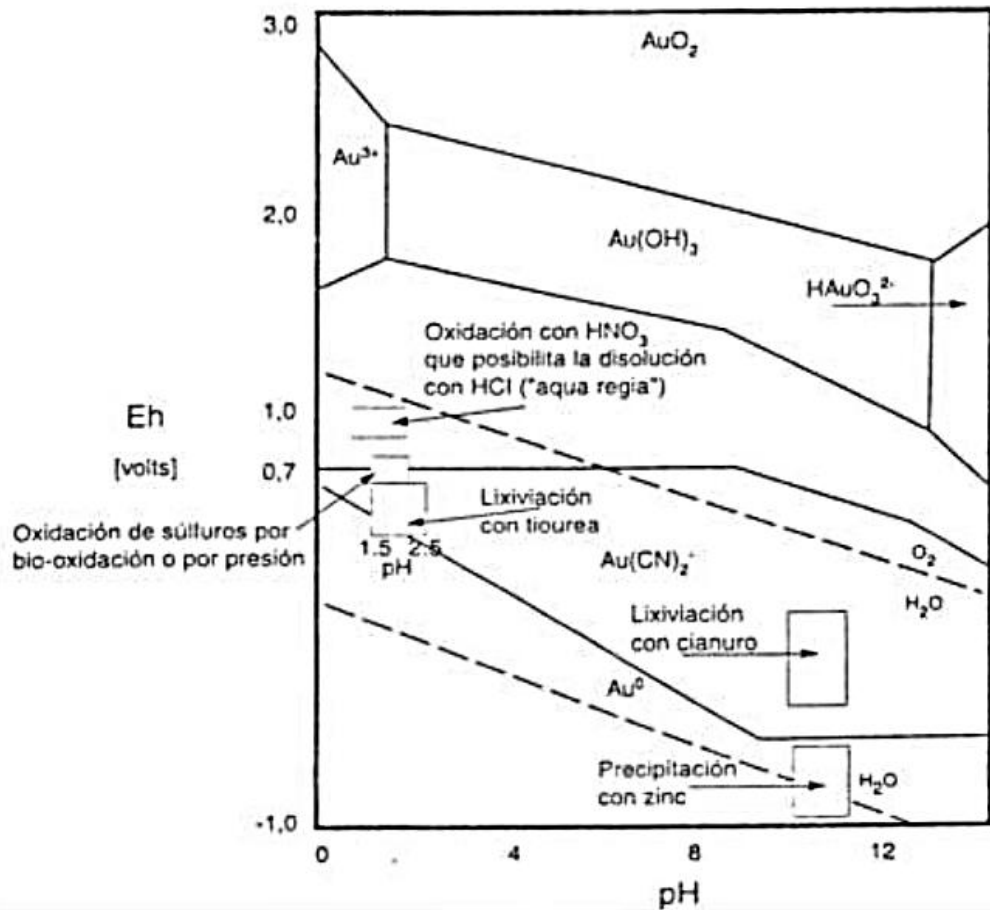


Figura 8. Diagrama Eh – pH para el sistema Au – CN – H₂O, en donde se muestra el aurocianuro y los rangos de operación para los distintos procesos industriales de extracción de oro.

Fuente: Domic E., 2001

Se puede apreciar en la figura 8 que la disolución de oro se encuentra dentro de los límites de estabilidad del agua. La estabilidad del complejo aurocianuro está limitado por una recta que inicialmente muestra una pendiente inclinada (efecto de la reducción del cianuro a pH menores de nueve) tornándose luego

casi horizontal debido a la acción oxidante del oxígeno en medio básico, esto permite que sea posible la reacción de lixiviación, por formación de aurocianuros. Para que se pueda formar una molécula de aurocianuro, es necesaria la reacción del ión cianuro (presente en la solución alcalina) con la partícula de oro en presencia de oxígeno. (Misari, 1993)

2.2.8. Lixiviación de oro y plata por cianuración

Dentro del contexto de la extracción del oro y la plata, la lixiviación con cianuro es la disolución de estos metales o sus minerales en una solución alcalina de cianuro. El mayor interés en este proceso es la reacción de disolución selectiva del oro y la plata en una solución acuosa formando complejos metálicos (Marsden, 1992).

El cianuro forma complejos estables con el oro y la plata para ser usado en los procesos de extracción. Este proceso de lixiviación se usa porque tiene relativamente un bajo costo y gran eficiencia para la disolución de estos metales nobles. El oxidante comúnmente utilizado en la lixiviación con cianuro es el oxígeno del

aire, el cual contribuye a la economía de este proceso (Rojas, 2003).

Aunque existen otros reactivos distintos al cianuro como el bromo, yodo, cloro y compuestos como tioúrea, tiosulfato y tiocianato (Vargas ,1991), en la disolución del oro y la plata, ninguno se ha usado comercialmente debido a desventajas económicas y complejidad en la química de los procesos (Bazán & Medina ,1999).

2.2.9. Procesos de cianuración

La elección del proceso para la cianuración depende primeramente de la relación entre tamaño de partícula y recuperación, costos de operación y capital y la velocidad de disolución en cada caso. Algunas veces otros factores tales como la recuperación de otros metales de valor: plata y metales del grupo del platino, consideraciones medioambientales y disponibilidad de financiamiento de capital pueden jugar un importante rol en esta selección (Rojas, 2003).

Los parámetros básicos que deben conocerse en el proceso de cianuración son:

- Identificación, composición y características de los minerales portadores de oro.
- Tipos de asociaciones y composiciones de los minerales y de la ganga que acompañan a las especies auríferas.
- Concentración o leyes de oro en el material a procesar.
- Granulometría y forma de ocurrencia de las partículas auríferas y de los minerales asociados.
- Grado de liberación de las partículas de oro y de los otros elementos de valor constituidos en granos mixtos, así como de la ganga.

La recuperación de oro fino contenido en minerales, relaves de concentración gravitacional o concentrados de flotación se realiza por medio de procesos químicos de disolución o lixiviación con cianuro de sodio (NaCN), llamado cianuración. Los factores limitantes para obtener una óptima extracción del oro en la solución cianurada son:

- Tiempo de contacto al que está expuesto el mineral durante la lixiviación.
- Molienda necesaria para obtener una buena liberación de las partículas de oro de la ganga.
- Contenido de sustancias que inhiben o retardan las reacciones de disolución. Por ejemplo, aquellas que consumen cianuro u oxígeno libre, elemento necesario para la reacción del lixivante con las partículas de oro.

2.2.10. Química de las soluciones de cianuración

Las sales de cianuro simple, como cianuro de sodio, potasio y calcio, se disuelven en agua para formar sus respectivos cationes metálicos e iones de cianuro libre. Por ejemplo, en el caso del cianuro de potasio se tiene:



La Tabla 1 muestra la solubilidad y el contenido de cianuro relativo de las diferentes sales. La elección del tipo de cianuro depende del método de aplicación, costo y disponibilidad de dicho reactivo (Rojas, 2003).

Tabla 1

Propiedades de compuestos de cianuro simple

Compuesto	Cianuro Disponible (%)	Solubilidad en agua a 298 K (25°C) (g/100 cc)
NaCN	53,1	48
KCN	40,0	50
Ca(CN)2	56,5	Se descompone

Fuente: (Marsden, 1992)

Julian y Smart (1903), compararon los efectos disolventes del cianuro de amonio, sodio, potasio, magnesio, calcio, estroncio y bario sobre el oro y la plata y encontraron que el radical alcalino no afecta el efecto disolvente sobre el cianuro particular.

2.2.10.1. Descomposición de las soluciones de cianuro

El cianuro se hidroliza en el agua para formar el ácido cianhídrico (HCN) e iones de hidróxido (OH^-), con el incremento correspondiente en el pH:



El ácido cianhídrico es un ácido débil, el cual se disocia parcialmente en agua como sigue:



Con: K_a a 298 K (25 °C) = $6,2 \times 10^{-10}$ y $\log K = 9,21$.

La Figura 8 muestra la extensión de esta reacción de disociación en el equilibrio como una función del pH. A un pH de 8,4, menos del 90 % existe como ácido cianhídrico. A un pH aproximado de 9,3, la mitad del total de cianuro existente está como ácido cianhídrico y la mitad como iones de cianuro libre

(CN⁻) y a pH = 10,2, más del 90 % del total de cianuro se presenta como cianuro libre (Rojas, 2003).

La pérdida de cianuro en solución se produce porque el ácido cianhídrico tiene una presión de vapor relativamente alta 100 KPa a 299 K (26 °C) y consecuentemente éste se volatiliza rápidamente en la superficie líquida bajo condiciones ambientales. Como resultado, muchos sistemas de lixiviación con cianuro operan a un pH con el cual se minimiza la pérdida de cianuro, típicamente sobre 10, aunque a un pH excesivamente alto (sobre 11,5) puede causar efectos perjudiciales para la lixiviación de los metales nobles (Rojas, 2003). Las funciones de un álcali libre en la cianuración son las siguientes:

- a) Evita pérdida de cianuro por hidrólisis.
- b) Evita pérdida de cianuro por acción del dióxido de carbono en el aire:



c) Descompone los bicarbonatos en el agua antes de ser usados en cianuración.

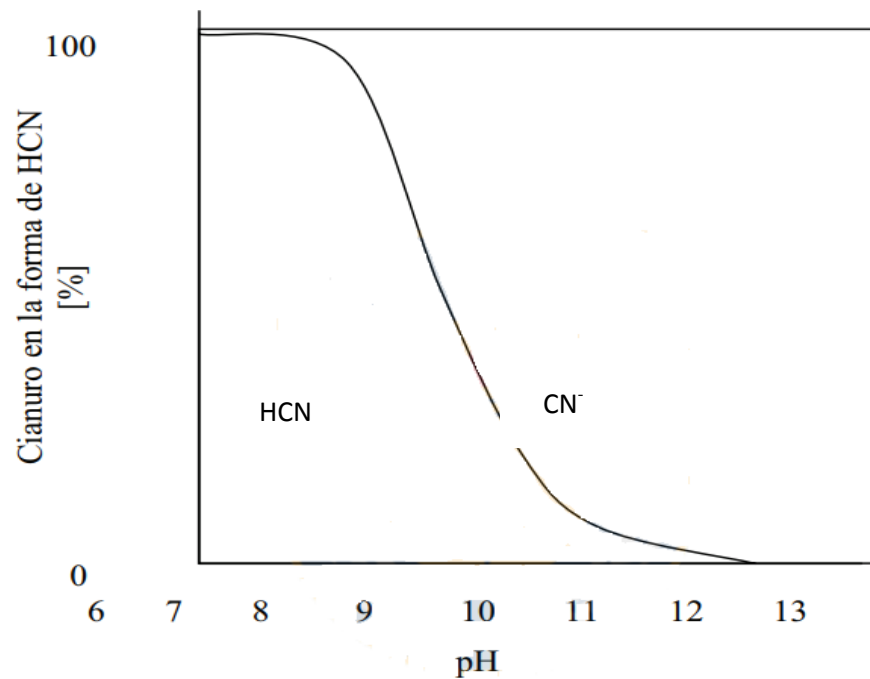
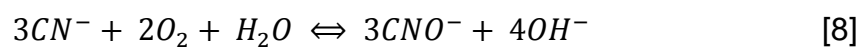
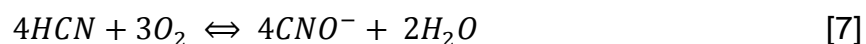


Figura 9. Especiación de cianuro y ácido cianhídrico en soluciones acuosas como función del pH
Fuente: Marsden, 1992

- d) Neutraliza los compuestos ácidos tales como sales ferrosas, férricas y sulfato de magnesio en el agua antes de adicionar al circuito de cianuro.
- e) Neutraliza los constituyentes ácidos en el mineral.

- f) Ayuda a la sedimentación de las partículas de mineral fino.

Tanto el ácido cianhídrico como el cianuro libre pueden ser oxidados a cianato en presencia de oxígeno y bajo condiciones oxidantes como se observa en la Figura 9 pero el cianato no disuelve oro (Rojas, 2003).



En la práctica, si se requieren agentes fuertemente oxidantes pueden ser usados el ozono (O_3), peróxido de hidrógeno (H_2O_2) o ácido hipocloroso ($HOCl$), para que la reacción proceda a una velocidad significativa (Rojas, 2003).

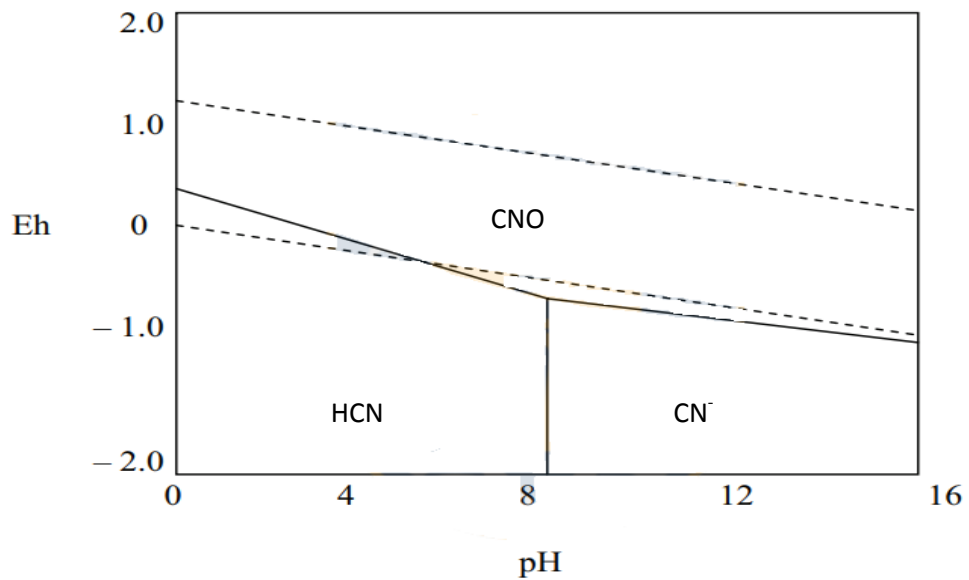


Figura 10. Diagrama Eh – pH para el sistema CN – H₂O a 25 °C. Concentración de cianuro = 10⁻³ M, P(O₂) = 1 atm

Fuente: Marsden, 1992.

2.2.11. Disolución de metales preciosos

2.2.11.1. Naturaleza electroquímica de la cianuración

El principal avance en la comprensión de la química de la cianuración de oro fue hecho por Kudryk y Kellog (1954), quienes demostraron la naturaleza electroquímica de la cianuración del oro. La reacción de disolución de oro,

denominada ecuación de Elsner (Menne, 1992) puede escribirse como:



Esta reacción consiste de dos medias reacciones anódicas y catódicas.

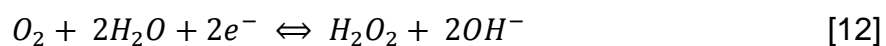
a) Reacción anódica

La reacción anódica involucra la oxidación del oro (0) a oro (I) a través de dos etapas: la reacción de oro con un ion de cianuro para formar un film superficial que puede ser AuCN y luego la formación del complejo de cianuro de oro (I) $Au(CN)_2^-$. Como se observa en las siguientes reacciones (Matthew, 1997):



b) Reacción catódica

Las anteriores reacciones están acompañadas por la reducción catódica del oxígeno en la superficie del metal. En la superficie del oro, la reacción 12 muestra la reducción del oxígeno a peróxido y la reacción 13 muestra la reducción del peróxido a hidróxido (Matthew, 1997):



Los diagramas pH – potencial (diagramas de Pourbaix) para los sistemas Au–CN–H₂O y Ag–CN–H₂O se muestran en las Figuras 11 y 12.

A partir de estos diagramas de estabilidad acuosa (Xue y Osseo ,1985), se puede observar lo siguiente:

- El oro y la plata se comportan de manera similar en soluciones cianuradas.

- El $\text{Au}(\text{CN})_2^-$ y $\text{Ag}(\text{CN})_2^-$ son los principales complejos iónicos con un amplio campo de estabilidad.
- El sólido AgCN se forma sólo a bajo pH ($< 3,5$).
- La fuerza impulsora electroquímica para la disolución de los dos metales es maximizada a valores de pH sobre 9,4. Lixiviaciones con cianuro a pH menor a 9,4 se han efectuado en Australia (Perry & Dunner, 1999), pero se demostró que el HCN no disuelve el oro tan rápido como el ion CN^- y además el consumo de cianuro fue considerable durante todo el proceso de disolución.

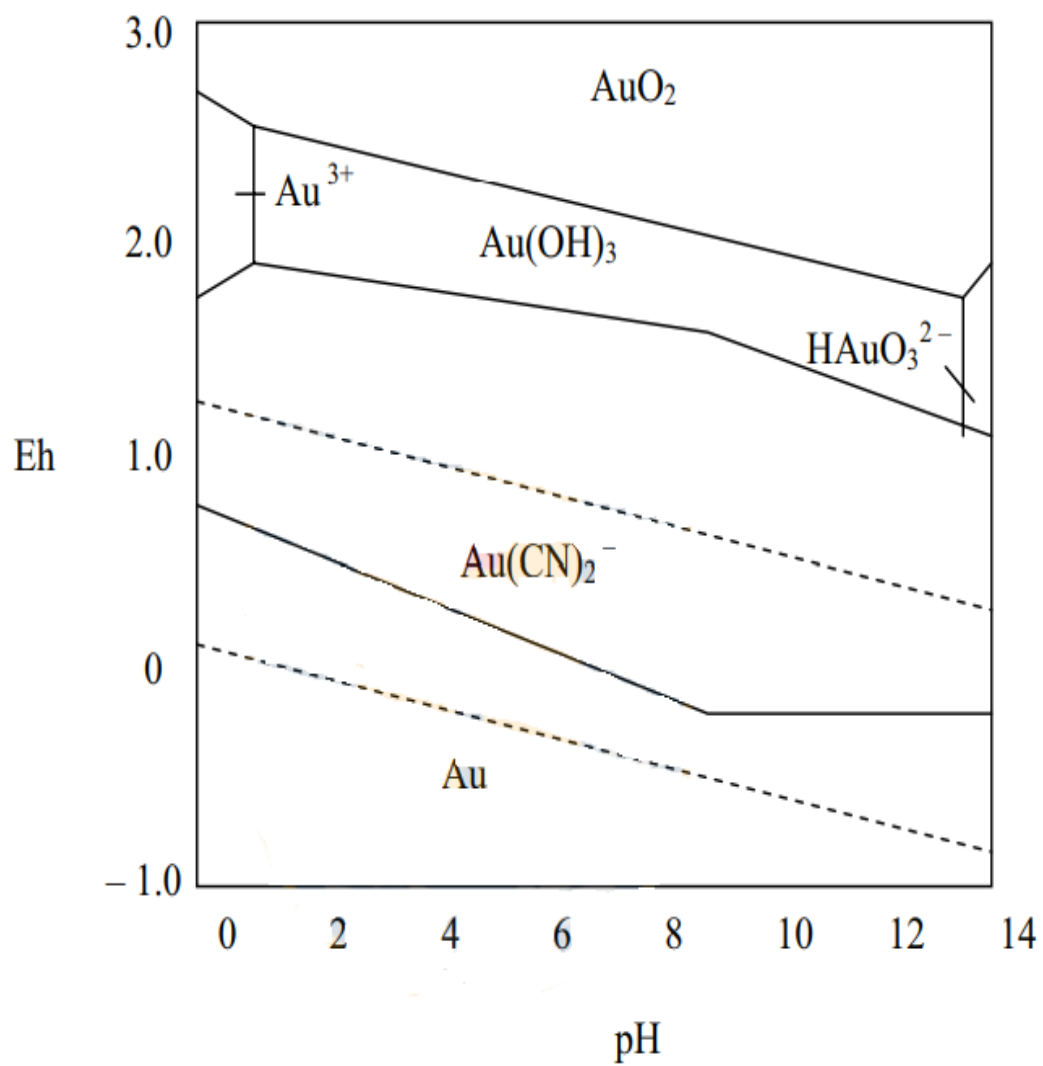


Figura 11. Diagrama Eh - pH para el sistema Au - CN - H₂O a 25 °C. Concentración de todas las especies de oro solubles = 10⁻⁴ M, [CN⁻] = 10⁻³ M, P(O₂) = 1 atm
Fuente: Xue y Osseo ,1985.

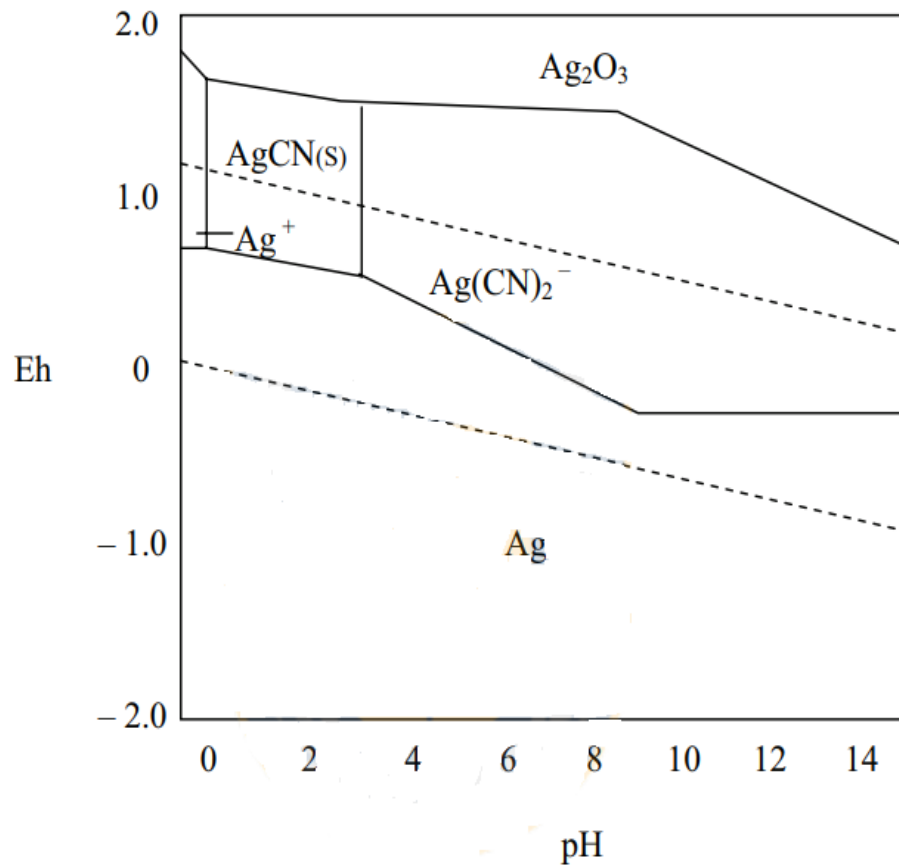


Figura 12. Diagrama Eh – pH para el sistema Ag – CN – H₂O a 298 K (25 °C).
 Concentración de todas las especies de plata solubles = 10⁻⁴ M, [CN⁻] = 10⁻³ M,
 P(O₂) = 1 atm
 Fuente: Xue y Osseo ,1985.

2.2.12. Cinética de la reacción de cianuración de oro

El proceso de disolución de oro y plata en soluciones con cianuro involucra reacciones heterogéneas en la interfase sólido – líquido, como se observa en Figura 12.

Por lo tanto, los pasos secuenciales siguientes pueden ser considerados como principales para la lixiviación de estos metales nobles:

- ✓ Absorción de oxígeno en la solución.
- ✓ Transporte de cianuro y oxígeno disuelto a la interfase sólido – líquido.
- ✓ Adsorción de los reactantes (CN^- y O_2) en la superficie sólida.
- ✓ Reacción electroquímica.
- ✓ Desorción de los complejos solubles de oro – cianuro, plata – cianuro y otros productos de reacción desde la fase sólida.
- ✓ Transporte de los productos desorbidos a la solución.

El proceso de cianuración es función de diferentes parámetros tales como disponibilidad de oxígeno en la interfase sólido – líquido, concentración de cianuro en la solución, temperatura de pulpa, pH y Eh de la suspensión sólido – solvente, área superficial disponible y velocidad de agitación (Rojas, 2003).

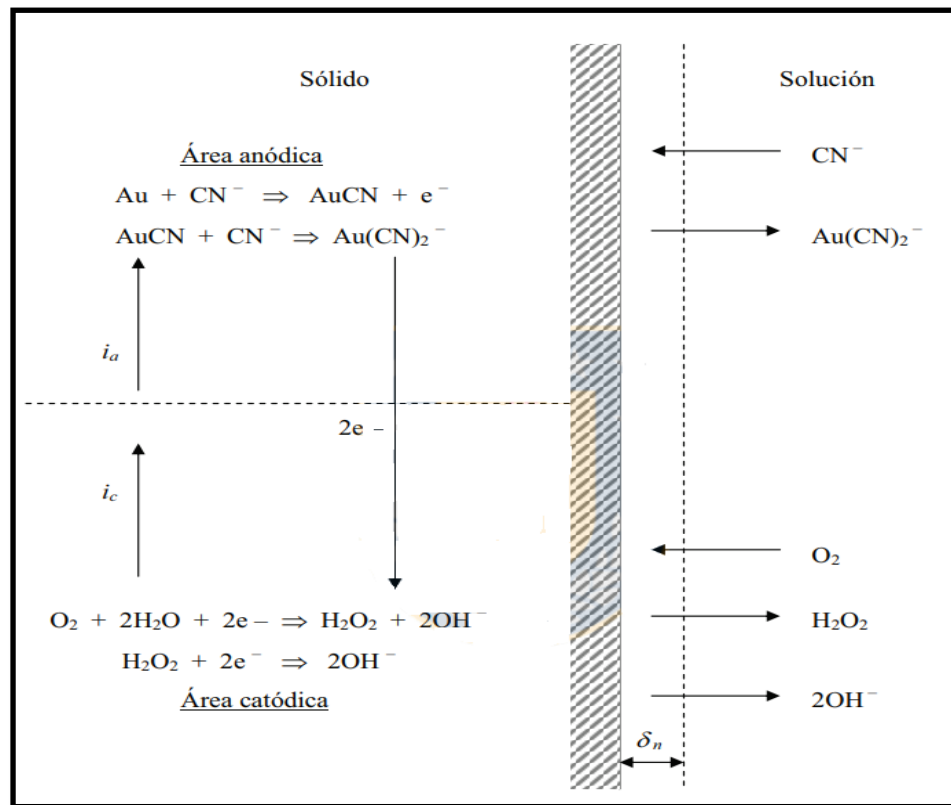


Figura 13. Representación esquemática de una celda de corrosión local en la superficie del oro en contacto con una solución de cianuro que contiene oxígeno, i_a = corriente anódica, i_c = corriente catódica
Fuente: Marsden, 1992.

2.2.13. Adsorción con Carbón Activado

2.2.13.1. Mecanismo de Adsorción

La mayoría de tipos de carbón vegetal adsorberán oro en mayor o menor grado. El carbón vegetal más efectivo es producido específicamente para la adsorción es hecho de cascara de coco o melocotón calcinante descascara o el melocotón calcinados alrededor de 973 K (700°C) a 1073 K (800 °C) en presencia de vapor.

Durante los últimos años, un número de investigaciones en las que se puso la mira entender el mecanismo de adsorción con carbón fue efectuado. Aunque hay mucha confusión y poco acuerdo entre los investigadores diversos, todos coinciden en lo siguiente:

➤ La adsorción de cianuro de oro en una partícula porosa de carbón vegetal involucra los fenómenos simultáneos de difusión en el poro y la adsorción en las áreas o sitios activos del carbón teniendo una afinidad para oro y plata.

➤ Las investigaciones en la adsorción consideran usualmente un modelo de difusión en el poro cuyas isothermas de adsorción con las isoterma de Freundlich. El estudio de cinética de adsorción de carbón indica que la energía de activación para la difusión demuestra que la etapa limitante en la tasa de adsorción es la difusión.

2.2.13.2. Especificación del carbón

El carbón comercialmente disponible es usado en la extracción de oro de licores de cianuración y usualmente viene en dos tamaños (- 6 +16 malla o -12 +30 malla). Estos productos están disponibles en el mercado; lo siguiente es una lista típica de especificación para carbón activado.

- ✓ Área Superficial, m²/g 1050-1150
- ✓ Densidad aparente, g/cm³ 0,48
- ✓ Densidad de la partícula, g/cm³ 0,85
- ✓ Vacíos, 40 %

Operación con el carbón

El proceso de adsorción de carbón para la recuperación de oro y plata consiste de tres etapas:

a) Cargado.

El oro y la plata son adsorbidos de la solución de cianuración sobre las partículas de carbón.

b) Elución y reactivación.

El oro y la plata son extraídos del carbón en una solución concentrada y el carbón es regenerado y devuelto al circuito

c) Recuperación.

El oro y la plata son recuperados de la solución concentrada por electrodeposición o la precipitación en polvo de zinc. La solución pobre resultante es devuelta a la elución y la reactivación, y los metales preciosos recobrados son fundidos formando una barra de Dore.

La figura 14, ilustra un diagrama de flujo típico para la recuperación de oro y plata usando adsorción con carbón. Se

observa las etapas de carga, la elución, y la recuperación del proceso.

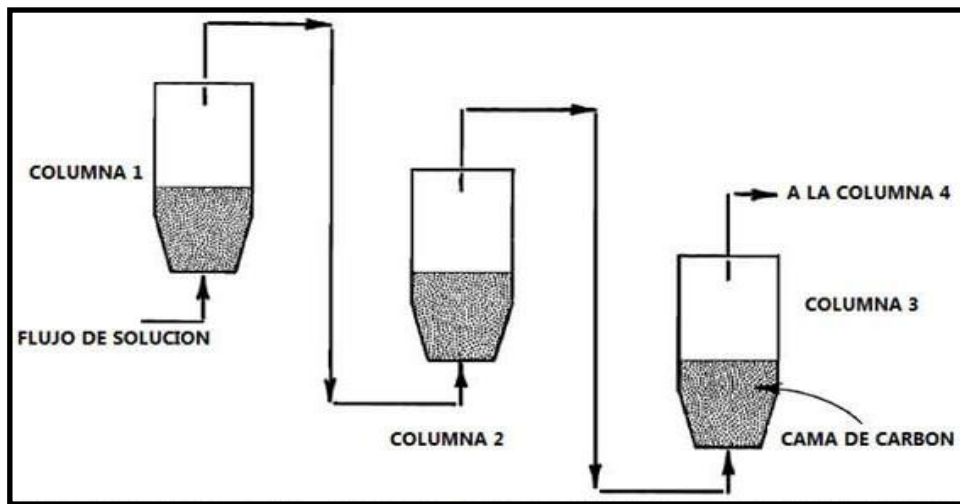


Figura 14. Configuración de un circuito con columnas de carbón activado
Fuente: <https://www.911metallurgist.com/metalurgia/adsorcion-carbon-activado-24/05/2018>

Unidades de laboratorio o industriales pueden usar varios métodos de adsorción de carbón para realizar los tres pasos indicados. Los párrafos que siguen tratan primordialmente con la carga y las técnicas diversas disponibles para efectuar la adsorción en las partículas de carbón.

Tres métodos de cargado son comúnmente usados y son los siguientes: carbón en columna (CIC); carbón en pulpa (CIP); y carbón en lixiviación (CIL).

a). El proceso CIC

En el proceso CIC la solución entra en contacto con el carbón cargado en una columna. La solución se hace pasar por el carbón en una dirección ascendente, dilatando la columna de carbón verticalmente. Como resultado de esta expansión vertical, el término " cama de carbón expandida" es también usado para describir el proceso.

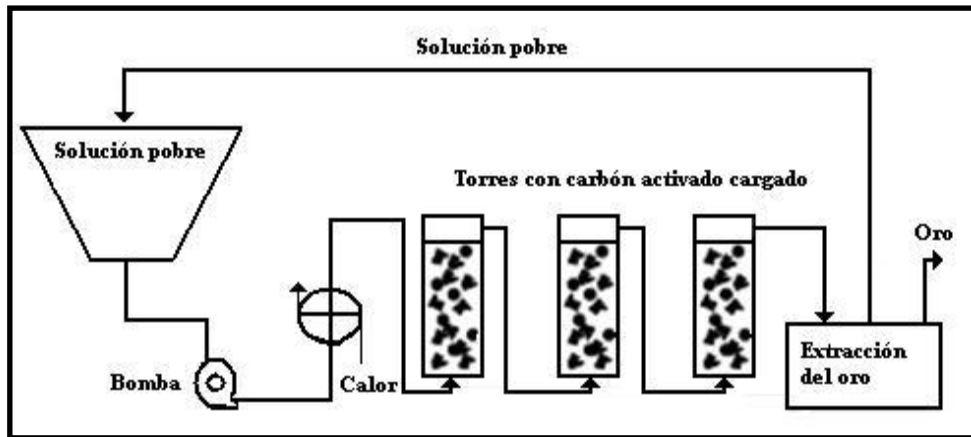


Figura 15. Esquema del proceso CIC
 Fuente: https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Diagrama-de-un-sistema-de-adsorcion_fig1_257308533-28/05/2018

b) El proceso CIP

En el proceso CIP la pulpa está en agitación en tanque de agitación y hay un movimiento en contracorriente (El carbón fluye en una dirección, mientras que la pulpa fluye en otras).

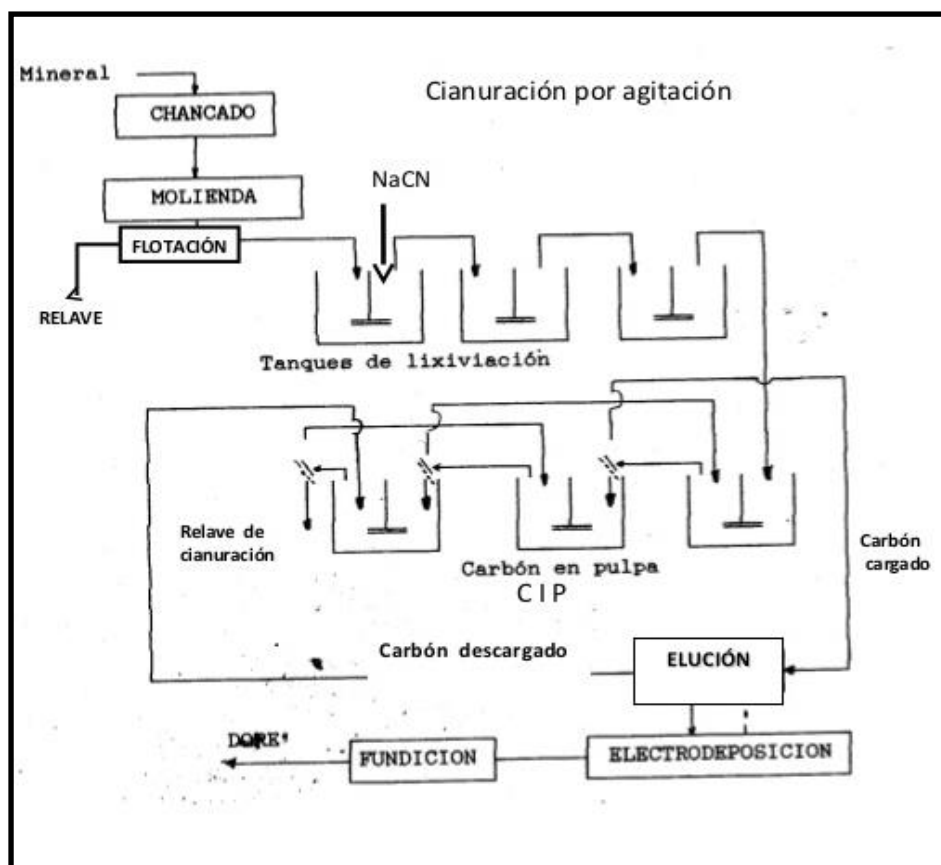


Figura 16. Esquema del proceso CIP
Fuente: <https://es.slideshare.net/tommyazanacasamayor/carbon-activado-y-cianuracin-en-tanques>

c) El proceso CIL

El proceso CIL es de hecho una variante del circuito de lixiviación ya que se realiza la adsorción y disolución simultáneamente.

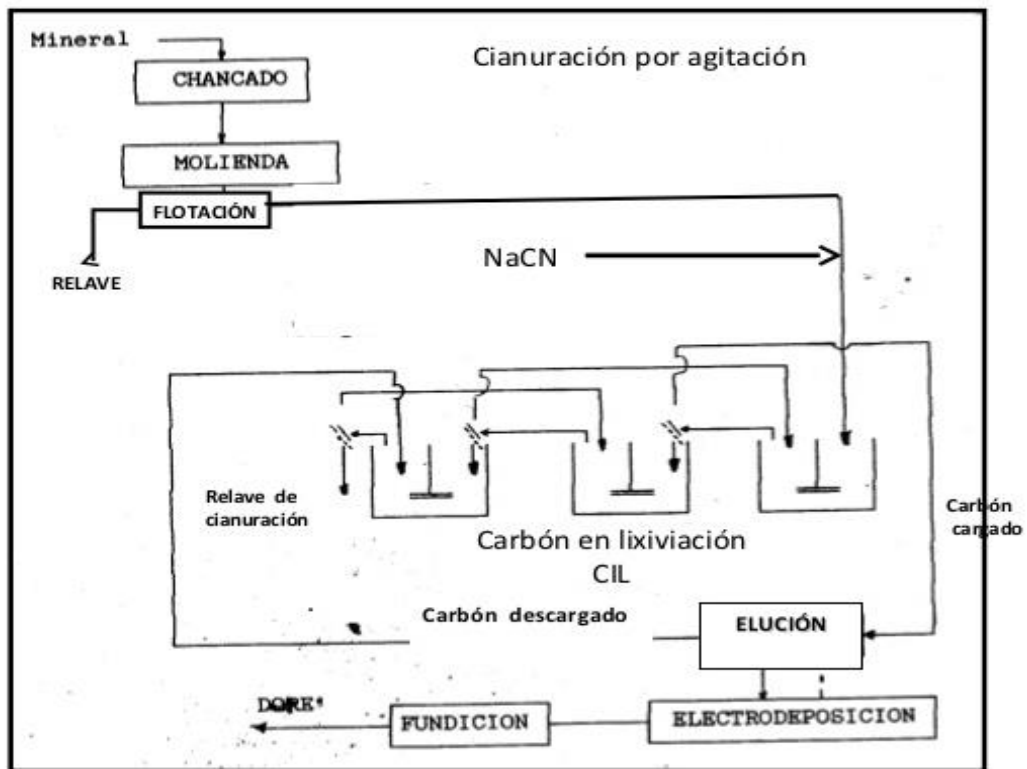


Figura 17. Esquema del proceso CIL

Fuente: <https://es.slideshare.net/tommyazanacasamayor/carbon-activado-y-cianuracin-en-tanques>

2.2.14. Cuando usar Adsorción con Carbón

Los sistemas de recuperación con carbón activado han ganado una aceptación en la minería de oro dentro de los últimos años. Como se sabe, una de las ventajas principales de este proceso es que la solución no tiene que ser tratada antes de la recuperación. En el proceso CIC (la cuál es usada en lixiviación en pilas) la

solución rica es pasada por una cama de carbón sin pretratamiento.

Los minerales lamosos y los carbonaceos presentan pocos problemas a la adsorción con carbón a diferencia del sistema de Merrill-Crowe que es sensible a estos. El proceso CIP o CIL eliminan la necesidad para separación del sólido-líquido. Los sistemas de carbón parecen funcionar en una máxima eficiencia, sin distinción de la ley de metales preciosos en solución. Así, las recuperaciones pueden ser mejores con sistemas de carbón si ninguno de los factores que complica es complejo. Sin embargo, el carbón fácilmente puede ser ensuciado por sales disueltas, en particular carbonatos de magnesio o calcio. El carbón también puede ser ensuciado por compuestos orgánicos como aceites y los reactivos de flotación.

Los sistemas de carbón tienden a requerir de mayor trabajo, a menudo requieren de un lavado ácido frecuente o reactivación. La elución y la regeneración son las partes más caras del proceso.

La elución a presión parece ser el método más popular, actualmente en uso, aunque el trabajo es continuar en desarrollo de varios métodos orgánicos de elución. Después de la elución del carbón, un proceso como la cementación con zinc o electrodeposición debe estar disponible para tratar la solución. Cada uno de estos procesos suplementarios presentan sus propias complicaciones operacionales.

Con ambos procesos, Merrill-Crowe (Figura 18), y los sistemas de carbón, es prudente investigar la existencia y el efecto de mercurio en la solución rica. Progresivamente, la operación tiene que ocuparse de dificultades operacionales asociadas con la existencia de mercurio. El mercurio tiende a ser perjudicial para la operación, causando un incremento en el consumo de zinc, por un lado, y decreciendo la carga de oro en el carbón. El mercurio pasiva el zinc en el proceso Merrill-Crowe Crowe, y ocupa espacio activo valioso en la superficie del carbón.

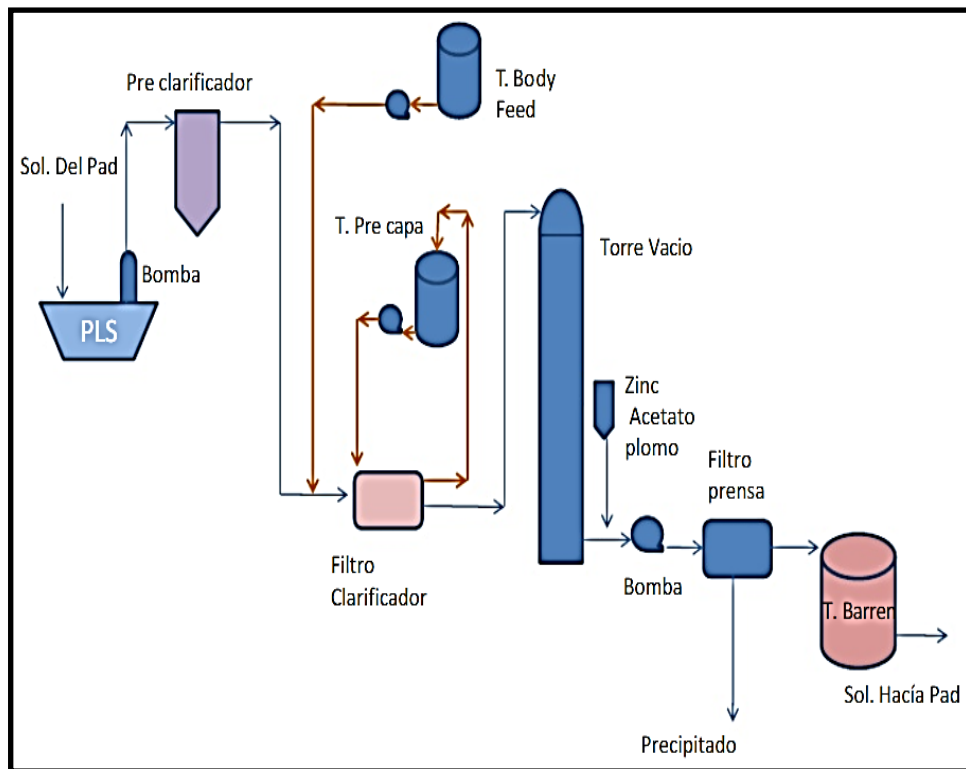


Figura 18. Proceso MERRIL CROWE
Fuente: <https://es.scribd.com/doc/292418136/Merrill-Crowe>

2.3. Definición de términos

2.3.1. Análisis de mallas

Un análisis de malla del mineral a menudo suministrará información del valor considerable. Este puede comenzar a malla 20 e incluir el rango de tamaño hasta la malla 325. Una porción de cada tamaño de malla deberá ser analizado por oro y plata.

2.3.2. Análisis Granuloquímico

Consiste en realizar un análisis químico de oro y plata a cada fracción de mineral resultante del tamizaje del material representativo. Este análisis permite calcular la distribución porcentual del contenido metálico de ambos elementos por mallas. Lo que hace posible poder obtener una extracción por malla de Au y Ag, al realizar la misma operación con los rípios después de la cianuración.

2.3.3. La alcalinidad de la solución- ph

El uso de la cal (en solución) para mantener un pH de 10,5 a 11 (alcalinidad protectora) cumple las funciones de:

Evitar pérdidas de cianuro por hidrólisis: $(\text{NaCN} + \text{H}_2\text{O} = \text{HCN} + \text{NaOH})$, haciendo que la reacción sea favorecida hacia la izquierda

2.3.4. Temperatura

El suministro de calor a la solución de cianuro en contacto con oro metálico, produce fenómenos opuestos que afectan la velocidad de disolución. El incremento de la temperatura aumenta la actividad de la solución, incrementándose por consiguiente la velocidad de disolución del oro, al mismo tiempo, la cantidad de oxígeno en la solución disminuye porque la solubilidad de los gases decrece con el aumento

de la temperatura. En la práctica el uso de soluciones calientes para la extracción del oro, resulta desventajosa por el elevado costo, por lo que usualmente, se lixivia a temperatura ambiente.

2.3.5. Tamaño de partícula:

Cuando en minerales se encuentra oro libre grueso, la práctica usual es separarla por medios gravimétricos, antes de la cianuración, de lo contrario, las partículas gruesas no podrán ser disueltas completamente en el tiempo disponible para llevar a cabo el proceso de cianuración. Otra práctica para reducir el tamaño de las partículas de oro, es la molienda y clasificación de los minerales de oro en circuito cerrado, donde las partículas de oro grueso son reducidos de espesor y quebrantadas, logran rebosar del clasificador

2.3.6. Concentración de oxígeno:

El uso del oxígeno es indispensable para la disolución del oro, bajo condiciones normales de cianuración. Múltiples pruebas han demostrado que una adecuada aireación da tan buenos resultados como lo hacen los oxidantes químicos. Barsky, Swainson & Hedley (1934), determinaron la velocidad de disolución del oro en soluciones

de 0,10 % de NaCN, a 298 K (25° C) usando oxígeno, nitrógeno y mezcla de ambos.

2.3.7. Concentración de cianuro:

Hay variaciones muy grandes en la fuerza de la solución que provoca la máxima velocidad de disolución del oro, probablemente debido a la variedad de las técnicas empleadas. Usualmente el factor restrictivo que gobierna la velocidad de disolución del oro es la concentración de oxígeno en la solución en contacto con el oro. Barsky, Swalson y Heddley (1934), comprobaron mediante pruebas realizadas, que la concentración de la solución para una rápida disolución es de 0,05 % de NaCN

2.3.8. Complejos débiles y fuertes de cianuro

Convencionalmente, los químicos en cianuro distinguen entre los complejos "débiles" y "fuertes" de cianuro. Los complejos débiles de cianuro, con frecuencia denominados cianuros "disociables en ácidos débiles" o cianuros DAD (WAD), pueden disociarse en solución y producir concentraciones ambientalmente significativas de cianuro libre.

Los complejos débiles incluyen complejos de cianuro de cadmio, cobre, níquel, plata y zinc. El grado al cual se disocian estos complejos depende en gran medida del pH de la solución.

Por otra parte, los complejos fuertes de cianuro se degradan mucho más lentamente que el cianuro DAD en condiciones químicas y físicas normales. Los complejos de cianuro con oro, cobalto y hierro son fuertes y estables en solución. Esta estabilidad del complejo oro-cianuro es un factor que se debe al uso del cianuro para la extracción del oro del mineral.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1. Tipo y Diseño de la investigación

En el presente trabajo de investigación se diseñó las pruebas, como se observa en la figura 19, determinado el consumo de reactivo y cinética de cianuración de minerales de diferentes granulometrías que conlleven a los resultados esperados.

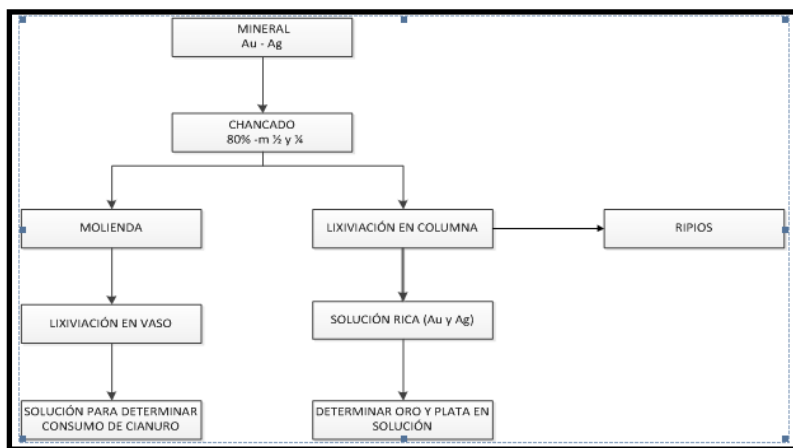


Figura 19 Etapas de las pruebas a realizadas
Fuente: Propia del autor

3.2. Población y muestra

En el presente trabajo se realizó en el laboratorio de la empresa minera, se utilizó Mineral Mixtos Auríferos de la Empresa Minera J.J. Inversiones Minera SAC de la Región de Abancay. Esta empresa compra mineral de los diferentes depósitos de mineral de la zona que tiene reservas para trabajar miles de toneladas. La población de mineral considerada fue de 1/2 toneladas de mineral, de donde se logra obtener 50 kilos de mineral, para ser trasladado al laboratorio para las pruebas metalúrgicas respectivas.

Operacionalización de variables

Las variables que afectan la recuperación, la disolución de los metales tales como oro y plata, la concentración del agente lixiviantes por una serie de factores.

Variable Independiente:

- Granulometría del mineral.
- Densidad de riego
- pH
- Concentración del lixivante
- Concentración de la solución rica

Variable Dependiente:

Recuperación del oro

3.3. Técnicas e instrumentos para recolección de datos

Aproximadamente 30 kilogramos de muestra de mineral, estas se toman por el método de muestreo de canal. La muestra provista contiene minerales de oro y plata, en matriz de cuarzo. Para determinar las características generales de la muestra de mineral, se realizaron caracterizaciones físicas, químicas y mineralógicas. Los análisis químicos completos de la muestra de prueba se obtuvieron por copelación y espectrofotómetro de absorción atómica (AAS). En primer lugar, la muestra completa se redujo a -2 mm con la ayuda de

las trituradoras de mandíbula y rodillo. Se obtuvo una muestra representativa de este mineral triturado mediante el método de *coning* y *quartering*. Los resultados del análisis químico del mineral utilizado en los experimentos se muestran en la Tabla 2 y 3.

Tabla 2

Análisis químicos de muestras de minerales

Oro (g/t)	Plata (g/t)	Cobre (%)
0,88	5,00	0,5

Fuente: Elaboración propia

Como se ve en la Tabla 2, no hay diferencias significativas entre los grados de cobre de varias fracciones de tamaño.

3.4. Procesamiento y análisis de datos

3.4.1 Métodos

En este estudio se aplicaron métodos de lixiviación en columna y agitación para determinar el consumo de reactivos y las condiciones óptimas de operación que nos darán las recuperaciones más altas. Los métodos seguidos durante el

estudio experimental se discutirán en detalle en las secciones posteriores.

3.4.2 Muestreo de materiales

En este estudio se, usó una trituradora de mandíbula de laboratorio, se regulo para obtener un producto de diferentes tamaños como 90 % -malla 0,0125 m ($\frac{1}{2}$ ") y 80 % -malla 0,00625 m ($\frac{1}{4}$ "), para las pruebas experimentales en columna; otra parte de la muestra se pasó por una trituradora de rodillos para devastar el material desde 10 mm hasta 100 % pasando por 2 mm. Se introdujo -2 mm de mineral en diferentes tamaños de riffles y se dividió en dos partes iguales, se repitió el procedimiento de riffling hasta que se logró el tamaño de muestra deseado para determinar el consumos de cianuro.

Ley de cabeza del mineral Esperanza:

$$\text{Cabeza ensayada de Au} = 0,88 \text{ g/t}$$

Tabla 3

Composición química típica de la muestra de mineral

g/t			%			
Au	Ag	Cu	Si	Ca	Fe	S
0,88	5,00	0,50	40,45	0,51	3,61	0,94

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 4

Minerales típicos contenidos en la alimentación.

Mineral	Formula Química
Cuarzo	SiO ₂
Hematita	Fe ₂ O ₃
Pirita	FeS ₂
Otros	Ca, Na, Mg, Al, etc.

Fuente: Elaboración Propia

3.4.3 Pruebas experimentales para determinar el consumo de cianuro

Durante el proceso de cianuración del mineral de oro de baja ley, se produce el consumo de los reactivos de NaCN y CaO, los resultados de consumo se dan en la tabla 7.

Condiciones de operación:

$$F[CN^-] = 1000 \text{ ppm}$$

$$pH = 10,5$$

$$Dilucion = 2$$

$$\% S = 33,33 \%$$

$$Granulometria = 100 \% m - 140$$

$$Velocidad \ de \ agitación = 64 \ rpm \ (Sistema \ de \ rodillos)$$

Procedimiento:

1. Preparación de muestra (muestreo, homogenización, cuarteo)
2. Determinar el % de humedad del mineral
3. Determinar el consumo de cal
4. Determinación del % de pureza de reactivos
5. Pesado de reactivos

6. Pesado de muestras (0,5 kg. Para cada botella)
7. Adición de agua (1 L)
8. Puesta en marcha

Se determinó el cianuro libre (ppm) cada hora durante, luego 24 y 48 horas (ver tabla 7).

Determinación del % de pureza del cianuro

$$ppm = \frac{kg\ CN^-}{m^3} \cdot 1000$$

Para:

$$[CN^-] = 1000\ ppm$$

$$V = 1\ L = 0,001\ m^3$$

$$Kg\ [CN^-] = \frac{1000 \cdot 0,001}{1000}$$

$$[CN^-] = 0,001\ kg$$

$$[CN^-] = 1\ g.$$

Se llevó una alícuota de 25 ml de solución preparada de CN^- a 1000 ppm y se tituló con nitrato de plata, el gasto fue de 19,5 ml.

$$F[CN^-] = Gasto \cdot Factor(\text{para } 25\ ml)$$

$$F[CN^-] = 19,5.50$$

$$F[CN^-] = 975 \text{ ppm}$$

Si:

$$1000 \text{ ppm} \rightarrow 100 \%$$

$$975 \text{ ppm} \rightarrow 97,5 \%$$

$$[C] = \frac{g \text{ Soluto} \cdot P}{V \text{ soluto}}$$

Reemplazando:

$$1000 \text{ ppm} = \frac{w \cdot (0,975)}{1000 \text{ ml}}$$

$$w \cdot (0,975) = (1000 \text{ ppm}) \cdot (1000 \text{ ml})$$

$$w \cdot (0,975) = 1000000 \text{ ppm} \cdot \text{ml}$$

$$= 1000000 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \cdot \text{ml} \cdot \frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ ml}} \cdot \frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}}$$

$$w = \frac{1 \text{ g}}{0,975}$$

$$w = 1,0256 \text{ g (Para } F[CN^-] \text{ a } 1000 \text{ ppm)}$$

3.4.4 Pruebas experimentales en columna

Se preparó un solo lote de muestra de mineral para usar en todos los experimentos de lixiviación. Aproximadamente 30 kg material grueso se redujo luego a un tamaño de menos una pulgada en una trituradora, luego se cuarteo, para lograr aproximadamente 10 kilos para cada columna, tamizando el material se obtiene (columna uno) C1: 90 % -malla 0,0125 m ($\frac{1}{2}$ ") y (columna dos) C2: 80 % -malla 0,00625 m ($\frac{1}{4}$ ").

Este material grueso se redujo luego a un tamaño de menos una pulgada en una trituradora *gyrotory*, y se recombino con el material que pasa.

Descripción

Se fabricaron dos tamaños de columnas en el laboratorio para las pruebas de lixiviación de minerales, de 0,102 m (4") de diámetro y 0,6 metros de altura. La columna de lixiviación está hecha de PVC y acero inoxidable. Tiene un tanque de solución de polietileno con un punto de muestra, válvulas y bomba de velocidad variable para regular fácilmente el flujo de la solución.

Todas las mangueras, tuberías, válvulas y columnas están construidas de PVC.

Las columnas de lixiviación están diseñadas para ser fáciles de usar y funcionales para probar la lixiviablez de los minerales para una posible recuperación de lixiviación en pilas de metales. La columna de 0,102 m (4") de diámetro es para pruebas de lixiviación en 0,0127 m (½") de mineral o más fina. Ambas columnas están equipadas con mangos de acero para ayudar a vaciar las columnas.

Los procedimientos de prueba de lixiviación en laboratorio incluyen los estudios de disolución de iones metálicos con cianuro. La columna de lixiviación simula los efectos de la lixiviación en pilas de un mineral en un entorno de laboratorio controlado, haciendo que la recolección de datos sea simple. Para eliminar cualquier efecto en las columnas de lixiviación de laboratorio, se debe cumplir con el tamaño máximo para cada diámetro de columna. La placa de drenaje de acero inoxidable también sirve para soportar la columna de rocas.

Una bomba peristáltica con tubería de PVC se utilizó para recircular la solución de lixiviación. Las muestras se pueden recolectar fácilmente de la solución de lixiviación para controlar la temperatura, concentración, densidad, extracción de metales preciosos y elementos indeseables.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados

4.1.1. Resultados del análisis granulométrico de la muestra

Tal como se observa en la tabla 5, una muestra de mineral que representa la distribución granulométrica de 90 % - malla 0.0125 m ($\frac{1}{2}$ "), proceden de las pilas de lixiviación fue separado por cuarteo. Las fracciones granulométricas obtenidas indican bajo la malla 108 las cantidades de finos están bajo el 14,6 %.

Tabla 5

Resultados del análisis granulométrico del mineral 440,4 g 90 % -malla 0,0125 m (1/2")

Malla	Tyler	Peso Retenido	Retenido	Passing
N°	Abertura um	(g)	(%)	(%)
1/2"	12700	42,9	9,7	90,3
1/4"	6350	36,5	8,3	82,0
8	2360	62,5	14,2	67,8
10	1680	73,9	16,8	51,0
14	1240	50,5	11,5	39,5
32	500	50,4	11,4	28,1
48	300	33,6	7,6	20,5
108	150	25,7	5,8	14,6
150	105	12,9	2,9	11,7
200	63	23,7	5,4	6,3
-200		27,8	6,3	0,0
Total		440,4	100	

Fuente: elaboración propia

En la figura 6, se muestra el mineral que representa la distribución granulométrica 80 % - malla 0,00625 m (1/4"), las cuales proceden de las pilas de lixiviación y fue separado por cuarteo. Las fracciones granulométricas obtenidas indican bajo la malla 108, las cantidades de finos están bajo el 14,2 %, no se incrementa respecto a la tabla 5.

Tabla 6

Resultados del análisis granulométrico del mineral 440,4 g 80 % -malla 0,00625 m (1/4")

Malla	Tyler	Peso Retenido	Retenido	Passing
N°	Abertura μm	(g)	(%)	(%)
1/4"	6350	90,4	20,5	79,5
4	4750	30,1	6,8	72,6
8	2360	54,4	12,4	60,3
10	1680	55,4	12,6	47,7
14	1240	38,5	8,7	39,0
32	500	40,9	9,3	29,7
48	300	24,6	5,6	24,1
108	150	43,7	9,9	14,2
150	105	10,2	2,3	11,9
200	63	20,7	4,7	7,2
-200		31,5	7,2	0,0
Total		440,4	100	

Fuente: elaboración propia

4.1.2. Determinación de consumo de NaCN y CaO en la cianuración

Durante el proceso de cianuración del mineral de oro de baja ley, produce el consumo de los reactivos de NaCN y CaO, los resultados de consumo se dan en la tabla 7. Los consumos se realizan empleando el sistema de lixiviación en botellas.

En la Tabla 7 se detallan los resultados metalúrgicos obtenidos en las condiciones descritas anteriormente.

Tabla 7

Pruebas de consumo de cianuro en botellas

Tiempo de agitación (horas)	pH	AgNO ₃ (mL)	F (CN) libre (ppm)	Cal (g)	NaCN (g)
0	11	0	1000	1,1	1,03
0,5	11	17,55	878	1,1	0,90
1	11	14,68	734	1,1	0,65
2	11	13,14	657	1,1	0,52
4	11	12,78	639	1,1	0,45
6	11	12,63	631	1,1	0,35
8	11	12,25	613	1,1	0,30
12	11	11,63	581	1,1	0,25
24	11	10,83	541	1,1	0,22
48	11	10,00	500	1,1	0,21

Fuente: elaboración propia

Como puede apreciarse, en la tabla 7, la fuerza de cianuro, la cal y el consumo de cianuro de sodio durante el proceso.

4.1.3. Pruebas experimentales de la cianuración

A continuación se observa las condiciones de operación de las pruebas de lixiviación en columna.

Tabla 8

Condiciones operacionales de las prueba de lixiviación

Ley de cabeza	0,88 g Au/t de mineral
Peso de muestra de mineral	9 400,0 g
Granulometría del mineral	90 % - malla 0,0125 m (1/2") y 80 % -malla 0,00625 m (1/4")
Concentración de cianuro	500 ppm
Peso de cal	2 g/t
pH de cianuración	10,5
Tiempo de cianuración	15 días
Oxígeno	5,0 (mg/L)
Nitrato de plata	0,1N

Tabla 9

Pruebas de lixiviación en columna 90 % -malla 0,0125 m (1/2")

EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE VARIABLES DEL PROCESO DE CIANURACIÓN - MOLLEPIÑA - PROVINCIA GRAU - APURIMAC

COLUMNA LIXIVIACIÓN: Chancado a 90 % -1/2"

Condiciones	
Muestra	: Mineral M1 Sedimentario
Peso de Muestra	: 9,4 kg
Densidad de Riego	: 10 L/ h-m ²
Flujo de Riego	: 10,0 cc/min.
Granulometría	: 90 % -1/2"

Cabeza Calculada		
	g/t	mg
Au	0,88	8,3
Ag	5,00	47,0

Consumo Total		
NaCN:	2,11	kg/t
Cal	: 0.41	kg/t

Fecha	:	03-sep-16
Número página	:	1
Lugar	:	Apurimac
Nivel	:	
Diámetro columna	:	0.1016 m
Altura de carga	:	0.8 m

Fecha	Tiempo Día	Solución de Riego						Solución Percolada				Contenido Metalico y Extraido							
		Vol. L	Cal viva g	pH	F CN Agregado ppm	Au mg/L *	Ag mg/L *	Vol. L	PH	AgNO3 cc	F CN Remanen. ppm	Consumo Acum. Kg/t NaCN	Cal	Au mg *	% Extrac. Parcial Au	% Extrac. acumulado Au	Ag mg *	% Extrac. Parcial Ag	% Extrac. acumulado Ag
03-sep-16	0	0,00	1,7	10,50	500											0,0			0,0
04-sep-16	1	2,35	0,0	10,00	500	2,57	7,07	1,45	10,00	9,8	300	0,13		3,83	46,29	46,3	9,99	21,26	21,3
05-sep-16	2	2,43	0,0	10,50	500	1,92	3,42	1,53	10,50	10,3	285	0,14		2,32	28,00	74,3	4,92	10,47	31,7
06-sep-16	3	2,28	0,0	10,50	500	0,19	1,86	1,38	10,50	10,3	210	0,16		0,27	3,23	77,5	2,10	4,47	36,2
07-sep-16	4	2,33	0,0	10,50	500	0,07	0,83	1,43	10,50	10,3	230	0,16		0,09	1,11	78,6	1,02	2,17	38,4
08-sep-16	5	2,28	0,0	10,50	500	0,07	0,81	1,38	10,50	10,3	255	0,15		0,07	0,86	79,5	0,93	1,98	40,3
09-sep-16	6	2,26	0,0	10,50	500	0,07	0,68	1,36	10,50	10,3	270	0,14		0,05	0,64	80,1	0,84	1,79	42,1
10-sep-16	7	2,34	0,0	10,50	500	0,04	0,65	1,44	10,50	10,3	260	0,15		0,06	0,67	80,8	0,75	1,60	43,7
11-sep-16	8	2,30	0,0	10,50	500	0,04	0,61	1,40	10,50	10,3	275	0,14		0,04	0,44	81,2	0,72	1,53	45,3
12-sep-16	9	2,29	0,0	10,50	500	0,04	0,56	1,39	10,50	10,3	285	0,14		0,04	0,43	81,7	0,68	1,45	46,7
13-sep-16	10	2,31	0,0	10,50	500	0,04	0,55	1,41	10,50	10,3	280	0,14		0,04	0,44	82,1	0,69	1,47	48,2
14-sep-16	11	2,36	0,0	10,50	500	0,01	0,54	1,46	10,50	10,3	280	0,14		0,02	0,22	82,3	0,67	1,43	49,6
15-sep-16	12	2,37	0,0	10,50	500	0,01	0,52	1,47	10,50	10,3	305	0,13		0,02	0,23	82,6	0,67	1,43	51,0
16-sep-16	13	2,37	0,0	10,50	500	0,01	0,52	1,47	10,50	10,3	320	0,13		0,02	0,23	82,8	0,67	1,43	52,4
17-sep-16	14	2,35	0,0	10,50	500	0,01	0,52	1,45	10,50	10,3	315	0,13		0,02	0,22	83,0	0,63	1,34	53,8
18-sep-16	15	2,57	0,0	10,50	500	0,01	0,51	1,67	10,50	10,3	330	0,13		0,02	0,25	83,3	0,70	1,49	55,3

Peso del mineral	9,40	Kg		
ley Au	0,88	g/Tm	C Met	8,27 mg
ley Ag	5,00	g/Tm	C Met	47,0 mg
		%		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 10

Pruebas de lixiviación en columna 80 % - malla 0,00625 m (1/4")

EVALUCIÓN Y ANÁLISIS DE VARIABLES DEL PROCESO DE CIANURACIÓN - MOLLEPIÑA - PROVINCIA GRAU - APURIMAC

COLUMNA LIXIVIACIÓN: Chancado a 80% -1/4"

Condiciones	
Muestra	: Mineral M1 Sedimentario
Peso de Muestra	: 9,4 kg
Densidad de Riego	: 10 L/ h-m ²
Flujo de Riego	: 10,0 cc/min.
Granulometría	: 80 % -1/4"

Cabeza Calculada		
	g/t	mg
Au	0,88	8,3
Ag	5,00	47,0

Consumo Total		
NaCN:	2,30	kg/t
Cal	: 0.41	kg/t

Fecha	:	03-sep-16
Número página	:	1
Lugar	:	Apurimac
Nivel	:	
Diámetro columna	:	0.1016 m
Altura de carga	:	0.8 m

Fecha	Tiempo Día	Solución de Riego						Solución Percolada					Contenido Metalico y Extraído							
		Vol. L	Cal viva g	pH	F CN' Agregado ppm	Au mg/L *	Ag mg/L *	Vol. L	PH	AgNO3 cc	F CN' Remanen. ppm	Consumo NaCN	Acum. Kg/t Cal	Au mg *	% Extrac. Parcial Au	% Extrac. acumulado Au	Ag mg *	% Extrac. Parcial Ag	% Extrac. acumulado Ag	
03-sep-16	0	0,00	1,7	10,50	500															
04-sep-16	1	2,35	0,0	10,00	500	2,57	7,07	1,45	10,00	9,8	300	0,15		3,73	45,05	45,0	10,25	21,81	21,8	
05-sep-16	2	2,43	0,0	10,50	500	1,92	3,42	1,53	10,50	10,3	285	0,16		2,94	35,51	80,6	5,23	11,13	32,9	
06-sep-16	3	2,28	0,0	10,50	500	0,19	1,86	1,38	10,50	10,3	210	0,17		0,26	3,17	83,7	2,57	5,46	38,4	
07-sep-16	4	2,33	0,0	10,50	500	0,07	0,83	1,43	10,50	10,3	230	0,17		0,10	1,21	84,9	1,19	2,53	40,9	
08-sep-16	5	2,28	0,0	10,50	500	0,07	0,81	1,38	10,50	10,3	255	0,16		0,10	1,17	86,1	1,12	2,38	43,3	
09-sep-16	6	2,26	0,0	10,50	500	0,07	0,68	1,36	10,50	10,3	270	0,15		0,10	1,15	87,3	0,92	1,97	45,3	
10-sep-16	7	2,34	0,0	10,50	500	0,04	0,65	1,44	10,50	10,3	260	0,16		0,06	0,70	88,0	0,94	1,99	47,3	
11-sep-16	8	2,30	0,0	10,50	500	0,04	0,61	1,40	10,50	10,3	275	0,15		0,06	0,68	88,6	0,85	1,82	49,1	
12-sep-16	9	2,29	0,0	10,50	500	0,04	0,56	1,39	10,50	10,3	285	0,15		0,06	0,67	89,3	0,78	1,66	50,7	
13-sep-16	10	2,31	0,0	10,50	500	0,04	0,55	1,41	10,50	10,3	280	0,15		0,06	0,68	90,0	0,78	1,65	52,4	
14-sep-16	11	2,36	0,0	10,50	500	0,01	0,54	1,46	10,50	10,3	280	0,15		0,01	0,18	90,2	0,79	1,68	54,1	
15-sep-16	12	2,37	0,0	10,50	500	0,01	0,52	1,47	10,50	10,3	305	0,15		0,01	0,18	90,3	0,76	1,63	55,7	
16-sep-16	13	2,37	0,0	10,50	500	0,01	0,52	1,47	10,50	10,3	320	0,14		0,01	0,18	90,5	0,76	1,63	57,3	
17-sep-16	14	2,35	0,0	10,50	500	0,01	0,52	1,45	10,50	10,3	315	0,14		0,01	0,18	90,7	0,75	1,60	58,9	
18-sep-16	15	2,57	0,0	10,50	500	0,01	0,51	1,67	10,50	10,3	330	0,15		0,02	0,20	90,9	0,85	1,81	60,7	

Peso del mineral	9,40	Kg		
lev Au	0,88	g/Tm	C Met	8,27 mg
lev Ag	5,00	g/Tm	C Met	47,0 mg
		%		

Fuente: Elaboración propia

4.2. Discusiones

4.2.1. Resultados del análisis granulométrico de la muestra

En la tabla 5 y 6, tenemos la distribución granulométrica diferente para cada prueba metalúrgica: 90 % - malla 0,0125 m ($\frac{1}{2}$ ") y 80 % -malla 0,00625 m ($\frac{1}{4}$ ") en estas distribuciones se ve claramente la diferencia de los retenidos en cada malla, y que más importante el porcentaje de finos es mucho mayor para prueba con malla 0,00625 m ($\frac{1}{4}$ ") llegando al 14 % pasante, lo que indica que se usará mayor contenido de cemento en el proceso de aglomeración.

4.2.2. Determinación de consumo de NaCN y CaO en la cianuración

La mejor forma de determinar el consumo de reactivos es la lixiviación en botellas, se puede observar en la tabla 7, los tiempos de permanecía de cada botella considerando tiempos de 1/2 hora hasta las 48 horas, como se va alterando el mineral y la fuerza cianuro libre cada vez es menor en función tiempo.

4.2.3. Pruebas experimentales de la cianuración

La tabla 9 y 10, presentan los resultados de las pruebas metalúrgicas de la cianuración en columnas considerando el principal parámetro que es la granulometría de 0,0125 m (1/2") y 0,00625 m (1/4")

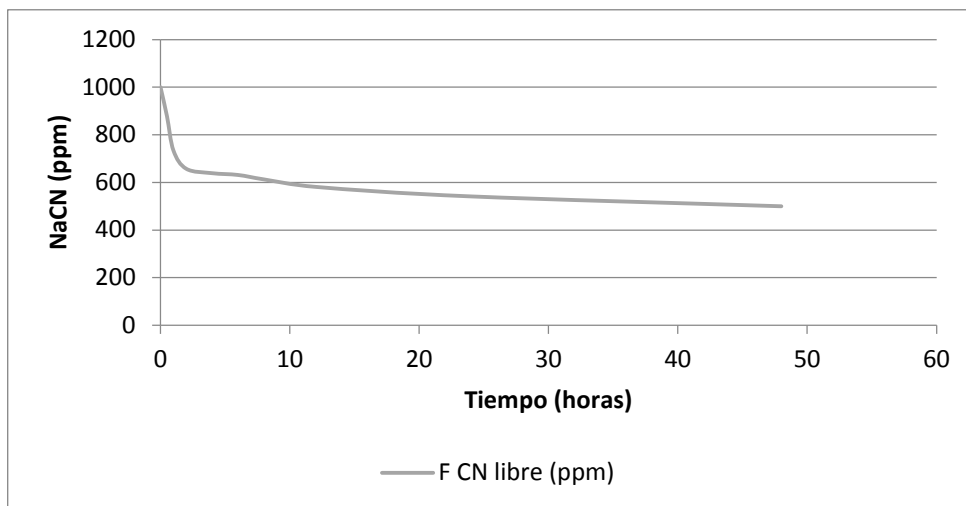


Figura 20. Consumo de cianuro vs tiempo acumulado
Fuente: elaboración propio

En la figura 20 se ve claramente cómo el mineral reacciona y se inicia el consumo de cianuro libre de la solución lixivante en función tiempo, dando lugar a la disolución de metales, con la disolución de oro y plata

Extracción vs Tiempo

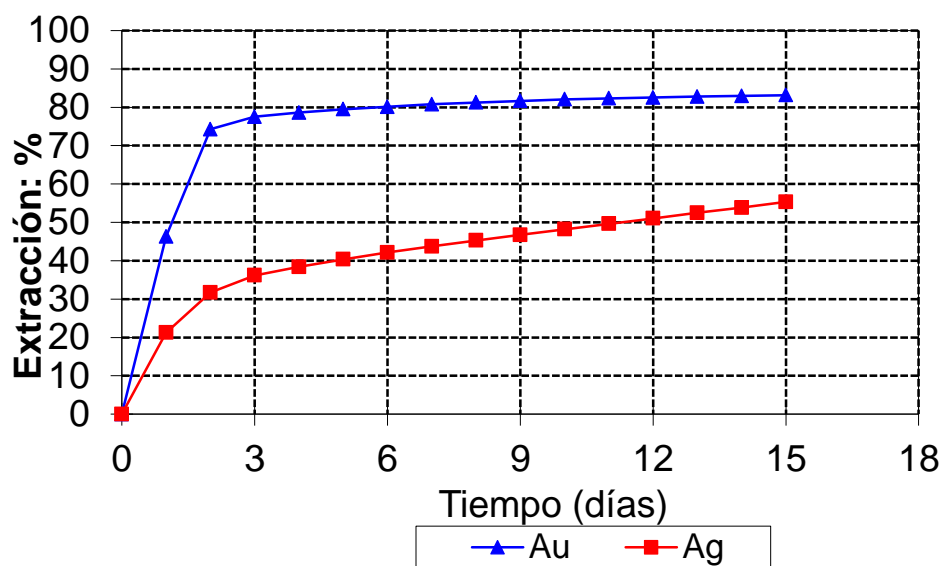


Figura 21. Extracción del Au y Ag: mineral 90 % -malla 0,0125m (1/2")
Fuente: elaboración propio

La figura 21 presenta los resultados de las pruebas de cianuración del mineral 90 % -malla 0,0125 m (1/2"), obteniéndose los resultados óptimos en las siguientes condiciones de operación: cianuro 0,2 g/L y un pH igual a 10,5, lo cual permite una extracción del 83,2 % de oro y 55,3 % de plata

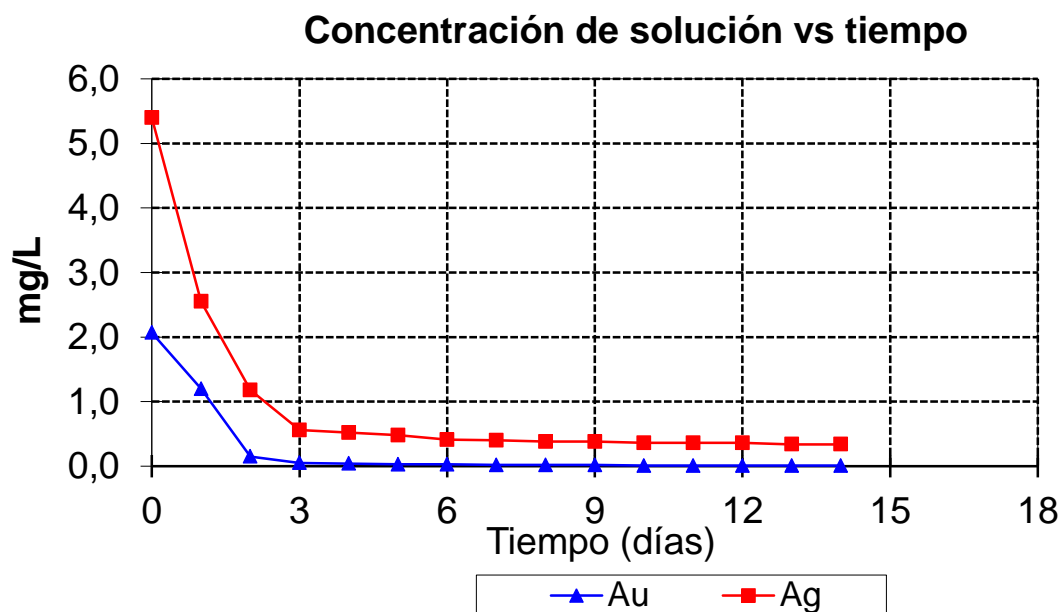


Figura 22. Disolución del Au y Ag: **mineral 90 % -malla 0,00125 m (1/2")**
 Fuente: elaboración propio

La figura 22 presenta los resultados de las pruebas de cianuración del mineral 90 % -malla 0,0125m (1/2"), obteniéndose los resultados adecuados en las siguientes condiciones de operación: cianuro 0,5 g/L y un pH igual a 10,5, lo cual permite obtener las mayores disoluciones las primeras 24 horas llegando 2,07 g/L de oro y 5,40 g/L de plata.

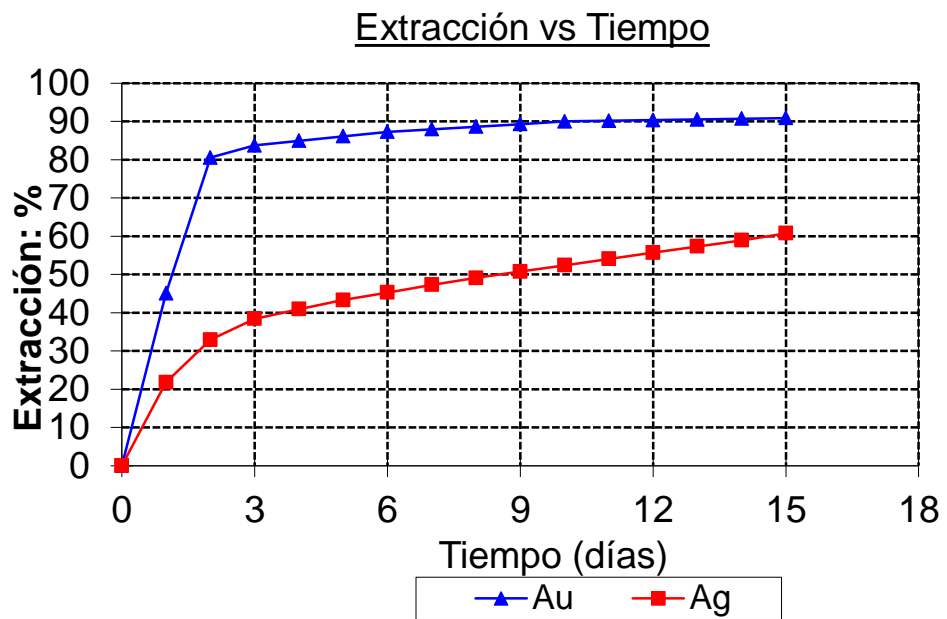


Figura 23. Extracción del Au y Ag: **mineral 80% -malla 0,00625 m (1/4")**
Fuente: Elaboración Propia

La figura 23 presenta los resultados de las pruebas de cianuración del **mineral 80% -malla 0,00625 m (1/4")**, obteniéndose los resultados óptimos en las siguientes condiciones de operación: cianuro 0,2 g/L y un pH igual a 10,5, lo cual permite una extracción del 90,9 % de oro y 60,7 % de plata.

Concentración de solución vs tiempo

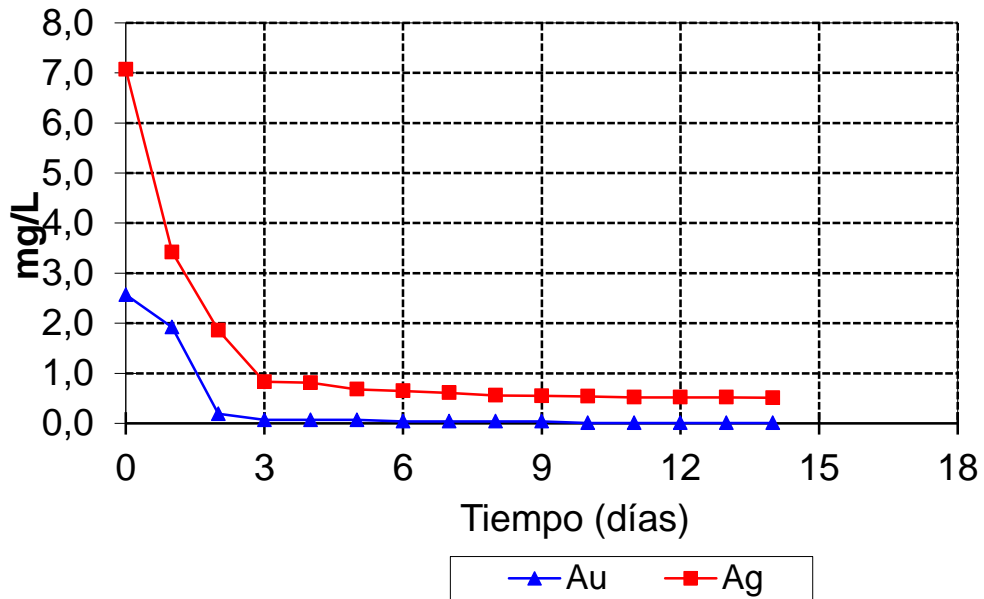


Figura 24. Disolución del Au y Ag: **mineral 80 % -malla 0,00625 m (1/4")**
Fuente: Elaboración Propia

La figura 24 presenta las disoluciones de las pruebas de cianuración del **mineral 80% -malla 0,00625 m (1/4")**, obteniéndose los resultados adecuados en las siguientes condiciones de operación: cianuro 0,5 g/L y un pH igual a 10,5, lo cual permite obtener las mayores disoluciones las primeras 24 horas llegando 2,57 g/L de oro y 7,07 g/L de plata.

CONCLUSIONES

Los resultados de las pruebas permiten la factibilidad de tratar los minerales mixtos auríferos de oro en la minera J.J. Inversiones Mineras S.A.C.-Abancay.

El consumo de reactivos para el mineral aurífero de la zona que contienen promedio de oro de 0,88 g/t y plata 5 g/t, son de 2,3 kg/t de NaCN y de 1,7 kg/t de CaO.

El mineral aurífero en óxidos presenta alto porcentaje de recuperación de oro (90,9 %), a una granulometría **80% -malla 0,0625 m (1/4")**, en un tiempo de lixiviación de 15 días. Por lo tanto, es un mineral que se puede procesar por cianuración para recuperar oro en la zona.

La recuperación de plata es del 60,7 %, y es probable que requiera mayor tiempo de lixiviación para aumentar la recuperación de plata en ambas pruebas de diferente tamaño granulometría.

RECOMENDACIONES

Hacer pruebas piloto de cianuración en pilas para validar las variables obtenidas en columna o bien simular el proceso para determinar la recuperación de oro adecuada.

Continuar con pruebas de agitación en botellas cuando se requiera o se tenga otro tipo de mineral.

Realizar pruebas con otros reactivos que se tiene en el mercado para la lixiviación de minerales auríferas para realizar la comparación de % de recuperación y costos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Afenya, P. (1991). Treatment of Carbonaceous Refractory Gold Ores.
Mineral Engineerin.

Ballester-Verdeja-Sancho (2000). Metalurgia extractiva, fundamentos.
Editorial Síntesis. Madrid. España.

Cárdenas R., A, (1993). Metalurgia Extractiva del Oro, Ed. Imral Ltda.,
Oruro-Bolivia.

Domic, E. M, (2001). "Hidrometalurgia, fundamentos, procesos y
aplicaciones," Domic, Chile.

Edelstein, Daniel L., (2010), "Copper", U.S. Geological Survey, Mineral
Commodity Summaries.

Fathi Habashi, (1993) "Métallurgie extractive", Québec,
Enr., Technology & Engineering

Habashi Fathi, (1999) "Hydrometallurgy", 2ª edición, Universidad de
Laval, Quebec, Canadá.

Misari, Ch., Fidel Sergio, (1993). "Metalurgia del Oro", Volumen I y II,
Primera Edición, editorial Litoral, Lima-Perú.

Oscar Benavente. (2004) Proceso Lixiviación Antofagasta, Universidad Católica del Norte, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Departamento de Ingeniería Metalúrgica.

Tecsup (2010). Metalurgia Extractiva del Oro. Convenio de Cooperación Técnica. 37. Vargas Gallardo, Juan, (1995). Metalurgia del Oro y la Plata, Editorial San Marcos, Lima-Perú

Van Arsdale, D. George, "Hidrometalurgia de Metales Comunes", 1ª edición, México. Unión Tipográfica, Editorial Hispano Americana 1965.