

# Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión

Fundada en 1968 Decreto Ley N° 17358



Facultad de Ingeniería Química y  
Metalúrgica

**ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA METALÚRGICA**

**TESIS:**

**EVALUACION DEL PROCESO PRODUCTIVO  
DE ORO POR CIANURACION Y LIXIVIACION  
EN LA PLANTA PILOTO TULIN, NAZCA,  
2017**

**PARA OBTENER EL TITULO DE INGENIERO METALÚRGICO.**

AUTOR

**SORIA CACHA, MOISES ROCAEL**

ASESOR

**DR. RUIZ SANCHEZ, BERARDO BEDER**

**D.N.Q. N° 542**

Huacho – Perú

**2018**

## **DEDICATORIA**

A mi familia, mis padres por su esfuerzo y dedicación hacia mi persona y que siempre creyeron en mí.

### **AGRADECIMIENTOS:**

Agradezco a Dios por permitirme vivir día a día y haber hecho realidad mi Vocación Profesional.

Mi Agradecimiento a todos los docentes de la UNJFSC y especialmente a los de la EAP de Ingeniería Metalúrgica por sus consejos y recomendaciones

## **Pensamiento**

El hombre que ha empezado a vivir seriamente por dentro, empieza a vivir más sencillamente por fuera.

**Ernest Hemingway**

## INDICE

Resumen.....	8
Introducción.....	9

### CAPITULO I ASPECTOS GENERALES

1.1. Problema de investigación.....	11
1.2. Justificación.....	12
1.3. Objetivos.....	13
1.3.1. Objetivo general.....	13
1.3.2. Objetivo Especifico.....	13
1.4. Ámbito de estudio.....	14
1.5. Importancia del estudio.....	14
1.6. Hipótesis.....	15
1.6.1. Hipótesis general.....	15
1.6.2. Hipótesis específicos.....	15

### CAPITULO II MARCO REFERENCIAL

2.1. Marco teórico.....	16
2.1.1. El mineral de oro.....	16
2.1.2. Tipos de depósitos auríferos.....	16
2.1.3. Minerales de oro.....	17
2.1.4. Propiedades físicas.....	18
2.1.5. Propiedades químicas.....	18
2.1.6. El oro al estado natural y sus procesos.....	19
2.1.6.1. Concentración gravimétrica.....	21
2.1.6.2. Fundamentos de flotación.....	26

2.1.6.3. Carbón activado.....	27
2.1.7. Lixiviación.....	28
2.1.7.1. Cianuro.....	29
2.1.7.2. Fundamentos de cianuración.....	31
2.1.8. Proceso de refinación.....	33
2.1.9. Tostación.....	34
2.2. Minería artesanal y pequeñas minerías.....	35
2.3. Relaves auríferos.....	36

### CAPITULO III METODOLOGIA

3.1. Caracterización mineralógica.....	37
3.1.1. Datos composicionales y mineralógicas.....	37
3.1.2. Datos Geométricos.....	38
3.1.3. Datos cuantitativos.....	39
3.2. Muestreo del material.....	40
3.2.1. Preparación del material muestreado.....	40
3.2.2. Trituración.....	41
3.2.3. Homogenización y cuarteo.....	41
3.3. Caracterización del mineral.....	42

### CAPITULO IV RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Detalle experimental.....	43
4.1.1. Cianuración.....	43
4.1.2. Características de la muestra y materiales.....	45

4.1.3. Efecto del tamaño de la partícula.....	47
4.1.4. Efecto de la concentración de cianuro.....	48
4.2. Resultados.....	49
4.3. Recuperación de oro mediante cementación con zinc.....	50
4.3.1. Factores que afectan la precipitación de oro con el cinc.....	53
4.4. Recuperación de oro mediante electrodeposición.....	54
Conclusiones.....	60
Bibliografía.....	62

## RESUMEN

El objetivo del presente trabajo de investigación es ofrecer a mineros artesanales, pequeños mineros y otros interesados, una importante información que les permita desarrollar a nivel experimental, el proceso de cianuración, favoreciendo de esta manera, llenar el vacío que existe sobre esta clase de trabajos, teniendo en cuenta la gran importancia del proceso experimental, el cual debe de ser desarrollado desde el inicio de la exploración y terminar con el fin de la explotación del yacimiento, con la finalidad de modificar o mejorar los métodos empleados y hacerlos más eficientes y económicos, evitando de esta manera los fracasos que son frecuentes en la minería peruana, para dar la debida importancia a la Investigación y experimentación minero metalúrgica.

El mineral en estudio es procedente de yacimientos ubicados en la Región Ica, en la Provincia de Nazca Distrito de El Ingenio, donde el oro y otros elementos valiosos se presentan en forma de inclusiones en la ganga; tiene tamaños promedio de 0.02 mm., su contenido metálico es de 1 a 2 gr./Tc de oro.

En las metodologías adoptadas, el trabajo experimental está dividido en dos partes una primera parte denominada pruebas de diagnóstico que se hace con la finalidad de ver si el mineral propuesto obedece al proceso, la segunda parte es a escala de laboratorio, que se realiza en columnas con 20 kilos de mineral, tomando variables establecidas en la prueba de diagnóstico con la única diferencia que la granulometría es mayor que en la primera etapa.

El presente estudio además de dar las pautas necesarias para llevar adelante el proceso de cianuración a nivel experimental, demuestra que es factible metalúrgicamente el proceso para el mineral en estudio, y que puede ser aplicado en el tratamiento de grandes cantidades de mineral haciendo los ajustes necesarios de las variables establecidas en la etapa experimental.

Los ensayos experimentales se desarrollarán a escala de laboratorio.

Palabras claves: Cianuración, biolixiviación , minerales auríferos.

## ABSTRAC

The objective of this research work is to offer artisanal miners, small-scale miners and other interested parties, an important information that allows them to develop, at an experimental level, the cyanidation process, favoring in this way, filling the gap that exists on this kind of work. , taking into account the great importance of the experimental process, which must be developed from the beginning of the exploration and finish with the end of the exploitation of the deposit, in order to modify or improve the methods used and make them more efficient and economical , avoiding in this way the failures that are frequent in the Peruvian mining, to give due importance to the metallurgical mining research and experimentation.

The mineral under study comes from deposits located in the Ica Region, in the Nazca Province District of El Ingenio, where gold and other valuable elements are presented in the form of inclusions in the gangue; It has average sizes of 0.02 mm., its metallic content is from 1 to 2 gr./Tc of gold.

In the methodologies adopted, the experimental work is divided into two parts, a first part called diagnostic tests that are done in order to see if the proposed mineral obeys the process, the second part is on a laboratory scale, which is done in columns with 20 kilos of mineral, taking variables established in the diagnostic test with the only difference that the granulometry is greater than in the first stage.

The present study in addition to giving the necessary guidelines to carry out the process of cyanidation at experimental level, demonstrates that it is feasible metallurgically the process for the mineral under study, and that it can be applied in the treatment of large quantities of mineral making the necessary adjustments of the variables established in the experimental stage.

The experimental tests will be developed on a laboratory scale.

Keywords: Cyanidation, bioleaching, gold minerals.

## INTRODUCCIÓN

El Departamento de Ica en lo referente a la minería del Oro y la plata es muy grande ya que existen reservas apreciables que van desde relaves hasta minerales de buena ley, para la extracción se utilizan diferentes métodos, las mismas que fueron utilizados en la época del incanato, de los españoles, etc. muchas de estas técnicas se siguen usando por ejemplo la concentración magnética, concentración gravimétrica, la amalgamación, cianuración etc. En la actualidad el tratamiento de minerales de oro requiere de técnicas especiales, es decir se deben hacer seguimientos complejos, por lo que los metalurgistas tenemos la necesidad de desarrollar nuevos métodos de procesamiento, aplicar los ya conocidos. Así, dependiendo de la mineralogía, reservas, ley, topografía, clima, ubicación y la naturaleza de la distribución del oro dentro del mineral.

La minería artesanal tiene una gran necesidad de aplicar nuevas técnicas de procesamiento, de esta forma lograr una mejor recuperación, pero se debe incidir en una recuperación limpia cuidando principalmente los efectos de la contaminación.

Entre esos problemas ocupan un lugar preponderante, los de carácter metalúrgico, cuya resolución deberá de comenzar a estudiarse desde la etapa de la exploración del yacimiento y no terminar sino hasta que prácticamente se han agotado los minerales, ya que aún teniendo la planta metalúrgica en operación, siempre será posible mejorar o modificar el tratamiento con el fin de hacer lo más económico o más eficiente. Es evidente que entre las causas que con mayor frecuencia provocan fracasos en la industria Minero-Metalúrgica se encuentra el desconocimiento del sistema de beneficio o tratamiento metalúrgico adecuado de los minerales cuya explotación se plantea.

Por lo anterior se requiere de la investigación Metalúrgica, antes de proyectar una planta de beneficio y como ya se ha indicado, aún ya en operación es indispensable seguir la experimentación para aprovechar nuevos reactivos, nuevos

equipos, así como para estudiar el comportamiento de los diferentes minerales que presentan los yacimientos en los diversos horizontes, es decir la investigación Metalúrgica es necesaria durante toda la vida de la planta, ya que elimina una de las principales causas de fracaso y permite aumentar de manera considerable los rendimientos económicos y la eficiencia del tratamiento.

# CAPITULO I

## ASPECTOS GENERALES

### 1.1. PROBLEMA DE INVESTIGACION

Si bien el método de extracción de oro y plata más importante y empleado en la actualidad es la cianuración, no siempre es posible aplicarlo exitosamente en forma directa si no se tiene en cuenta las características del mineral o concentrado.

En nuestro país la mayoría de los recursos minerales se explotan sin tener un conocimiento preciso del depósito (mineralogía, asociaciones de minerales al oro, grado de liberación etc), lo que genera bajas recuperaciones y pérdida productiva del depósito.

Las dificultades en el tratamiento por cianuración se presentan principalmente en minerales en que el oro está finamente diseminado en minerales sulfurados, sea que este se presente como oro libre o como oro encapsulado. La sola presencia de sulfuros de hierro y de metales base, de minerales de arsénico, antimonio, bismuto, etc. hacen difícil su tratamiento por cianuración convencional.

Nagy, establece que para que el oro se disuelva completamente en soluciones alcalinas de cianuro, se deben satisfacer ciertos requerimientos, tales como:

- El oro debe estar como partículas discretas y limpias.
- Deben estar ausentes de impurezas que puedan inhibir la reacción.
- Se debe disponer de un adecuado suministro de oxígeno.
- Hasta donde concierne al segundo requerimiento, muchas minas de oro poseen constituyentes que se descomponen en soluciones de cianuro lo que ocasiona la aparición de compuestos, en solución, que pueden inhibir la reacción de disolución del oro.

## **DEFINICION DEL PROBLEMA**

¿Es posible un estudio metalúrgico del proceso de cianuración para mejorar y recuperar minerales de oro y plata utilizados en la minería artesanal?

### **1.2. JUSTIFICACION**

Aunque los procesos de la extracción de oro y plata no han cambiado fundamentalmente desde la introducción de las técnicas de cianuración ya hace cerca de un siglo, en los últimos 50 años se han visto grandes cambios en los métodos utilizados, estos cambios los que de alguna u otra manera ha permitido la elaboración de este trabajo.

La lixiviación se ha convertido en el proceso más utilizado para minerales de baja ley en la industria minero-metalúrgica, el cianuro ha tomado un papel muy importante debido a que reacciona fácilmente con los metales preciosos, los procesos para la recuperación de oro y plata son adsorción con carbón activado y cementación de oro con zinc (Merrill-Crowe), la extracción del oro por medio de técnicas metalúrgicas tales como el proceso de adsorción con carbón activado, constituye un ejemplo de los cambios surgidos para tales propósitos, pero el proceso de cementación con zinc sigue siendo el más utilizados, estos procesos son presentados en este trabajo.

Ambientalmente las formas de cianuro libre (HCN y CN), no son generalmente detectables en efluentes mineros, la preocupación por la toxicidad de los efluentes radica en las formas complejas de cianuro y la posibilidad de romperse y generar cianuro libre en el nuevo sistema, esta solución de cianuro se debe de manejar con cierto cuidado mediante soluciones diluidas durante todo el proceso generalmente entre el 0.01% a 0.05% de cianuro (100 a 500 partes por millón) y mantener un pH entre 10.5 a 11.5 para mantener un ambiente alcalino en la solución evitando que se forme una gran cantidad de cianuro de hidrógeno (ácido cianhídrico), el cual es sumamente contaminante.

Después de haber extraído el oro por medio del proceso hidrometalúrgico, el cianuro puede estar presente como cianuro libre, cianuro débilmente complejado y cianuro fuertemente complejado, los procesos que se emplean para el tratamiento del cianuro restante en la solución, son la degradación natural, oxidación química, precipitación y biodegradación, los cuales nos sirven para disminuir así la contaminación al ambiente.

En el trabajo presentamos información sobre el cianuro, su uso en la industria, las diferentes formas en las que se encuentra el cianuro (cianuro total), los diferentes procesos que hay para la recuperación de oro y plata, así como los principales métodos de degradación de cianuro y finalmente el manejo de algunos riesgos de cianuro en la industria minero metalúrgica, se pretende que este escrito sirva como una guía y resulte de mucha importancia no solo para éste caso en particular sino para quienes se interesen en la aplicación de las técnicas descritas.

### **1.3. OBJETIVOS**

#### **1.3.1. Objetivo General**

Establecer el estudio metalúrgico de minerales oro y plata del sector Tulin, Región Ica a fin de obtener un proceso productivo óptimo.

#### **1.3.2. Objetivos específicos**

Describir las propiedades del mineral que se tratara en la cianuración por diferentes procesos

Evaluar el proceso productivo, fundamentalmente en las características de la solución, el contenido de oro y plata, con la finalidad de que este proceso sea metalúrgicamente eficiente al más bajo costo

Presentar las principales técnicas para la lixiviación y recuperación de oro que se utilizan en la actualidad.

#### **1.4. AMBITO DE ESTUDIO**

El mineral en estudio es procedente de yacimientos ubicados en la Región Ica, en la Provincia de Nazca, Distrito de El Ingenio, donde el oro y otros elementos valiosos se presentan en forma de inclusiones en la ganga; tiene tamaños promedio de 0.01 mm., su contenido metálico es de 1 a 2 gr. /Tc de oro.

Además nuestro país cuenta con innumerables depósitos auríferos primarios (FILONEANOS) y secundarios (PLACERES), que se caracterizan por ser de baja ley y cuya explotación para ser rentable requiere del movimiento de grandes volúmenes de material con equipos e instalaciones costosas. Por otra parte existen minerales de desmonte y relaves que contienen elementos valiosos susceptibles de ser recuperados. Por esto se propone, estudiar y desarrollar un método adecuado para la recuperación del oro, empleando la técnica de lixiviación por cianuración seguido de un precipitado con zinc o carbón activado.

#### **1.5. IMPORTANCIA DEL ESTUDIO**

El Perú para salir de la crisis económica actual necesita una mayor captación de recursos para aumentar el ingreso de divisas, por lo que se hace imperativo, explotar nuestros depósitos mineros con técnicas eficientes.

El precio de los minerales en especial de la plata como del oro, metal precioso que generalmente se presenta asociado a la plata, es uno de los mejores incentivos para la explotación de estos minerales por parte del minero artesanal, pequeño minero. Además debido a la importancia de estos minerales como material estratégico que garantiza la solvencia fiscal del país con la circulación de la moneda, se hace

necesario incentivar su producción, por este motivo el método de lixiviación por cianuración en montones es importante, ya que en nuestro país existen depósitos minerales que no se pueden tratar económicamente por los métodos tradicionales por el alto costo de operación y equipos.

No obstante, es necesario recalcar que este trabajo se refiere a una mínima cantidad de mineral; por este motivo el principal objetivo, es de llevar más adelante el estudio de este proceso con cantidades más importantes de mineral y llegar de esta manera a conclusiones positivas más generales. Por lo tanto estos trabajos tienen como meta presentar resultados perfectamente definidos antes de pasar a la escala industrial. Pero todas estas metas están acondicionadas por el factor económico que demandan los estudios, lo que difícilmente se llega a las metas esperadas, por la falta de interés y de confianza de parte del minero de hacer la inversión necesaria en los estudios experimentales.

## **1.6. HIPOTESIS**

### **1.6.1. Hipótesis general**

Mediante un estudio metalúrgico detallado y práctico se establecerá el comportamiento del cianuro para los diferentes minerales que utilizan los mineros artesanales como materia prima.

### **1.6.2. Hipótesis específicos**

Se determinará el grado de molienda del mineral para liberar el oro en estado libre.

Nos permitirá determinar la cinética de cianuración del mineral (tiempo de residencia), la concentración adecuada de cianuro, el consumo de cianuro y cal requeridos en el proceso.

## **CAPITULO II**

### **MARCO REFERENCIAL**

#### **2.1. MARCO TEORICO**

##### **2.1.1. EL MINERAL DE ORO**

El oro, como metal precioso ha concitado el interés humano porque este metal ha sido empleado principalmente con fines decorativos y monetarios.

El oro se presenta en la naturaleza en estado nativo y combinado con otros elementos metálicos. El oro nativo generalmente está aleado con plata, la cual puede alcanzar hasta un 39%; igualmente, contiene a menudo pequeñas cantidades de cobre y hierro y a veces plomo, bismuto y mercurio.

El oro es susceptible de existir en cercanías geológicas relativamente variadas (rocas sedimentarias, vetas intra plutónicas o peri plutónicas). El oro es químicamente inerte en ambientes naturales y es poco afectado durante el intemperismo y descomposición de la roca que lo contiene.

##### **2.1.2. TIPOS DE DEPÓSITOS AURÍFEROS**

Existen muchas clasificaciones de depósitos, a continuación mostramos la hecha por Boyle (1979), que distingue 10 tipos de depósitos auríferos:

- Diques auríferos porfídicos, sills, y stocks, pegmatitas auríferas, cuerpos graníticos escasamente veteados; aplitas y albititas.
- Cuerpos carbonatados o relativamente carbonatados.
- Depósitos auríferos tipo skarn.
- Placeres de oro-plata y plata-oro, diaclasas mineralizadas, mineralizaciones hacia abajo y cuerpos irregulares solidificados en fracturas, fallas y zonas.

- Placeres auríferos, fisuras mineralizadas, zonas de encapes, venas estratificadas en fallas y fracturas.
- Placeres de oro-plata y plata-oro, diaclasas mineralizadas, stockworks y zonas solidificadas en un ambiente geológico complejo con rocas sedimentarias, volcánicas y varios tipos de rocas intrusivas y graníticas.
- Depósitos diseminados y tipo stockworks oro-plata, en rocas ígneas, volcánicas y sedimentarias.
- Depósitos de oro en conglomerados de cuarzo y cuarcitas.
- Placeres aluviales y eluviales.
- Otras fuentes de oro que contienen sulfuros cupríferos, arseniuros, seleniuros y sulfosales, además de otros metales.

### **2.1.2. MINERALES DE ORO**

El oro se encuentra en estado nativo comúnmente y se puede presentar en venas y filones de cuarzo, en este cuadro se ubican los diseminados.

El oro se encuentra también en placeres y depósitos aluviales de corrientes antiguas y modernas.

El oro nativo de zonas de oxidación y de los placeres frecuentemente contiene plata en pequeñas proporciones así como otros metales.

El oro nativo puede ser Oro limpio, oro empañado, oro revestido, electrum, oro cuprífero.

El oro en otros minerales, como producto secundario, con las especies de cobre, plata, plomo, arsénico y antimonio

El oro asociado a la piritita y a la arsenopiritita, se presenta como solución sólida y oro extremadamente fino, también se encuentra como ampolla de inclusiones, micro venillas, rellenos de intersticios, emplazamientos etc.

El tamaño del grano de oro es determinante en el proceso metalúrgico elegido, se divide por el tamaño en Oro grueso que viene a ser el oro aluvial en forma de pepitas, el oro filoniano en forma de escamas o hilos, hasta un tamaño no menor a 0.2 mm. El denominado oro fino sería un rango de tamaños del oro grueso y el oro ultra fino, estaría entre 0.2 mm (200 micrones) y los 10 micrones, quedando el denominado oro ultra fino que estaría libre o encapsulado menor a 10 micrones.

El tratamiento de los minerales de oro se basa fundamentalmente en las propiedades del oro, su alto peso específico, su carácter hidrofóbico y su solubilidad en soluciones cianuradas dando lugar a varios esquemas de tratamiento metalúrgico para recuperar el oro.

#### **2.1.4. PROPIEDADES FÍSICAS**

El oro, es un metal amarillo brillante por la luz reflejada, en láminas muy delgadas. Es el más maleable y dúctil de todos los metales. En estado puro es demasiado blando para ser usado en joyería y para acuñar moneda, por lo que se alea siempre para tales fines con plata o cobre. Su punto de fusión es de 1073°C y la volatilización 2600°C. El peso atómico es 197.2, respectivamente. La densidad del oro es de 19,42. Es más liviano a medida que contiene mayor proporción de plata. Cristaliza en el sistema cúbico. El oro se alea con plata, cobre, paladio y otros metales. La cantidad de oro en estas aleaciones se expresa generalmente en quilates. El oro puro es de 24 quilates.

#### **2.1.5. PROPIEDADES QUÍMICAS**

- El oro es fácilmente soluble en agua regia, que produce cloro naciente.
- El oro se disuelve en ácido clorhídrico en presencia de sustancias orgánicas.
- El oro es disuelto por cloruros férricos y cúpricos.

- El oro es algo soluble en una solución de carbonato de sodio al 10%
- El oro es soluble en soluciones cianuradas.

### **2.1.6. EL ORO AL ESTADO NATURAL Y SUS PROCESOS**

El oro se encuentra nativo en el cuarzo de las pizarras cristalinas, en las rocas graníticas (filones o mantos), en las arenas de algunos ríos y terrenos aluviales (placeres) en forma de laminitas o granos y en masas de algunos gramos (pepitas). También se encuentra libre pero asociado con la pirita (sulfuro de hierro), galena (sulfuro de plomo) y blenda (sulfuro de cinc) y combinado con el telurio y selenio

- a. Cuando el oro abundaba en los placeres o arenas de los ríos, se sometían las arenas y barros auríferos a lavados dentro de cubetas o bateas, sometiendo la masa a un movimiento especial para que el oro, por su mayor densidad, se reuniese en el fondo, expulsando de la cubeta las arenas que lo acompañaban.

Otras veces se arrastraban las arenas auríferas o el mineral disgregado por fuertes chorros de agua por canales inclinados, interrumpidos, de vez en cuando, por salientes y depósitos de sedimentación, disponiendo cedazos para impedir el paso de estériles arrastrados por el agua.

Las arenas con oro se trituraban finamente, se arrastraban por el agua, descendían en planos inclinados, donde se colocaba mercurio que disolvía el oro. La amalgama de oro-mercurio se recogía en depósitos y se destilaba en retortas, se comprimía en prensa hidráulica, se recuperaba el mercurio y quedaba el oro en las retortas.

- b. En otras explotaciones se transformaba el oro en cloruro, se agregaba sulfato de hierro que precipitaba el oro metálico.

La mayoría de las minas más profundas explotadas en los Estados Unidos durante la fiebre del oro del siglo XIX se valieron de la

amalgamación con mercurio para concentrar el oro en polvo después de triturar el cuarzo en un molino. Pero el proceso con mercurio era ineficiente; por ejemplo, sólo se recuperaba el 60% del oro.

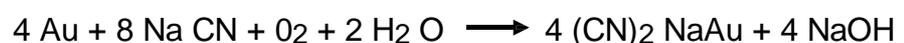
- c. Los inventores buscaron otro método y en Escocia, en 1887, se utilizó por primera vez el cianuro, que luego se empleó en los campos Witwatersrand en Sudáfrica. Este método no sólo permitía aumentar la recuperación del oro, por ejemplo más del 97%, sino que hacía rentable explotar minerales con muy bajo contenido de oro diseminado en general en grandes extensiones

Hoy el oro se obtiene casi exclusivamente por cianuración. Es que en 1969 la oficina de Minas de los Estados Unidos (US Bureau Of Mines) propuso el sistema de remojo con cianuro al aire libre como método económico para tratar grandes volúmenes de minerales de oro de baja ley (con muy poco oro por tonelada de mineral). Por otra parte, los costos de la mano de obra eran crecientes y esto hizo que las minas a cielo abierto fueran más competitivas que las subterráneas, que requerían grandes cantidades de mano de obra, al tiempo que se descubrían grandes volúmenes de mineral de oro de baja ley.

Los bajos costos y la capacidad de procesar cantidades inmensas de material, que caracterizan a la técnica conocida como “lixiviación de cúmulos”, se impuso en casi todo el mundo como el método preferido para extraer el oro de los minerales.

Este procedimiento se funda en que las disoluciones diluidas de los cianuros alcalinos tienen la propiedad de disolver el oro de los minerales que lo contienen. La disolución se lleva a cabo en presencia de un agente oxidante.

La reacción química simplificada sería la siguiente:



### 2.1.6.1. Concentración gravimétrica del oro

La concentración gravimétrica es un proceso tal cual que las partículas de tamaños distintos, forma y densidades son separadas unas de otras por la acción de la fuerza de gravedad o por la fuerza centrífuga.

**TABLA 1. Comparación entre Equipos de Concentración Gravimétrica**

Equipos	Aplicación	Granulometría Mm (# Ty )	Rango de rendimiento	Recuperación
Canaletas	Placeres	Oro grueso (amplia granulometría) +0.15 +100	50 – 60 m <sup>3</sup> /h	40 - 70
Jigs	Menas general en	Oro grueso +0.850 3-20 Oro fino 0.074 200	Variable	40 - 70
Mesas	Menas, concentrados y otras pulpas	Oro grueso +0.850 20-400	Variable	40 - 70
Espirales	Menas, concentrados y otras pulpas	Oro fino -2	0.5-25 t/n	50 -80
Conos	Menas, concentrados y otras pulpas	Oro fino -3	Sobre 60tn	50 -80

Fuente: N. Jacinto, Apuntes de cátedra II UTO

A continuación se procede a detallar cada equipo gravimétrico:

#### **Canaletas**

Se han usado por siglos en la separación de los minerales pesados, especialmente menas auríferas, principalmente en las operaciones pequeñas de minería aurífera aluvial y en la concentración de mineral primario molido.

En su forma simple consiste en una canaleta con una inclinación, según la forma de operación y tamaño de grano de la alimentación para la preconcentración semicontinua de alimentaciones de minerales pesados y alrededor de 15° para el post lavado de concentrados

clasificados con estrecho rango de tamaño de grano en ritmo de trabajo intermitente. Según el caso de uso se emplean las canaletas de 2x0.5x0.5 m hasta 100x2x2 m.

### **Chua Mecánica**

Un equipo de diseño sencillo, denominada localmente “chua mecánica” para recuperar oro, inicialmente, de descartes de canaletas (colas) de algunas cooperativas.

La recuperación del oro, junto a una fracción de arenas negras con importantes contenidos de granates, ilmenita, wolframita y casiterita, se realiza por sedimentación y estratificación de las partículas pesadas hacia la pared del fondo del plato parabólico de donde las 8 gradas talladas de espirales van recogiendo las partículas pesadas hacia el centro del plato, descargándose en forma continua por un orificio central hacia la parte posterior del mismo. El material liviano, formado por arena cuarcífera, pizarra y esquistos principalmente, se descarga por rebalse sobre los bordes del plato a una tolva para su retratamiento en una segunda máquina similar o para su descarte final.

### **Mesa Concentradora**

Las mesas concentradoras son aparatos de concentración gravimétrica con flujo laminar sobre una superficie inclinada. Aquí se habla principalmente de los tipos con movimiento longitudinal vibratorio, donde las partículas de mineral se diferencian formando bandas en abanico (cejas), según su peso específico (y la granulometría). Otros tipos de mesas (mesas de banda, mesas basculantes, mesas de paño sin fin, mesas redondas, etc.) son raramente usadas en la pequeña minería y por esto no se describen aquí en detalle.

De acuerdo a su modelo y tamaño, las mesas se utilizan para concentrar minerales finos y ultra finos con una capacidad hasta un máximo de 1,5 t/h por unidad.

## **Concentradores Centrífugos**

Los concentradores centrífugos constituyen la principal innovación realizada a los implementos de concentración gravimétrica de oro. En un tiempo muy corto, han ganado gran aceptación para la recuperación gravimétrica de oro en minas grandes; frecuentemente en los circuitos de molienda para separar oro libre y evitar sobremolienda y antes de plantas de cianuración o flotación para recuperar el oro grueso. También existen muchas aplicaciones en plantas industriales en la minería aurífera aluvial. Otra aplicación especial para los concentradores centrífugos es la recuperación del oro como un producto secundario, por ejemplo en canteras de grava.

Mientras las partículas sean de menor tamaño, más fuertes son con relación a la gravedad, la fuerza hidráulica y la viscosidad, por lo cual el rendimiento de la separación gravimétrica decrece considerablemente para tamaños finos.

## **Concentrador centrífugo Knelson**

Este equipo fue desarrollado en Canadá por Byron Knelson, un equipo de Alta Gravedad, equipo que constituye el avance más notable de esta década en lo que ha recuperación gravimétrica del oro se refiere.

Cabe remarcar que en las numerosas operaciones mineras auríferas en que se está utilizando el Concentrador Knelson ha quedado plenamente demostrado su superioridad en el mercado frente a cualquier otro equipo que se use en estas mismas aplicaciones satisfaciendo a los usuarios por su alto rendimiento que sobrepasa el 95% en recuperación de oro y además, por la cualidad de sus componentes que han demostrado una sólida robustez y resistencia a la abrasión.

Está basado en la fuerza centrífuga la cual logra aumentar la aceleración gravitacional 60 veces lo del equipo normal. Se diferencia de otros equipos pues tiene una inyección de agua en contra presión, provocando que la

masa en los rifles del tazón giratorio sea fluidizada, consiguiendo así, que las partículas livianas sean expulsadas hacia afuera.

Para recuperar el oro no mojable denominado hidrófobo o flotante, que actualmente debido a las limitaciones de los sistemas y equipos empleados se pierde irremediabilmente en los relaves de los lavaderos del país.

### **Concentrador Jig - Kelsey**

Este concentrador fue concebido a partir de Jig Harz colocado en posición horizontal girado en un campo centrífugo; esa fue la idea con la que Chris Kelsey desarrolló el Jig centrífugo empleando un complicado mecanismo que hace rotar la criba para generar el campo centrífugo y un diafragma fijo detrás de la criba que genera la cama pulsante.

El jig centrífugo difiere de los demás jigs no solo porque trabaja a aceleraciones de gravedad mayores que llegan hasta 60 G sino que la cama de finas partículas que se forman actúan como una pulpa de medio denso que facilita la eficiencia de separación. A diferencia de otras centrífugas, el jig Kelsey, trabaja en forma continua; recibe la alimentación pulpa entre a 20 a 60% sólidos, por efecto de la fuerza centrífuga.

### **Concentrador Falcón**

La recuperación de metales y minerales FINOS de los flujos de proceso ha sido siempre una dificultad. Con la serie de Concentradores Centrífugos Continuos Falcón, su diseño simple y una fuerza de gravedad de 300 G se hace ahora posible lo históricamente imposible.

El objetivo primario de esta es maximizar la recuperación y disminuir la masa entrante a los procesos subsiguientes. Esto hace a las unidades perfectas para pre concentrar o retratar flujos, pues no se emplea agua

adicional de proceso y los concentrados producidos están efectivamente deslamados y desaguados.

Los fabricantes de la Falcón han desarrollado en Canadá un sistema continuo de concentración centrífuga por gravedad a lo largo de los 15 últimos años. La nueva serie Falcón-C ha demostrado alta efectividad en la preconcentración, reduciendo el tonelaje a las etapas subsiguientes. La Falcón-C trabaja bien en la depuración (scavenger) en procesos de recuperación de colas. Se obtienen mejores recuperaciones con menores costos operativos, pero además se elimina el agua de fluidización y el exceso del agua del proceso.

Esta tecnología ha sido puesta a prueba para oro, cobre, estaño, carbón, hierro, plata, minerales pesados y en especial tantalio.

### **Análisis granulométrico**

El análisis de tamaño de los diversos productos de una planta de beneficio de minerales constituye una parte fundamental del procedimiento de pruebas de laboratorio. Este análisis es de gran importancia para la determinación de la calidad de la molienda y para establecer el grado de liberación de los valores de la mena en varios tamaños de partículas. En la etapa de separación, el análisis del tamaño de los productos se usa para determinar el tamaño óptimo de la alimentación al proceso para obtener una máxima eficiencia y determinar el tamaño en que ocurre cualquier pérdida en la planta, de manera que se puede corregir.

### **Técnicas microscópicas**

Estas técnicas involucran la determinación del tamaño por medición directa de la imagen ampliada de la partícula sometida a análisis. Para ello, puede utilizarse la escala del ocular del microscopio o una foto micrografía obtenida y medir una longitud preseleccionada.

Es necesario tomar varias precauciones. Se requiere el conteo de un número bastante grande de partículas para asegurar la precisión de los parámetros medidos. El trabajo puede ser tedioso, los datos deben ser cuidadosamente revisados para eliminar posibles errores, debido al descuido del analista. Se deben tomar precauciones para obtener una buena dispersión de la muestra a fin de que se pueda observar una sola partícula a la vez y no un aglomerado de ellas.

#### **2.1.6.2. Fundamentos de la flotación.**

La flotación es un proceso físico-químico de separación de materias de distinto origen que se efectúa desde sus pulpas acuosas por medio de burbujas de gas a base de sus propiedades hidrofílicas e hidrofóbicas.

La flotación es una de las técnicas más importantes y versátiles en el procesamiento de menas, su aplicación se expande al tratamiento de otros materiales.

#### **Flotación De Oro**

Antes de hacer referencia a la flotación de oro propiamente se debe indicar algunos aspectos por los cuales se justifica el hecho de no usar concentración gravimétrica, por ejemplo presenta la dificultad de no poder recuperar el oro fino que irremediamente son arrastradas en las colas, inclusive partículas relativamente gruesas que tienen formas especiales favoreciendo a que sean arrastradas en las colas.

Entonces la flotación es una buena alternativa para recuperar el oro fino cuando este se muestra libre en la muestra o acompañado de sulfuros.

La flotación se usa bastante en la recuperación de oro, sin embargo, los objetivos y el modo de aplicación son muy variables y dependen del tipo de mineral, de las asociaciones de oro, otros valores metálicos, consideraciones de mercado y requerimientos ambientales.

## **Reactivos De Flotación**

Estos reactivos aseguran que la flotación sea altamente selectiva y eficiente, siendo su función hacer variar la tensión superficial de los minerales.

### **2.1.6.3. Carbón activado**

El Carbón Activado no viene a ser sino un Carbón con una gran área superficial, al cual se le ha eliminado las sustancias volátiles y destruido algunos enlaces moleculares débiles a través de un tratamiento Piro-metalúrgico.

El carbón tiene la propiedad de adsorber el oro y la plata a partir de soluciones hasta el grado de 7% de su peso en oro y 3% de su peso en plata sin mostrar el más ligero cambio en su apariencia.

Estas afirmaciones hechas hasta 1921 también son aplicables actualmente, debido a la complejidad de carácter físico y químico del carbón activado.

Para optimizar la performance metalúrgica de un proceso que usa carbón activado para recuperar oro y plata, algunos comprenden lo que involucra y a veces una química compleja es muy necesaria.

### **Propiedades**

Las propiedades más importantes del Carbón Activado usado en la extracción del oro son:

- a. Capacidad de Adsorción.
- b. Velocidad de Adsorción.
- c. Resistencia Mecánica y Resistencia al uso.
- d. Características de Reactivación.
- e. Distribución del tamaño de Partículas.

### 2.1.7. Lixiviación

Lixiviar es extraer una sustancia (el oro) de una masa sólida (rocas pulverizadas) mediante el tratamiento con un líquido (solución de cianuro de sodio). La masa de mineral pulverizado expuesta al aire (cielo abierto) es rociada con la solución de cianuro de sodio.

La lixiviación del oro se realiza utilizando principalmente uno de estos dos métodos: el Merrill-Crowe o el de absorción con carbón.

A. En el Merrill-Crowe se agrega zinc en polvo y sales de plomo a la solución de cianuro con oro. El oro se separa y precipita y el zinc en polvo se combina con el cianuro. Luego se funde el precipitado para obtener el oro. Las escorias se descargan habitualmente en las pilas de desecho o “colas”.

El cianuro estéril puede ser destinado a un ciclo abierto en cuyo caso se diluye y luego se descarga a cursos de agua o a un ciclo cerrado para recuperarlo y volverlo a usar.

B. La recuperación con carbón se usa más en explotaciones pequeñas y con bajo contenido de plata. En este caso la “solución encinta” se impulsa a través de columnas de carbón activado. El oro y la plata de la solución se adhieren al carbón y la solución estéril, que todavía contiene cianuro, se lleva a un embalse de almacenamiento.

El oro y la plata se separan del carbón con soda cáustica caliente y la solución pasa luego por una celda con ánodo de acero inoxidable y cátodo para captar el material. El carbón gastado se reactiva en un horno y se lo reutiliza

Un problema en la etapa de lixiviación es que la membrana, generalmente de polietileno de alta densidad, se perfora por el peso del cúmulo que puede tener entre 40 y 50 metros de altura. Además, si la superficie del cúmulo es extensa los forros son enormes. Por ejemplo, los mineros del cobre no confían en estos forros para su minería.

El otro problema son las lagunas que se forman en la zona del yacimiento con los líquidos del tratamiento que contienen cianuros y metales pesados.

#### **2.1.7.1. Cianuro**

El radical cianuro es una combinación de Carbono (C) y de Nitrógeno (N) con una carga negativa, donde el Nitrógeno funciona como trivalente, es decir comparte tres uniones con el Carbono. CN si aparece un elemento con una carga positiva como puede ser el Na (sodio), K (potasio) o Ca (calcio) su unión con el cianuro forma una sal:

NaCN	Cianuro de Sodio
KCN	Cianuro de Potasio
Ca(CN) <sub>2</sub>	Cianuro de Calcio

Estas sales alcalinas son solubles en agua, cuyo aspecto es el de un sólido blanco sin olor y sumamente tóxico.

El ácido cianhídrico (HCN) es un líquido incoloro que hierve a 26 grados centígrados (es decir fácilmente volatilizable) y es soluble en agua, sumamente tóxica y con olor a almendras amargas y es un veneno potentísimo.

El cianuro libre se genera cuando el cianuro se disuelve en agua. Si bien se conocen fuentes naturales de cianuro (por ejemplo, en las almendras, cáscaras de papas y de mandioca, porotos blancos y sorgo), la mayor parte del cianuro que existe en el mundo no proviene de fuentes naturales sino que es fabricado por el hombre para aplicarlo en diferentes actividades e industrias (galvanoplastia, curtiembres, fabricación de nylon, plásticos y cerca del 8% se utiliza principalmente en la minería del oro).

Una de las propiedades químicas del cianuro es su capacidad para combinarse con metales, por ejemplo con el oro (Au) formando cianuro

de oro. El cianuro se presta a formar mezclas con la mayoría de los principales metales para formar compuestos o complejos químicos, por lo que es de gran utilidad para la extracción de metales de una mena.

El cianuro también tiende a reaccionar químicamente con la mayoría de otros elementos químicos, produciendo un gran variedad de compuestos tóxicos y no tóxicos. Además, el cianuro (que contiene carbono, lo que significa que es un compuesto orgánico) reacciona fácilmente con otros compuestos orgánicos, inclusive organismos vivos.

A diferencia del mercurio y otros metales, el cianuro en su forma pura no se acumula en la cadena alimenticia. La luz del sol, los ambientes con pH neutral y los microorganismos del suelo causan la desintegración rápida del cianuro en partículas no tóxicas. Pero es probable que esta desintegración se vea disminuida cuando no hay suficientes microorganismos que contribuyan a este proceso (por ejemplo en algunos climas desérticos), o en aguas subterráneas, o bajo capas de hielo, en donde el cianuro no está expuesto a la luz solar.

A pesar de que la mayoría del cianuro presente en aguas provenientes de faenas mineras se desintegra y resulta en compuestos que no son nocivos, siempre puede haber concentraciones importantes de otros compuestos cianúricos tóxicos que persisten en el ambiente. Estos compuestos persistentes constituyen el más alto riesgo para las especies vulnerables de peces de agua fresca.

El cianuro tiene dos usos principales en la minería:

- Ya que tiene una atracción natural al oro, la plata y otros metales, el cianuro es utilizado cada vez más a menudo para extraer oro de menas de baja ley en oro utilizando procedimientos de lixiviación en cúmulos. El cianuro se va pegando al oro a medida que va penetrando la mena triturada, lo que permite más adelante captar la solución de oro y cianuro. Finalmente, el oro es separado del cianuro. Este método también es usado para la extracción de la plata.

- El cianuro también es usado en la molienda y concentración de cobre, plomo, cinc, cobalto y molibdeno. Se agrega cianuro en ciertas fases de la molienda para separar los minerales valiosos de la mena, como por ejemplo el sulfuro.

#### **2.1.7.2. Fundamentos de cianuración**

Los procesos metalúrgicos en los últimos tiempos están adquiriendo mayor importancia dentro del campo de la metalurgia extractiva la que involucra la recuperación de componentes valiosos de materiales primarios y secundarios (minerales de baja ley) haciéndose extensiva a materiales no metálicos.

Los materiales primarios y secundarios comprenden minerales de baja ley o materiales de desperdicios de minas que no pueden ser económicamente tratados por procesos de concentración gravimétrica y piro metalúrgicamente, tales como fundición y refinación convencional, además los procesos hidrometalúrgicos son usualmente más baratos en costos de capital y son relativamente más fáciles de controlar el proceso mismo.

Los procesos de lixiviación comprenden la disolución del valor metálico de una materia prima en una solución acuosa con agentes químicos apropiados en un espacio limitado.

**Lixiviación en pila.-** La lixiviación en pila con cianuro de los minerales de oro y plata, constituye un desarrollo hidrometalúrgico relativamente reciente. Hoy en día, se usan comercialmente dos métodos básicos de lixiviación por cianuración en pila, los que usan el mineral tal como sale de la mina y los que se usan el mineral chancado. Si la mena es quebrada y dejada en su lugar o cuando ésta permite la percolación de la solución lixivante sin necesidad del uso de explosivos, se puede lixiviar “in situ”, esto es, en el mismo lugar sin mover la mena. Un cuerpo mineralizado expuesto a la vista, vale decir, no escondido, puede ser lixiviado insitu, rociando la solución lixivante sobre la

superficie y reuniendo en pozos de recuperación, después de que la solución haya percolado a través de la mena.

**Percolación.-** La percolación se refiere a la manera en la cual las soluciones lixiviantes fluyen por gravedad a través de la pila. A superficie de una pila de pobre percolación puede llegar a ser inundada y las soluciones lixiviantes pueden correr sobre los lados de la pila, causando una severa erosión. La pila puede no permitir suficiente solución para mojar el mineral, de modo que la lixiviación ocurre sólo sobre las superficies extremas de la pila.

**Lixiviación en vats.-** En los últimos años la Robertson Research Internacional Limited ha estado dedicado al desarrollo de un sistema de lixiviación en vat/pila en el Sudan, para ello se realizaron muchas pruebas, tal es así que se consideró el depósito más atractivo. Puesto que, además del potencial de mina de roca dura, había ya una sustancial reserva de colas o residuos conteniendo oro que podrían soportar una pequeña operación comercial independiente durante varios años.

La lixiviación se lleva a cabo en piscinas de 5,5 m de diámetro, acondicionados con un sistema de filtración, las soluciones del proceso son almacenadas en piscinas y son recirculadas en pequeña bombas centrifugas a una unidad de adsorción de carbón para recuperar el oro.

**Proceso Merrill Crowe.-** Es el proceso de cementación con Zinc para la precipitación de oro de las soluciones de cianuro. Este proceso Merrill Crowe tiene por objeto de evitar la eliminación del oxígeno contenido en la solución de cianuro, y es usado principalmente en el sistema de precipitación por el polvo de zinc pero puede ser también empleado cuando se usa la precipitación por las virutas de este metal.

**Clarificación.-** El objetivo de esta etapa es eliminar la presencia de sólidos en suspensión en la solución Pregnant, remanentes que no han podido ser eliminados en la etapa anterior; y entregar una solución clarificada a la siguiente etapa. Para ello se utilizan filtros clarificadores.

### 2.1.8. Proceso de refinación

**Horno de fundición.-** Para la fundición de precipitados Merrill Crowe, se usa generalmente hornos basculantes ya sea de combustión por petróleo, por gas o eléctricos. La parte externa es metálica y la cámara donde se realiza la combustión y va el crisol de grafito, es revestida totalmente de refractarios teniendo en cuenta que se va alcanzar una temperatura de aproximadamente entre los 1200 °C sabiendo que la temperatura de fusión del Au es de 1063 °C y de la Ag de 960 °C.

**Crisol.-** Los crisoles que se utilizan para la fundición de precipitados Merrill Crowe son generalmente de grafito (SiC = Carburo de silicio) y su tamaño va a depender del porte del horno y de la cantidad de precipitado a fundir. Como recomendación adicional se puede decir que a los crisoles antes de ser cargados con precipitado deben de ser precalentados durante 1 a 1.5 horas, para evitar que el crisol sufra choques térmicos durante el carguío.

**Lingoteras.-** Las lingoteras que se utilizan para decepcionar el metal líquido (DORE), son hechas de material de hierro fundido, con una capacidad de recepción de 500 onzas, se prefiere que sea de hierro fundido porque su temperatura de fusión de este material es de 1536 °C, muy superior a los 1200 °C, con la cual sale el metal líquido del horno de fusión.

**Escoria.-** Es una mezcla fundida de una composición química definida (boratos y silicatos), generada por reacciones químicas que se originan dentro del crisol durante el proceso de fusión.

### 2.1.9. Tostación

La tostación ha sido el método tradicional empleado por muchos años para el tratamiento de menas y concentrados de oro refractarios, que contienen azufre, arsénico, antimonio o telurios. Consta de una tostación oxidante.

## **Tostación Oxidante**

Es una operación muy antigua y en la actualidad se esta empleando en Canadá, Sudáfrica y Australia entre otros. Los objetivos que se busca con la tostación son:

- Destrucción de la fase del metal sulfuroso.
- Exposición del oro en el sulfuro.
- Producción de un área superficial grande, calcinas altamente porosas.
- Minimizar la producción de constituyentes reactivos en la calcina, pirrotita, sulfatos ferrosos y otros.
- Fijación del arsénico, azufre en una forma aceptable para el medio ambiente.

El método frecuentemente empleado en la industria es el de la tostación en dos etapas:

En la primera etapa, efectuada en condiciones reductoras en deficiencia de oxígeno, se produce una calcina pobre en arsénico conteniendo principalmente magnetita.

En la segunda etapa, la magnetita es transformada en hematina bajo condiciones oxidantes. Industrialmente las dos etapas se realizan en hornos de lecho fluidizado estacionario y con circulación.

## **2.2. MINERÍA ARTESANAL Y PEQUEÑA MINERÍA**

La Ley General de Minería establece dos regímenes para el desarrollo de la actividad minera en el Perú. El Régimen General, para la actividad de la Mediana y Gran Minería, así como el Régimen Especial, para la actividad de la Pequeña minería y Minería artesanal, que es supervisado por las Direcciones Regionales de Minería, DREM, en cada región.

La pequeña minería y la minería artesanal son actividades de extracción minera que se vienen desarrollando de manera informal y con escasos recursos, intensificándose a partir de la década de los 80's hasta la fecha.

En ambas formas de minería prima la informalidad, la explotación laboral y la explotación irracional de recursos naturales. En Madre de Dios existen aproximadamente 30 mil mineros dedicados a este régimen artesanal que es uno de los principales dinamizadores de la economía local, pero también fuente de serios conflictos sociales, así como se presentan en otras regiones con minería ilegal tales como Piura, Nazca, Puno y Cusco, entre otras.

La definición de la pequeña minería engloba a las cooperativas, la minería artesanal, la minería informal. La pequeña minería ha incrementado su participación en la producción de casi todos los minerales, con excepción del oro. También en este último sector la pequeña minería ha aumentado la producción.

### **2.3. RELAVES AURÍFEROS**

La explotación rentable de yacimientos no depende exclusivamente del contenido de oro, sino también del consumo de agua que demanda el tratamiento de cada tipo de material; así una ley intermedia o alta en una matriz sumamente arcillosa puede ser menos rentable y menos aceptable que un material de menor ley pero con un contenido moderado de arcilla. Los mineros no pueden seleccionar entre estos tipos de materiales o realizar un minado más selectivo debido a la ausencia de exploración apropiada.

El relave, tanto grueso como fino, se almacena en sitios seleccionados de acuerdo a su accesibilidad y facilidad de transporte, antes que basados en el contenido de oro recuperable. Como resultado se han cubierto con montañas de relaves áreas que probablemente tengan igual o mayor contenido de oro que las zonas explotadas. El costo de

remover el material supra yacente perjudica notablemente la rentabilidad de su explotación.

También el método empleado favorece el almacenamiento del relave grueso sobre áreas mineralizadas que podrían haberse explotado en otras circunstancias.

Los relaves tanto grueso como fino se descargan sin planificación, y terminan cubriendo extensas zonas que contienen oro.

## **CAPITULO III**

### **METODOLOGÍA**

Para la realización del presente trabajo se empleara una metodología descriptiva del proceso que está operando en algunas empresas y posteriormente realizar estudios prácticos y comparativos con otros estudios técnicos metalúrgicos para la obtención del oro, realizándose estos por medio de pruebas metalúrgicas.

#### **3.1. CARACTERIZACION MINERALOGICA**

Las pruebas de caracterización permiten encontrar un camino para el procesamiento experimental puesto que los análisis practicados aportan información útil que permite evitar errores experimentales y ensayos inútiles que generarían incrementos en los costos.

Lopez M (1999) citando a Del Valle (1997) clasifica la información obtenida de la caracterización mineralógica en varios grupos así:

##### **3.1.1. Grupo I: Datos composicionales y mineralógicos**

Minerales de mena:

Dan información sobre flotabilidad, solubilidad, reductibilidad, clivajes y fisuras para el acceso a soluciones, deslustre y recubrimiento, propiedades magnéticas, gravedad específica, minerales complejos.

Minerales metálicos sin valor. Minerales oxidados y grado de oxidación.

Minerales de ganga

Minerales inconvenientes y perjudiciales:

En los casos de las menas auroargentíferas hay minerales nocivos para el procesamiento. Entre los minerales que inhiben la cianuración tenemos:

- Minerales consumidores de oxígeno: pirrotina, marcasita y ocasionalmente pirita.
- Minerales cianicidas: Sulfuros de cobre y minerales oxidados de As, Sb y Cu.

- Minerales consumidores de oxígeno y cianuro.
- Perdida en las colas

### 3.1.2. Grupo II: Datos geométricos

Se trata de definir la forma del mineral de interés económico, el tamaño del grano y las relaciones de inter crecimiento de los minerales de mena y ganga, aspectos necesarios para diseñar una planta de procesamiento mineral.

En el aspecto geométrico existen tres factores que trabajan estrechamente unidos:

El modelo de inter crecimiento mineral.

El tamaño de las partículas intercrecidas:

Da el tamaño de liberación, es decir el tamaño al cual se debe moler.

La naturaleza del límite entre partículas intercrecidas:

Lo cual indica si los granos se romperán o no en los límites y de no ocurrir la ruptura se puede establecer si es necesario realizar una molienda más fina para alcanzar el grado de liberación.

La Figura 1 se presenta los tipos morfológicos de textura y su influencia en el procesamiento de minerales según Craig y Vaughan (1981)

PRODUCTO	Gr.	% PESO	LEYES		CONTENIDO FINOS		% RECUPERACIÓN	
			Au (gr/Tm)	Ag (oz/Tm)	Au (mgr)	Ag (moz)	Au	Ag
Conc. Cleaner	27,45	2,745	158,32	241,54	4,35	6,63	62,63	49,36
Medios	119,61	11,961	13,48	42,68	1,61	5,10	23,24	38,00
Relave Rougher	852,94	85,294	1,15	1,99	0,98	1,70	14,14	12,64
Cabeza Calculada	1000	100	6,94	13,43	6,94	13,43	100	100
Cabeza Ensayada			6,61	11,22	% RECUPERACIÓN		62,63	49,36

### 3.1.3. Grupo III: Datos cuantitativos

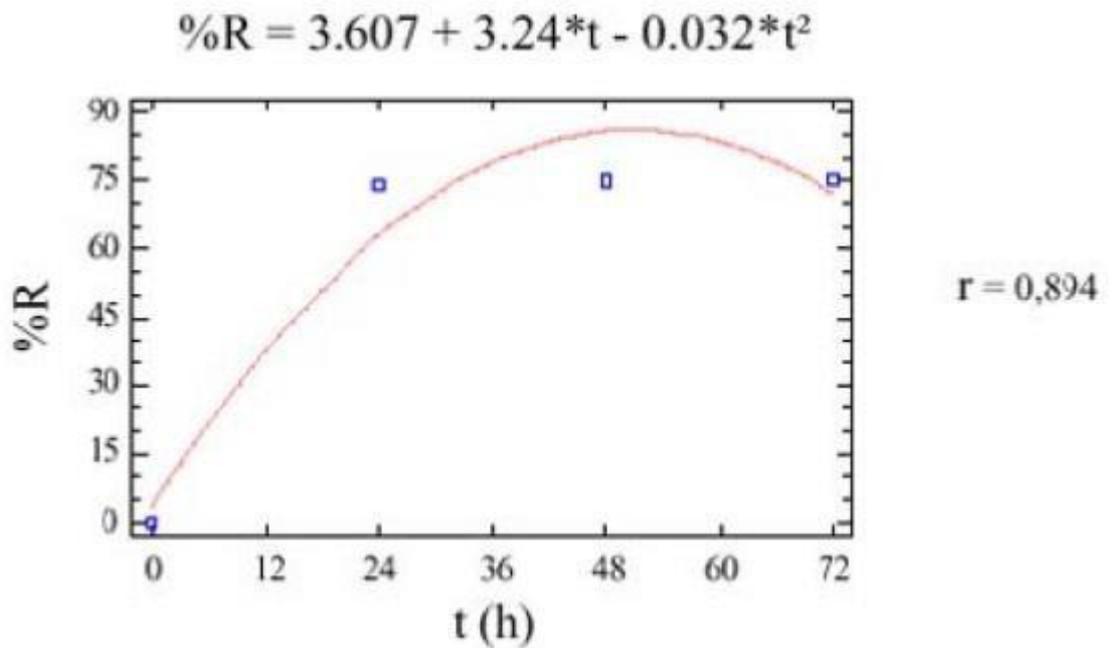
El cálculo cuantitativo de los tamaños de las partículas de las especies minerales contenidas en la mena permite establecer los parámetros adecuados para el procesamiento mineral así como para la extracción del mineral y/o la especie de interés. Es por lo tanto necesario que los constituyentes mineralógicos cuantificados sean presentados de manera cuantitativa o semi cuantitativa con el fin de darle la máxima utilización a la caracterización.

Los minerales auríferos complejos son causa de pérdidas de oro debido a que algunas características mineralógicas afectan la recuperación. La textura, los intercrecimientos, la localización y distribución de los metales de interés, son tema fundamental a definir por la caracterización puesto que pueden ocasionar problemas en el procesamiento.

Como ya se explicó la necesidad de procesos de oxidación como pre tratamiento para minerales y concentrados de sulfuros, carbonáceos y telurios son obligatorios para incrementar la extracción hidrometalurgia. Las asociaciones mineralógicas más importantes en las menas de sulfuros auríferos que exigen pre tratamiento oxidante previo a la lixiviación convencional se ilustran en la figura 2

<b>Ley de cabeza Au (g/TM)</b>	<b>26,0</b>
Peso concentrado compósito (g)	400,0
Gravedad específica (G.e.)	4,2
Granulometría del concentrado	75% - 200 malla
Dilución (L/S)	2/1
pH Pre-Aireación óptimo	10,53
Tiempo Pre-Aireación óptimo (h)	10,98
pH cianuración	10,5
Tiempo de cianuración	24, 48 y 72

Tiempo (h)	Sol. Rica Au (g/m <sup>3</sup> )	Relave Au (g/TM)	Recup. %	Consumo NaCN (Kg/TM)	Consumo CaO (Kg/TM)
24	11,25	6,80	73,85	1,86	9,48
48	12,35	6,50	75,00	1,94	10,40
72	12,62	6,35	75,58	2,05	10,35



### 3.2. MUESTREO DE MATERIAL

La recolección de muestras representativas se realizó en la parte norte de los yacimientos del Distrito de Limbani. El método de muestreo que se utilizó es el de acopio, este fue de fácil manipulación ya que el material había sido sometido al chancado previamente y se encontraba expuesto a la intemperie en diámetros de 10 cm aproximadamente, se escogió fragmentos representativos del yacimiento, hasta obtener el peso aproximado de 46 Kg (un saco de muestras).

#### 3.2.1. Preparación del material muestreado

El material es muestreado en el yacimiento Fortuna I, como un skarn de sustancias minerales valiosas y estériles, por lo cual resulta necesaria su preparación mecánica y así lograr una separación adecuada de la mena.

Al ser mineral fresco que se encontraba expuesto a las condiciones climáticas del sector fue necesario secarlo en una estufa a 50°C. Luego se procedió a llevar a cabo las operaciones mecánicas de reducción de tamaño que se realizan con el fin de obtener un grado de liberación apropiado del mineral.

### **3.2.2. Trituración**

La trituración de sustancias sólidas transforma un determinado material en trozos de menor tamaño. Para la trituración de los materiales se incrementa su superficie libre, según las propiedades físicas de una sustancia, su dureza, su fragilidad, se emplean métodos distintos de trituración que pueden ser: por presión o impacto, fractura, escisión o corte.

Se la realiza en una trituradora de mandíbulas cuyas ventajas permiten la manipulación adecuada de material así como también obtener un tamaño de partícula adecuado.

La boca de alimentación de la trituradora es grande, por lo tanto colocamos el material poco a poco, por la acción de las mandíbulas (fija y móvil) se realiza la trituración y se descarga el producto por la parte inferior debido al movimiento de la mandíbula móvil.

Las mandíbulas se regulan previamente para obtener un tamaño de partícula de 2mm; una vez realizada la trituración pasamos el producto por un tamiz ASTM #10 con el fin de clasificar el material, el retenido pasará nuevamente a ser triturado y el pasante quedará en stock para las preparaciones posteriores.

### **3.2.3. Homogenización y Cuarteo.**

La homogenización consiste en mezclar y amontonar sucesivamente el material hasta conseguir que el material este visiblemente homogéneo.

Colocamos el material en un plástico y homogenizamos con movimiento continuo, de forma circular, cogiendo cada punta del plástico sin dejar partes muertas.

Luego se procede a la reducción de la muestra, aplicado cuarteo.

En el cuarteo se intenta obtener la cantidad de material suficiente para realizar los ensayos de caracterización.

El material se distribuye para formar primero un cono y después una “torta” circular plana, respetando lo máximo posible la simetría lograda en el paso anterior, finalmente la torta circular se divide en 4 partes a lo largo de 2 diagonales perpendiculares entre sí. Dos cuartos opuestos se separan como muestras y el par restante constituye el rechazo.

Se repite las veces que sea necesario para obtener aproximadamente 1Kg.

### **3.3. CARACTERIZACIÓN DEL MINERAL.**

La caracterización del mineral permite conocer las características físicas, químicas y mineralógicas del mineral para tener como referencia e iniciar con los ensayos metalúrgicos.

## CAPITULO IV

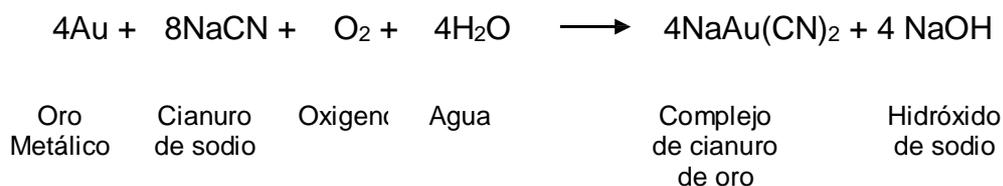
### RESULTADOS Y DISCUSIONES

#### 4.1. DETALLE EXPERIMENTAL

##### 4.1.1. CIANURACIÓN

La cianuración es el proceso electroquímico de disolución del oro, plata y algunos otros componentes que se pueden encontrar en un mineral aurífero, mediante el uso de una solución alcalina de cianuro, que forma aniones complejos de oro, estables en condiciones acuosas. Este proceso implica una serie de reacciones que ocurren en la superficie del sólido.

Elsner (1846) propuso la reacción global de disolución del oro mediante una solución acuosa de cianuro, en presencia de oxígeno:



La reacción global corresponde a una reacción heterogénea que incluye 3 fases diferentes: Fase sólida (oro metálico), líquido (agua, sales disueltas de cianuro), gas (oxígeno)

**Tabla No.1. Influencia del pH en la recuperación de oro por cianuración**

Ph	Recuperación de oro en solución	Consumo CNNa	Consumo Cal
	(%)	(Kg/ton)	(Kg/ton)
9,5	67,9	12,5	3,1
10	71,0	1,7	1,5
11	74,3	2,1	3,5
12	71,1	1,5	11,5

Se observa que a pH= 9,5 la recuperación de oro obtenida es la más baja, esto debido a que si se opera a un valor de pH menor que 10, el cianuro libre estará en mayor proporción como HCN, que es muy volátil a temperatura ambiente, y no reacciona con el material, el consumo de cianuro además se incrementa sustancialmente en este caso (12,5 Kg/ton).

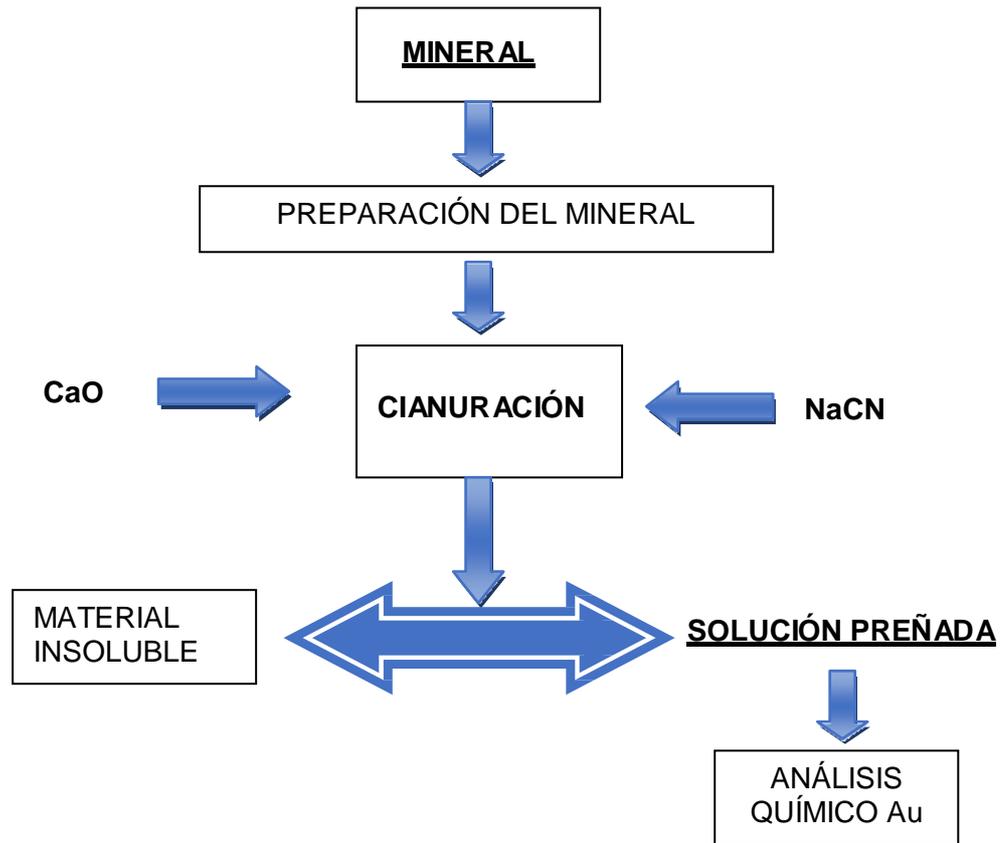
- Absorción de oxígeno en la solución
- Transporte de cianuro disuelto y oxígeno a la interfase sólido líquido
- Transporte de los reactantes al interior del sólido por poros o canales
- Adsorción del cianuro y oxígeno en la superficie del sólido
- Reacción electroquímica en la superficie
- Desorción del complejo soluble oro-cianuro y otros productos de la reacción
- Transporte de los productos desde los sitios de reacción hacia la superficie del sólido por poros o canales
- Transporte de los productos desde la interfase fluido-sólido hacia la solución

El yacimiento original es de tipo refractario y su origen es hidrotermal, en el que el oro se encuentra en grano fino, íntimamente asociado a la pirita.

### **Objetivo**

- Estudiar a nivel laboratorio, la factibilidad técnica de aplicar un proceso combinado: pirometúrgico (calcineración y tostación) e hidrometalúrgico (cianuración), para el tratamiento de minerales del distrito de Limbani.
- Establecer los parámetros óptimos del proceso, para alcanzar una mayor recuperación.
- Conseguir elevar el grado de recuperación en la cianuración de la muestra flotada de las actuales condiciones en las que se trabaja, utilizando para ello los reactivos adecuados.

En resumen, la propuesta de las pruebas para la recuperación de elementos de valor se muestra en la Gráfico.



**Gráfico N° 1 Flujo grama de cianuración directa experimental**

#### **4.1.2. Características de la muestra y materiales utilizados**

**Materia prima.-** El material con el cual se trabajará en la siguiente prueba, consiste en dos muestras provenientes de la prueba anterior la flotación de sulfuros, de los cuales uno ha sido tostado y el otro permanece tal como vino de la flotación.

La cantidad con la que se cuenta son:

Mineral flotado tostado: 250 g

Mineral flotado sin tostar: 300 g

#### **Reactivos**

Los reactivos empleados en la experimentación, fueron:

Cianuro de sodio = grado industrial

Oxido de calcio = grado industrial

Agua = para todas las pruebas se empleó agua de grifo

## **Equipo**

El equipo utilizado en las pruebas fue:

- Tanque de vidrio de 1 litro de capacidad
- Agitador eléctrico
- pH metro
- Material de vidrio (vasos de precipitación, vasos Erlenmeyer)
- Papel filtro
- Otros accesorios.

## **Procedimiento experimental**

1. Preparar correctamente el reactor en donde se cianurará el material aurífero.
2. Se echa agua en el reactor, (678 ml, según cálculos) proporcional a la cantidad de material, agregando en seguida el material a cianurar e iniciar la agitación.
3. Se procedió a medir el pH natural de la pulpa, en este caso fue 3,12.
4. Entonces para trabajar en medio alcalino, que es lo que se quiere se añadió cal de a pocos hasta llegar a un pH de 10,5.
5. Se mantuvo agitándose durante 1 hora para su respectivo acondicionamiento.
6. Para la prueba se tomó una pequeña muestra de solución, obviamente la agitación paró por unos 10min. enviándose dicha muestra a análisis químico.
7. La agitación fue permanente y durante 24 horas seguidas.
8. Se procedió al apagado del agitador pasadas las 24 horas, en seguida se tomó otra poca de muestra para su análisis químico y luego se filtró la pulpa.
9. Finalmente se lavó el queque para una mejor recuperación y dejándose secar.
10. Por último se pesó, cuarteó y se tomó una pequeña muestra la cual se envió a su respectivo análisis químico.

11. Los pasos ya descritos se realizan para los dos tipos de materiales tostados y sin tostar, tomando los mismos parámetros.

#### 4.1.3. Efecto del tamaño de la partícula

Los parámetros empleados en las pruebas fueron;

**TABLA 2. Condiciones de operación en la prueba de cianuración**

<b>Condiciones de operación en la prueba de cianuración</b>	
Cabeza Au (g/tn)	71 y 60
Peso concentrado compósito (g)	250 y 300
Granulometría del concentrado	75% -150 #
Concentración de cianuro	2gr/lt
Dilución (L/S)	4/1
pH cianuración	10.5
Tiempo de cianuración (h)	24

Fuente: Flotación de minerales III.

#### **Efecto del tamaño de partícula en la extracción del metal precioso:**

**TABLA3. Tamaño de partícula en la extracción para material sin tostar**

Tamaño partícula µm	Au g/tn.	% Extr. Au
104	14.94	<b>54.40</b>
53	18.60	<b>64.50</b>
38	21.42	<b>78.60</b>

**TABLA 4 Tamaño de partícula en la extracción para material tostado**

Tamaño partícula µm	Au g/tn.	% Extr. Au
104	21.24	<b>62.32</b>
53	17.45	<b>67.34</b>
38	44.45	<b>88.45</b>

#### 4.1.4. Efecto de la concentración de cianuro de sodio

Establecido el tamaño de partícula óptimo, se procedió a experimentar la influencia de la concentración de la concentración de cianuro de sodio en el proceso, para lo cual se tomaron los siguientes parámetros de operación:

Tamaño de partícula	=	38 micrones
Relación sólido-líquido	=	25 % sólidos
pH de la pulpa	=	10.5
Tiempo de cianuración	=	24 horas
Concentración de NaCN	=	Variable

Los resultados obtenidos en el efecto de la concentración de NaCN en la extracción del metal precioso, se presentan en la siguiente tabla:

*TABLA. 5 Concentración de NaCN en la extracción del oro para el material sin tostar*

Conc. NaCN (g/l)	Au g/tn.	% Extr. Au
0.5	4.41	<b>61.50</b>
1.0	18.75	<b>68.80</b>
2.0	20.88	<b>78.60</b>
2.5	20.19	<b>74.10</b>

*TABLA 6 Concentración de NaCN en la extracción del oro para el material calcinado*

Conc. NaCN (g/l)	Au g/tn.	% Extr. Au
0.5	4.41	<b>63.44</b>
1.0	18.75	<b>64.56</b>
2.0	20.88	<b>79.04</b>
2.5	20.19	<b>87.82</b>

Como ya se tiene conocimiento de los parámetros óptimos obtenidos para el tamaño que se ha trabajado es 10.5 pues, se sabe que este punto el proceso de cianuración es óptimo.

## **4.2. RESULTADOS**

### **Efecto del tamaño de partícula**

Los resultados de la tabla 2 y 3, muestran que a medida que disminuya el tamaño de la partícula aumenta la extracción, obteniéndose a 38 micrones, extracciones de 78,6% y 88,45% de oro respectivamente.

Se estima trabajar con tamaños de grano de 38 micrones, ya que es posible obtener este tamaño mediante circuitos de molienda convencionales.

### **Efecto de la concentración de cianuro de sodio**

La tabla 4 nos muestra que la concentración de cianuro que ofrece los mejores resultados, es de 2gr/lit con 78,6% de extracción de oro.

Y para la calcina la concentración de cianuro más óptima es de 2,5 gr/t con 87.82% de extracción de oro.

La bibliografía recomienda utilizar una concentración inicial de cianuro es de 1 gr/lit para menas oxidadas, en cambio en las menas periticas se aconseja duplicar esta concentración.

En cuanto al hecho que a mayores concentraciones se obtengan menores extracciones de los metales preciosos, porque el oro forma compuestos aúricos, razón por la cual la extracción de oro disminuye. Actualmente esta demostrado que la concentración inicial de cianuro sólo influye en el tiempo de extracción, por cuya razón a altas concentraciones disminuye la velocidad de disolución del oro. Sin embargo, un sistema debe encontrarse en equilibrio químico, por lo cual, a determinadas concentraciones de cianuro, las propiedades físicas se hacen constantes con el transcurso del tiempo.

## Efecto del pH en la cianuración

El pH más recomendable en la extracción de oro se efectúa a pH 10.5, disminuyendo la extracción conforme aumenta el pH. Probablemente este hecho se deba a que al aumentar el pH, se incrementa la presencia de iones sulfuro ya que los iones oxidrilos descomponen a la pirita para formar el Fe(OH)<sub>2</sub> que es estable en soluciones alcalinas.

### 4.3. RECUPERACIÓN DE ORO MEDIANTE CEMENTACIÓN CON ZINC.

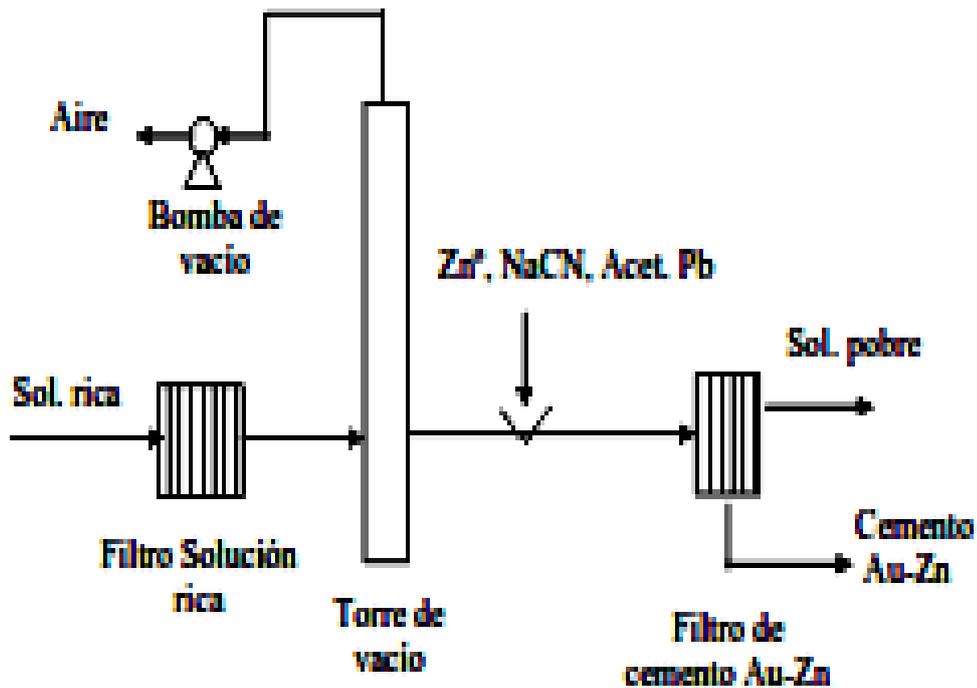
El oro que se encuentra disuelto en forma de un cianuro complejo, se puede recuperar de las soluciones ricas, utilizando la precipitación con zinc metálico. La cementación es un proceso de precipitación del oro en forma metálica sobre el zinc dado su mayor potencial y electronegatividad (el oro es más noble que el zinc). La precipitación o cementación del oro con zinc, es un proceso que se conoce desde 1890, y el cual experimentó en los años subsecuentes algunas modificaciones prácticas importantes como fue el agregar sales de plomo con el objetivo de promover la actividad electroquímica de las reacciones y evitar la pasivación de la superficie del zinc; también se sustituyó las láminas (virutas) por polvo de zinc, lo que incrementa el área superficial específica y por consiguiente, mejora considerablemente la cinética y eficiencia del proceso; la tercera modificación fue la desaireación de la solución rica antes de agregar el polvo de zinc (este proceso es conocido actualmente como Merrill-Crowe)

La reacción electroquímica principal, que ocurre en la precipitación del oro con zinc, es la siguiente:



El proceso industrial que se emplea es altamente eficiente y se conoce con el nombre de **Merrill-Crowe**, en este se alcanzan recuperaciones de oro de hasta el 99.5%. Este proceso involucra

cuatro operaciones principales que son, según la secuencia de ejecución: la clarificación de la solución rica; la desoxigenación; la adición de sales de plomo y polvo de zinc y la recuperación del precipitado, en filtros para el cemento. El proceso en secuencia, se esquematiza en la figura siguiente:



**Figura 2. Esquema del proceso Merrill - Crowe.**

La primera operación es la clarificación de la solución que proviene de la lixiviación. Consiste en la eliminación de los sólidos finos presentes, por medio de filtros, hasta alcanzar un porcentaje máximo de 5 ppm de sólidos en solución. La efectiva ejecución de esta etapa incidirá en la eficiencia del proceso e incremento de la ley de oro en los precipitados.

Después que la solución está libre de partículas en suspensión, se conduce hasta la torre de desaireación, donde por medio del vacío, se logra reducir el porcentaje de oxígeno en solución desde alrededor de 6,5 ppm  $O_2$  hasta aproximadamente 1 ppm  $O_2$ .

El oxígeno incrementa el consumo de zinc y, debido a la presencia de cianuro libre, el oro precipitado se puede redisolver.

Antes de agregar el polvo de zinc, se ajusta el porcentaje de cianuro libre en la solución. La concentración de cianuro libre necesario para la cementación, depende de la concentración de oro en solución. Para el tratamiento de soluciones diluidas,  $< 1 \text{ g Au/t}$  a un pH de 10,5, se recomienda trabajar con concentraciones de cianuro libre superiores a  $0,2 \text{ g/l NaCN}$ . Para soluciones concentradas, en el orden de  $20 \text{ a } 100 \text{ gAu/t}$ , la mínima concentración de cianuro libre aconsejada está entre  $2\text{--}5 \text{ g/l NaCN}$ . El polvo de zinc, con un tamaño muy fino ( $<400$  mallas), se agrega, mediante alimentadores especiales, a razón de  $0,5$  a  $1,5$  partes de zinc por parte de oro.

La cantidad agregada va a depender de la presencia de plata y de otros componentes disueltos en la solución. En esta etapa también se agrega el nitrato o acetato de plomo en una relación en peso de Pb/Zn de  $1/7$  –  $1/10$ , o en proporción a una cantidad cercana a  $0,5$  partes de sal de plomo por parte de oro.

La última operación es la separación del precipitado (cemento) de la solución empobrecida mediante el uso de filtros. La solución pobre se recircula a la planta de lixiviación y el precipitado o cemento, constituido esencialmente de oro, plata, zinc, plomo, se envía a la fundición para la elaboración del bullión.

En los procesos aplicados en el Ecuador, también se cementa el oro en tanques agitados sin eliminación del oxígeno disuelto, en este caso, los consumos de zinc, están en el orden de  $10 - 20 \text{ g de zinc /g de oro}$ . Es una técnica más sencilla, tiene buenas recuperaciones de oro de la solución, pero consume mayor cantidad de zinc. El tiempo de contacto es de aproximadamente 30 minutos.

Los sistemas de cianuración por percolación, utilizan cementación con cinc en virutas de  $0,5 \text{ cm}$  de ancho, colocadas en canastas de madera que se sumergen en la solución preñada a partir del décimo octavo día de

cianuración. Los consumos de cinc se estiman del orden de 50 gramos de viruta/gramo de oro. Los tiempos de cementación están entre 5 - 10 días. El cemento de cinc obtenido es refinado empleando principalmente ácido nítrico.

El proceso de cementación con cinc es ventajoso por su simplicidad y bajo costo, sin embargo se logra un metal recuperado es de baja calidad y por tanto se tiene un consumo en exceso del metal cementante.

#### **4.3.1. Factores que afectan la precipitación de oro con el cinc**

Varios factores afectan el proceso de cementación de una u otra manera, y de acuerdo al adecuado control de estos se tendrá un aumento o disminución en la eficiencia de precipitación de oro, estos factores son los siguientes:

- a. Concentración de oro en solución:** La razón de precipitación generalmente se incrementa con el aumento de la concentración de oro de la solución
- b. Concentración de cianuro:** El efecto general de la concentración del cianuro libre, en la práctica, afecta de manera leve a la precipitación, pero esto solamente hasta un valor determinado que depende de la concentración de oro y el pH.
- c. Concentración de zinc:** La reacción de disolución del zinc disminuye con el aumento de la concentración del ion de zinc, sin embargo, esto es relativo. Altas concentraciones de zinc pueden generar la formación de hidróxido de zinc insoluble, el cual puede pasivar la superficie del metal y reducir severamente la razón de precipitación.
- d. Tamaño de partícula del zinc:** Un incremento en la superficie disponible del zinc aumenta la velocidad de la reacción.

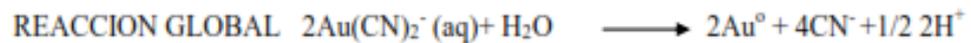
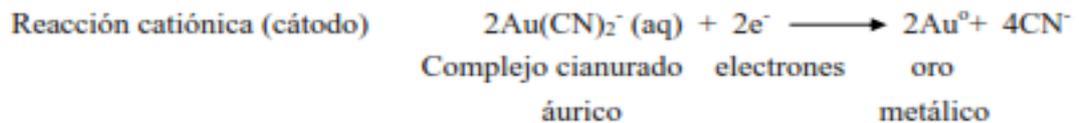
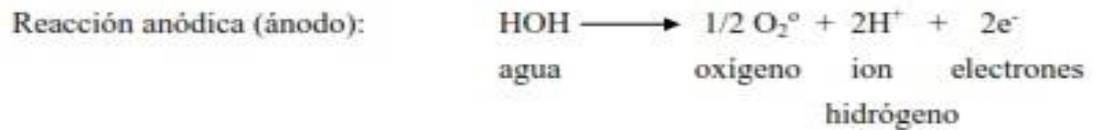
- e. **Temperatura:** La aceleración de la precipitación es evidente con el incremento de la temperatura. Por ejemplo el oro precipita en 2 horas a 35<sup>0</sup> C, y precipita en 24 horas a 20<sup>0</sup> C.
- f. **Oxígeno disuelto:** La presencia de oxígeno disuelto disminuye la cinética de la precipitación, pues la reducción de oxígeno compite con la reducción de oro, pero esto dependerá de la temperatura y de la concentración del metal precioso en solución.
- g. **pH. :** Se indica que el pH óptimo para la precipitación de oro, desde soluciones frías diluidas, está en un rango de 11.5 a 11.9
- h. **Efecto de ciertos iones metálicos pesados polivalentes:** El efecto benéfico de iones de plomo en la precipitación desde soluciones diluidas a baja temperatura es evidente; el Pb<sup>+2</sup> reduce a la superficie del cinc formando áreas cargadas catódicas de plomo metálico. Generalmente se usa de 0.001 a 0.01 g/l como óptimo en el proceso Merrill-Crowe. Un exceso de plomo disminuye la eficiencia debido probablemente a que el cinc se recubre de una capa de plomo.

#### 4.4. Recuperación de oro mediante electrodeposición.

La electrodeposición es el proceso por el cual se aprovecha el paso de la corriente eléctrica a través de una solución conductora para provocar la migración de las especies metálicas presentes (o cationes) hacia el polo negativo (o cátodo) de una celda electroquímica. Los cationes aceptan electrones y se depositan en forma metálica sobre el electrodo negativo o cátodo.

1. **Solución acuosa conductora:** que tiene en su seno, cationes que sirven de paso a la corriente eléctrica y electrones.
2. **Electrodos:** positivo o ánodo y negativo o cátodo. Estos electrodos están conectados directamente a los polos de una fuente de poder.

El momento en que circula corriente por el sistema, ocurren las siguientes reacciones en los electrodos:



Se denomina corriente catódica al paso de los electrones del cátodo al ánodo.

El proceso de electrólisis, está gobernado por las leyes de Faraday, que dicen:

**Primera Ley:** La cantidad de metal depositado en el cátodo es directamente proporcional a la cantidad de electricidad que atraviesa la celda

**Segunda Ley:** Una cantidad dada de electricidad deposita el mismo número de equivalentes químicos de la sustancia en el cátodo. Con:

$$\text{Peso equivalente} = \frac{\text{Peso atómico}}{\text{Valencia}}$$

El equivalente electroquímico de un metal, es el número de gramos del metal que son depositados en el cátodo por cada coulombio de electricidad que pasa por la celda. (1 coulombio = amp.seg)

La ley de Faraday establece que los equivalentes químicos son proporcionales a los equivalentes electroquímicos, siendo constante la

razón de proporcionalidad e igual a 96500 coulombios (= 26,81 Amperios. Hora) (constante de Faraday).

$$\# \text{Equivalentes químicos} = 96500 \times \# \text{ equivalentes electroquímicos}$$

Esto quiere decir, que usando una corriente de 1 Amperio x hora, se pueden depositar 2,4524 gramos de oro metálico.

Normalmente, hay pérdidas de corriente, debido a varios factores, por lo que se requiere aplicar un mayor voltaje que el requerido.

- Caída de voltaje debido a la resistencia interna de los electrodos, normalmente fabricados de metales.
- Caída de voltaje debido a la resistencia de los contactos eléctricos.
- Caída de voltaje debido a reacciones secundarias en el electrolito, provocadas por impurezas en la solución conductora.

La temperatura es un factor que influye en la eficiencia de corriente. Para el caso del oro, se recomienda trabajar a 80°C. En la tabla 1, se presentan los parámetros de operación de una celda para recuperación de oro.

**Tabla 7.** Condiciones operatorias para la electrodeposición del oro:

Elemento	Concentración de oro en solución (g/l)	Voltaje teórico (V)	Voltaje práctico (V)	Densidad de corriente (A/m <sup>2</sup> )	Material del ánodo	Material del cátodo
Oro	500 – 6000 mg/l	0,27	3 - 5	350 – 500	Acero Inox	Hierro

Al igual que existen varios procesos de desorción, también existen diversos diseños de celdas de electrodeposición del oro, a partir de la solución concentrada obtenida de la desorción del carbón. En términos generales, la electrodeposición del oro utiliza cátodos que pueden estar

constituidos de lana de acero ordinario, lana de acero inoxidable, planchas de acero inoxidable o de grafito; mientras que los ánodos son fabricados principalmente de acero inoxidable.

Condiciones de operación típicas en estas celdas son: un voltaje de celda entre 3 - 5 V, una densidad de corriente entre 350 - 500 Amp/m<sup>2</sup>, temperatura de 80°C, concentración de entrada de 500 ppm Au a 6 g Au/l, concentración de salida de la solución, 10 - 20 ppm Au. En este proceso se obtienen recuperaciones superiores al 99%.

### **Equipos y materiales**

**Celdas.** Son cubas o recipientes rectangulares de concreto en las cuales la profundidad siempre excede al ancho. Las celdas usualmente están revestidas de fibra o material plástico, resistente a la temperatura. Las tuberías de entrada y salida son de acero negro, acero inoxidable o material plástico. A lo largo de la celda están ubicados las barras conductoras de corriente, llamados también “busbars”.

**Ánodos.** Para la electrodeposición o electrorefinación de oro, lo usual es usar ánodos de acero inoxidable. Siempre se utiliza un ánodo más que el número de cátodos, por ejemplo, si se usan 6 cátodos, se usarán 7 ánodos.

**Cátodos.** Los cátodos pueden estar constituidos por una estructura de acero inoxidable, con esponja de hierro tejida en la estructura.

Los cátodos son introducidos en “cajas” o fundas de fibra o material plástico, agujereadas para favorecer el paso de la solución, necesarias para recoger el oro fino en polvo que se desprende de los cátodos.

Los cátodos de lana de acero son muy útiles por la alta superficie para precipitación que presentan. Teóricamente pueden cargar hasta 20 veces su peso de metales pesados,. Sin embargo, esto en la práctica no ocurre, considerándose que cargas de 1 – 2 kg Au/kg de lana de

acero. La cantidad de lana de acero empleada varía entre 5 – 15 g/l, aunque también se usó hasta 30 g/l.

La ventaja de usar mallas de acero inoxidable, reside en el hecho de que se usan y se rehúsan de manera ilimitada, además de la facilidad de limpieza del oro depositado, usando un cepillo de acero. La refinación del oro catódico, requerirá una mínima cantidad de ácido, dependiendo de las impurezas depositadas con el oro, principalmente cobre y mercurio

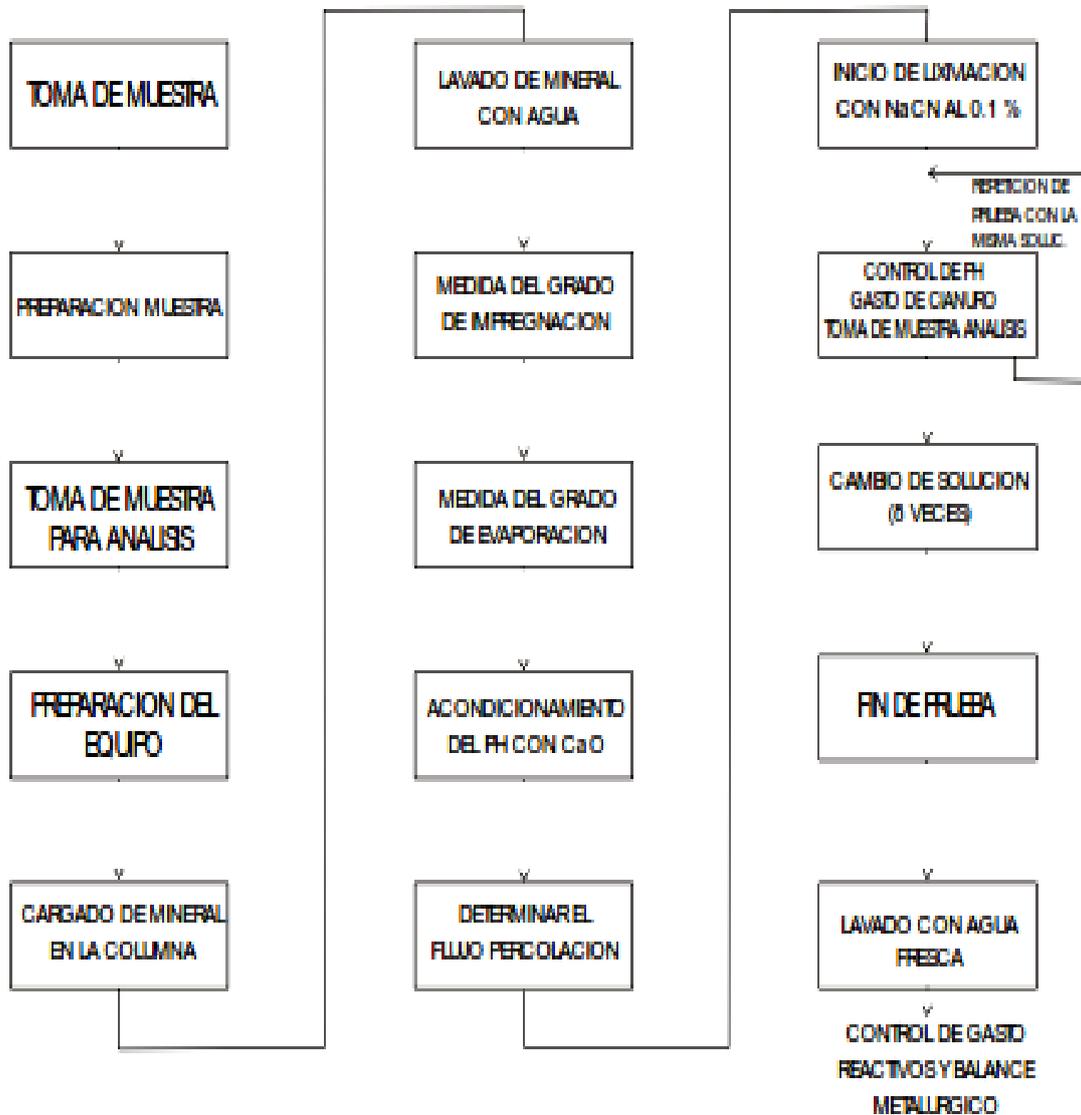
Ánodo: planchas de acero inoxidable de 40x40 cm., de 1/4" de espesor, con perforaciones de 1/4" cada cm., con un perno de bronce soldado en un extremo de la parte superior, para servir de conexión eléctrica con la barra conductora de electricidad.

Cátodos: varillas de acero inoxidable de 1/4" formando una estructura tipo trinche (3 patas unidas en la parte superior) con dimensiones de 40x40 cm., entrelazado o tejido con 30 g/l de lana de acero #1. Tiene también un perno de bronce soldado en un extremo de la parte superior, que sirve de conexión eléctrica con la barra conductora. El cátodo está protegido durante la operación, en una caja de goma o de fibra de 7 cm. de espesor, con perforaciones.

Celda electrolítica: caja rectangular de 1m x 45cm, de plancha de hierro negro de 1/4", recubierto interiormente por goma vulcanizada en frío. Esta celda está diseñada para 9 cátodos y 10 ánodos, separados entre sí cada 4 cm.

Barras de cobre de 3x85x0.6 cm, conductoras de corriente.

## PRUEBA DE CIANURACION EN COLUMNA SEMI PILOTO



## CONCLUSIONES

- El tamaño de partícula es determinante, muestran que a medida que disminuya el tamaño de la partícula aumenta la extracción, obteniéndose a 38 micrones, extracciones de 78,6% y 88,45% de oro respectivamente.
- Se estima trabajar con tamaños de grano de 38 micrones, ya que es posible obtener este tamaño mediante circuitos de molienda convencionales.
- La concentración de cianuro que ofrece los mejores resultados, es de 2gr/lit con 78,6% de extracción de oro.
- Y para la calcina la concentración de cianuro más óptima es de 2,5 gr/t con 87.82% de extracción de oro.
- La bibliografía recomienda utilizar una concentración inicial de cianuro es de 1 gr/lit para menas oxidadas, en cambio en las menas piríticas se aconseja duplicar esta concentración.
- En cuanto al hecho que a mayores concentraciones se obtengan menores extracciones de los metales preciosos, porque el oro forma compuestos áuricos, razón por la cual la extracción de oro disminuye. Actualmente esta demostrado que la concentración inicial de cianuro sólo influye en el tiempo de extracción, por cuya razón a altas concentraciones disminuye la velocidad de disolución del oro. Sin embargo, un sistema debe encontrarse en equilibrio químico, por lo cual, a determinadas concentraciones de cianuro, las propiedades físicas se hacen constantes con el transcurso del tiempo.
- El pH más recomendable en la extracción de oro se efectúa a pH 10.5, disminuyendo la extracción conforme aumenta el pH. Probablemente este hecho se deba a que al aumentar el pH, se incrementa la presencia de iones sulfuro ya que los iones oxidrilos descomponen a la pirita para formar el  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  que es estable en soluciones alcalinas.

- El proceso experimental realizado es solamente una de las alternativas posibles de aplicar el proceso de cianuración, ya que éste puede ir combinado con otro que haga en lo posible lograr una mejor optimización de las variables.
- La granulometría debe de ser lo más óptima posible dejando la mayor superficie de contacto con la solución lixivante. Siendo ésta variable una de las más negativas del proceso desarrollado, por que se nota que en las partículas gruesas está la mayor cantidad de valores retenidos sin disolver.
- Además cuando hay mucho fino, también es un factor negativo, porque estos con el tiempo se asientan en el fondo de la columna de mineral y no deja circular la solución lixivante.

## BIBLIOGRAFÍA

- COLLADO Lara, (1992) Ramón. Depuración de Aguas Residuales en Pequeñas Comunidades, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid.
- CANTER, L. W. 1998. Manual de evaluación de impacto ambiental. Técnicas para la elaboración de estudios de impacto. Madrid: McGraw-Hill. 841 p.
- CONESA Fernández, Vicente. (1993=). Guía Metodológica para la Evaluación del Impacto Ambiental, Ediciones Mundo y Prensa, Madrid.
- ESTEVAN B., M.T. 1999. Metodologías para la elaboración de las evaluaciones de impacto ambiental. En: *Master en Evaluación de Impacto Ambiental. Volumen 3*. Málaga: 75-224 pp. Instituto de investigaciones ecológicas. Madrid
- GÓMEZ O., D. 1999. Evaluación del impacto ambiental. Un instrumento preventivo para la gestión ambiental. Madrid: Mundi-Prensa & Editorial Agrícola Española. 701 p.
- MARTINEZ, Juan (2007). Evaluación ambiental de los sistemas de lagunas para el tratamiento de aguas residuales. Monografía Para Optar el Título de Ingeniero civil, Universidad DE Sucre, Venezuela.
- METCALF y Eddy. (1995). Ingeniería de Aguas Residuales Vol1, Mc Graw Hill, Madrid.
- OROZCO, A. (1989). Manual sobre Digestión Anaerobia, Capítulo I:Generalidades. Presentado en “Seminario Internacional sobre Digestión Anaeróbica - Elementos de Diseño”. Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.
- QUIROZ, Pedro (2009). Planta de tratamiento de aguas residuales para regadío en la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Químico. Lima - Perú
- SANZ C., J.L. 1991. Concepto de impacto ambiental y su evaluación. En: *Evaluación y corrección de impactos ambientales*. Madrid: Instituto Tecnológico Geominero de España. 302 p.

SOUZA, M. (1997). Metodología de Análisis de Decisiones para Seleccionar Alternativas de Tratamiento y Uso de Aguas Residuales. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Brasilia. Brasilia- DF, Brasil.

TCHOBANOGLIOUS George y Crites. (2000). Tratamiento de Aguas Residuales en pequeñas poblaciones. McGrawHill, Santafé de Bogotá.

## **Revistas**

Constitución Política del Perú (1993)

RAS (2000). Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico, Ministerio de Medio Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, Bogotá D.C.

## **FUENTES ELECTRONICAS**

<http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Aguas servidas&oldid=3782127>  
[fing.javeriana.edu.co/ingenieria/dep\\_ing\\_civil/profesores/jlara/ic133/acetato.pdf](http://ing.javeriana.edu.co/ingenieria/dep_ing_civil/profesores/jlara/ic133/acetato.pdf), Tratamientos Naturales de Aguas Residuales.

[http://ab.dip-caceres.org/alcantara/alcantara\\_online/55/55\\_005b.htm](http://ab.dip-caceres.org/alcantara/alcantara_online/55/55_005b.htm)

<http://www.es.irc.nl/page/26728>

<http://www.cdmb.gov.co/tratamie.php>

# ANEXOS

## ANEXO 04.- MATRIZ DE CONSISTENCIA

PROBLEMA	OBJETIVO	HIPÓTESIS	VARIABLES	INDICADORES	METODOLOGÍA
<p><b>PROBLEMA GENERAL</b></p> <p>¿ Es posible un estudio metalúrgico del proceso de cianuración para mejorar y recuperar minerales de oro y plata utilizados en la minería artesanal?</p> <p><b>PROBLEMA ESPECÍFICO</b></p> <p>a) ¿Cuáles son las propiedades del mineral que se tratara en la cianuración por diferentes procesos?</p> <p>b) ¿Cómo conocer el proceso productivo, fundamentalmente en las características de la solución, el contenido de oro y plata, con la finalidad de que este proceso sea metalúrgicamente eficiente al más bajo costo?</p> <p>c) ¿Cómo considerar las principales técnicas para la lixiviación y recuperación de oro que se utilizan en la actualidad.?</p>	<p><b>OBJETIVO GENERAL</b></p> <p>Establecer el estudio metalúrgico de minerales oro y plata del sector Tulin, Región Ica a fin de obtener un proceso productivo óptimo</p> <p><b>OBJETIVO ESPECIFICO</b></p> <p>a) Describir las propiedades del mineral que se tratara en la cianuración por diferentes procesos</p> <p>b) Evaluar el proceso productivo, fundamentalmente en las características de la solución, el contenido de oro y plata, con la finalidad de que este proceso sea metalúrgicamente eficiente al más bajo costo</p> <p>c) Presentar las principales técnicas para la lixiviación y recuperación de oro que se utilizan en la actualidad.</p>	<p><b>HIPOTESIS GENERAL</b></p> <p>Mediante un estudio metalúrgico detallado y práctico se establecerá el comportamiento del cianuro para los diferentes minerales que utilizan los mineros artesanales como materia prima.</p> <p><b>HIPOTESIS ESPECIFICOS</b></p> <p>a) Se determinará el grado de molienda del mineral para liberar el oro y la plata en estado libre</p> <p>b) Nos permitirá determinar la cinética de cianuración del mineral (tiempo de residencia), la concentración adecuada de cianuro, el consumo de cianuro y cal requeridos en el proceso.</p>	<p><b>PROCESO DE CIANURACION (VI)</b></p> <p>Es una técnica <u>metalúrgica</u> para la extracción de <u>oro</u> de <u>mineral</u> baja calidad, que busca convertir el oro</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Acidificación y recuperación del HCN</li> <li>➤ Oxidación del cianato</li> <li>➤ Destrucción del cianuro</li> <li>➤ Por agitación</li> <li>➤ En pila o montón</li> <li>➤ Intensivas o en tinas</li> </ul>	<p>➤ <b>Descriptivo</b> con la intención de especificar las propiedades y características del objeto estudiado intentando exponer como se manifiesta de forma general el fenómeno, respecto a las variables de proceso de cianuración y obtención de oro y plata</p> <p>➤ <b>Transversal</b> puesto que se recolectaran los datos en un determinado período de tiempo, según un cronograma</p> <p>➤ <b>Diseño no experimental</b></p>
			<p><b>ORO Y PLATA (VD)</b></p> <p>Obtención de oro y plata</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Tostación oxidante</li> <li>➤ Calcinas oxidadas</li> <li>➤ Análisis granulométrico</li> <li>➤ Residuo final</li> </ul>	

**“EVALUACION DEL PROCESO PRODUCTIVO DE ORO POR  
CIANURACION Y LIXIVIACION EN LA PLANTA PILOTO TULIN,  
NAZCA, 2017”**

.....  
M(o). GUERRA LAZO, CAYO EDUARDO  
Presidente

.....  
M(o). IPANAQUE ROÑA, JUAN MANUEL  
Secretario

.....  
M(o) RODRIGUEZ ESPINOZA, RONALD  
FERNANDO.  
Vocal

.....  
Dr. RUIZ SANCHEZ, BERARDO BEDER  
Asesor