

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE NICARAGUA
RECINTO UNIVERSITARIO “RUBÉN DARÍO”
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍAS
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA Y FARMACIA**



**MONOGRAFÍA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
LICENCIADO EN QUÍMICA**

TEMA:

**LIXIVIACIÓN DE MINERALES AURÍFEROS POR AGITACIÓN CON SALES
DE CLORURO Y NITRATO DE SODIO EN MEDIO ÁCIDO, VERSUS
CIANURACIÓN, EN IBEROMINAS, SOMOTILLO, MUNICIPIO DE
CHINANDEGA – NICARAGUA. FEBRERO 2008.**

Autores:

Br. José Adán Rodríguez
Br. Renato José Reyes Valverde.

Tutora:

Lic. Elvis María Jiménez Peralta.

Asesora:

Máster María Nathalia Gutiérrez Arias.

Managua, Nicaragua Septiembre del 2010.

Índice

	Pág.	
Dedicatoria	i	
Dedicatoria	ii	
Agradecimiento	iii	
Resumen	iv	
 Capítulo I: Aspectos Generales		
1.1	Introducción	1
1.2	Antecedentes	4
1.3	Justificación	6
1.4	Objetivos	9
 Capítulo II: Marco Teórico		
2.1	Marco Teórico	10
2.1.1	Propiedades Físicas y Químicas del oro	11
2.1.2	Mineralúrgica	12
2.1.3	Operaciones y procesos metalúrgicos	14
2.1.4	El proceso de gravimetría-amalgamación	16
2.1.5	Proceso de cianuración convencional	22
2.1.6	Lixiviación con sales oxidantes en medio ácido	30
2.1.7	Análisis del oro en muestras geoquímicas	46
2.1.7.1	Ensayo por fuego	46
2.1.7.2	Espectrometría de absorción atómica	57
 Capítulo III: Hipótesis		
3.1	Hipótesis	75
 Capítulo IV: Diseño Metodológico		
4.1	Diseño Metodológico	76
4.1.1	Ubicación geográfica del estudio	76
4.1.2	Tipo de estudio	76
4.1.3	Universo de estudio	76
4.1.4	Muestras	77
4.1.5	Selección de muestra	77
4.1.6	Definición operacional de variables	78
4.1.7	Materiales para recolectar la información	78
4.1.8	Materiales para procesar la información	79

4.1.9	Métodos según el tipo de estudio	79
4.1.10	Equipos, reactivos y método	80
Capítulo V: Discusión y Análisis de los Resultados		
5.1	Discusión y análisis de los resultados:	104
Capítulo VI: Conclusiones		
6.1	Conclusiones	113
Capítulo VII: Recomendaciones		
7.1	Recomendaciones	114
Capítulo VIII: Bibliografía		
8.1	Bibliografía	116
Capítulo IX: Anexos		
9.1	Anexos	118
9.2	Glosario	

Dedicatoria.

A mi padre Dios:

A mi padre omnisciente, omnipotente y omnipresente que es creador de la materia y de todo lo que existe en el mundo. “Por darme la fuerza necesaria para vencer los obstáculos encontrados en el camino de la vida, por guiarme en el sendero correcto y ser una persona de bien, regalarme el don del entendimiento, por no dejarme desfallecer y permitirme finalizar mis estudios”.

A mis padres:

“Por su esfuerzo y sacrificio para darme todo lo necesario para completar mis estudios, quienes son sus buenos ejemplos y sabios consejos han formado en mi lo que ahora soy”.

A mi familia:

“Por brindarme su apoyo, necesario para lograr mi meta”.

Y a todos aquellos que creyeron en mi y no me dejaron desistir de mis sueños.

Renato José Reyes Valverde

Dedicatoria.

“A mi madre que se ha esforzado por hacer de mi un hombre estudiado y ha incentivado a andar el camino del conocimiento”

“A mi hija, Johanna Priscilla, mi tesoro más preciado que es acicate para la toma de nuevos retos en mi vida”.

“A mis hermanos que me apoyaron y exhortaron siempre con su ejemplo la disciplina de la responsabilidad y el estudio”

“Al ingeniero Severo Palacios Calizaya de origen peruano, quien me motivo e inspiró a sumergirme en este bello mundo de la metalúrgica y enseñarme que si existen nuevas formas más loables de extraer los metales nobles de la tierra sin impactar negativamente en ella”

“A todos mis profesores que dieron parte de su tiempo y atención para enriquecer mis sentidos con el bello mundo de la ciencia”

“A todas aquellas personas que de una forma u otra tuvieron que ver en mi formación”

José Adán Rodríguez

Agradecimientos.

Agradecemos a la licenciada Elvis María Jiménez Peralta, a la máster Nadia Natalia Gutiérrez Arias y al máster Ramón Cáceres Centeno, por habernos brindado parte de su valioso tiempo y el apoyo incondicional del cual contamos siempre para la realización de esta tesis.

Agradecemos a nuestras familias por habernos dado la confianza y el beneplácito a las decisiones tomadas con respecto a nuestra formación, y a todas aquellas personas que tuvieron participación en la culminación de esta etapa de nuestra vida académica.

Resumen.

El proceso de beneficio de mineral aurífero para la recuperación de Oro y Plata tradicionalmente se ha realizado por las técnicas de amalgamación con uso de Mercurio y por lixiviación con el uso de la sal de cianuro de sodio. El método de amalgamación es una técnica que además de ser un proceso poco eficiente es muy contaminante. Por otra parte la lixiviación con cianuro de sodio, el uso de esta sal requiere una manipulación muy cuidadosa debido a su alta toxicidad. En este trabajo se aborda el método de lixiviación con cianuro de sodio en condiciones óptimas, comparado con la lixiviación con sales oxidantes, las cuales representan una alternativa de futuro para el procesamiento de minerales auríferos con mejores rendimientos.

Para la realización de estos ensayos se hizo uso del sistema de agitación en botellas por rodos, y para la realización de los análisis se aplicaron los métodos de ensayo al fuego en las muestras sólidas y espectrometría de absorción atómica en líquidos

Para el procesamiento de los datos se hizo uso del programa estadístico STATGRAPHICS plus, el cual permitió el diseño experimental y la modelación del proceso de lixiviación con sales oxidantes, además que facilitó encontrar las condiciones óptimas de lixiviación del Oro.

1.1 Introducción

En todos los tiempos el Oro, ha despertado el interés humano porque este metal ha sido empleado principalmente con fines monetarios o decorativos.

Su rareza e inalterabilidad han hecho de él, un símbolo de riqueza y poder.

El Oro se encuentra en minerales tales como las calcitas, calizas, riolitas graníticas, compuestos de azufre metálico, depósitos de carlín, minerales refractarios atrapados con carbón y pirita, generalizaciones de clorita y en rocas sedimentarias, la Plata y el Cobre son elementos que acompañan con frecuencia la mineralogía del Oro.

El Arsénico proveniente de la pirita Arsenical, el Antimonio, Bismuto, Hierro, Plomo y Zinc están generalmente asociados con las menas del metal valioso. ¹

Para obtener una mayor recuperación de este valioso metal, los minerales deben de ser molidos para liberar la mayor cantidad de partículas de Oro y así de esta manera puedan reaccionar más rápido con los reactivos encargados de esta función.

La pequeña minería y la artesanal, hacen uso excesivo del mercurio,

¹ P. C. Severo, Gallego P Edwin, *Workshop Práctico del Oro*, Editorial INEA, 1ª Edición, Perú, 2004. Páginas 16, 17, 18.

popularmente conocido como azogue. El cianuro es por excelencia un veneno natural en pequeñas dosis y es empleado para la lixiviación de minerales ya que forma sustancias complejas con el Oro y la Plata, las cuales son separadas por diferentes métodos posteriormente.

Para el caso de minerales refractarios, estos deben de ser tratados generalmente por lixiviación, pero, al ser tratado por lixiviación convencional (cianuro de sodio), da pocos rendimientos de oro. Se tienen minerales refractarios, arseniosos, sulfurosos, o asociados con diferentes sustancias que representan problemas en el procesamiento o beneficio de los mismos.

Las sales oxidantes en medio ácido, tecnología desarrollada por el ingeniero Severo Palacio Calizaya de origen peruano, son una alternativa viable para procesar estos minerales ya que las mismas reaccionan con el Oro y la Plata para formar compuestos complejos estables, independientemente de la presencia de minerales refractarios, los cuales son objeto de problemas en los procesos de amalgamación y Cianuración.

En este trabajo, abordaremos el tema de lixiviación con sales oxidantes en medio ácido, versus la lixiviación con cianuro de sodio con el fin de demostrar que se pueden aplicar técnicas nuevas que son más amistosas con la naturaleza.

Para la realización de este estudio se cuenta con el beneplácito del ingeniero Severo quien ha autorizado y ha dado la representación de la patente del proceso así como se muestra en el anexo del presente trabajo.

1.2 Antecedentes

En toda la historia de la minería, se han venido usando métodos de explotación que implican el uso de sustancias químicas que son nocivas al medio ambiente por la contaminación que provocan a éste.

En la pequeña minería, la sustancia utilizada para recuperar el Oro, es el mercurio, como medio amalgamador. El mercurio es una sustancia que ataca tanto al individuo que está en contacto directo con el mismo, así, como al medio ambiente. En Europa el uso del mercurio ha sido prohibido para la elaboración de termómetros y barómetros, precisamente por los daños que ocasiona a la salud.

En el caso de la gran minería, la sustancia más conocida para la extracción del Oro, es el cianuro de sodio, del cual se conoce que la dosis letal mínima permitida por la Organización Mundial Para La Salud (OMS) es de 0.005 ppm en mantos acuíferos.

En las industrias mineras se manejan concentraciones de cianuro libre en el orden de 250 a 500 ppm. Con independencia que se manejen las mayores precauciones, cuidados, y planes de contingencia en la manipulación y usos de este reactivo, siempre existe un peligro latente ante cualquier accidente.

Ahora, desde el punto de vista de recuperación, para el caso de la Cianuración en condiciones normales de temperatura y de presión son bajos. Para el caso de la Cianuración directa con lavado en contra corriente es del 75 % promedio, y en el caso de la amalgamación con azogue es del 55 %.

En América del Sur, países como Chile, Argentina y Perú ya está incursionando en procesos alternativos como las sales oxidantes, que reportan mejores recuperaciones y que van más acorde con el medio ambiente. Esta es una tecnología desarrollada por el ingeniero peruano Severo Palacios Calizaya quien nos ha dado el beneplácito para corroborar el método. Por otra parte los reactivos que aquí participan son el cloruro de sodio (NaCl), nitrato de sodio o de amonio (NaNO_3 o NH_4NO_3) y ácido sulfúrico (H_2SO_4). Todas estas sustancias son de calidad industrial y fertilizantes.

Una de las razones por la cual se restringe el uso del cianuro de sodio para obtener mejores rendimientos en la pequeña minería, está dado por su alta toxicidad a bajas concentraciones. A diferencia del cianuro, el cloruro y el nitrato de sodio no son letales ni peligrosos en su manipulación, son excelentes lixiviantes, y además los productos residuales son otras sales que pueden ser usadas como fertilizantes.

1.3 Justificación

Desde el punto de vista ambiental y económico es necesario el estudio de otras alternativas de beneficio de minerales auríferos de forma tal que sean viables y no ocasionen daños al medio ambiente. Por tal motivo se deben de realizar una serie de estudios desde el punto de vista físico, químico y analítico para contribuir al conocimiento científico y así obtener un espectro de posibilidades más amplio sobre los métodos y técnicas a utilizar para el beneficio en la minería.

Con el uso y desarrollo de nuevas tecnologías para la explotación del Oro, se pueden llegar a lograr mejores rendimientos, pero además, procesos de beneficios que vayan de la mano con la naturaleza, y así no dañar el medio ambiente.

En la actualidad, hablar de minería, es lo mismo que hablar de contaminación e impacto al medio ambiente en su conjunto. Esto ha generado desconfianza en diferentes sectores de la sociedad para incentivar esta actividad que es parte importante de la economía. Hay que recordar que muchos países de la región, tienen grandes potenciales mineros y una larga trayectoria en esta actividad y no se les apoya por parte de los gobiernos.

Por otro lado, se critica la actividad minera, pero tampoco se les brindan alternativas loables para desarrollarla.

En el caso específico de nuestro país y de la pequeña minería, se trabaja en condiciones infrahumanas y paupérrimas, debido a la poca importancia y desconfianza que genera el gremio, pero no se toma en cuenta que este sector aporta una gran cantidad de onzas de oro a la economía de Nicaragua. Si este sector se llegara a tecnificar con formas armoniosas con la naturaleza, humanizaríamos el trabajo minero y habría un mayor aporte a la economía de las familias de este sector y del país.

Las sales de cloruro de sodio y nitrato de sodio o amonio representan una forma de poder procesar minerales auríferos con altos porcentajes de recuperación, bajos costos de procesamiento, y sin contaminación al medio. Estas sales en medio ácido trabajan espontáneamente con liberación de energía que es aprovechada para aumentar los niveles de lixiviación.

Por otra parte los reactivos que aquí se usan no representan un peligro tan grande como el cianuro de sodio y el Mercurio. Además para el caso del cloruro de sodio el cual es el más utilizado es consumido en los alimentos como parte de la dieta de las personas y muchos animales. Este se encuentra en las minas de sal y es de muy bajo costo. Para el caso del nitrato de sodio o de amonio, es de tipo fertilizante, el cual también es inocuo y de bajo costo.

Debido a estas circunstancias se realizará un estudio con broza procedente del yacimiento El Danto, ubicado en Somotillo, Chinandega, para evaluar la

eficiencia de lixiviación con sales oxidantes en medio ácido para compararlo con la lixiviación en soluciones cianarudas.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Estudiar el comportamiento de la lixiviación del Oro con sales oxidantes en medio ácido, y la determinación de las condiciones óptimas de recuperación con la aplicación de un programa estadístico, así como también comparar su eficiencia de extracción con soluciones cianuradas, haciendo uso de mineral del yacimiento El Danto, ubicado en la Comarca El Danto con coordenadas UTM 525700E, 14465N, Somotillo, Municipio de Chinandega, en el mes de Febrero del año 2008.

1.4.2 Objetivos Específicos

- 1.4.2.1** Evaluar la recuperación de Oro haciendo uso de sales oxidante con mineral del yacimiento El Danto para diferentes proporciones de reactivos.
- 1.4.2.2** Determinar las condiciones óptimas de lixiviación mediante el uso del programa estadístico STATGRAPHICS plus.
- 1.4.2.3** Comparar las capacidades de lixiviación de las sales oxidante en medio ácido y la lixiviación del cianuro de sodio en condiciones óptimas con mineral del yacimiento El Danto.

2.1 Marco Teórico

La Cianuración es una tecnología que se utiliza desde hace 100 años en la recuperación de Oro primario, sobre todo en la minería grande y mediana. En la pequeña minería, su uso es bastante nuevo. Debido a que algunos materiales auríferos (Oro refractario o fino) no pueden ser concentrados satisfactoriamente por ningún método gravimétrico. En los últimos años el empleo de la Cianuración se ha difundido bastante en la pequeña minería aurífera de los países andinos.

Al margen de sus indudables ventajas de alta recuperación, la Cianuración, empleada rústicamente, puede causar y está causando un grave impacto ambiental. El cianuro es altamente tóxico. Sin embargo, al contrario del mercurio, el cianuro es biodegradable. El caso de que el cianuro sea biodegradable, no justifica que deje de ser peligroso debido a su alta toxicidad.

Por eso es que están surgiendo nuevas tecnologías para extraer el Oro de los minerales con mejores rendimientos, menos costos, y menos impacto al medio ambiente. Entre estas nuevas formas de extracción se encuentran el uso de las sales oxidantes como el cloruro de sodio y el nitrato de sodio o amonio, las cuales se usan en grado de fertilizantes. Estas sales se hacen reaccionar en medio ácido con el propósito de producir agua regia in situ.

2.1.1 Propiedades físicas y químicas del oro²

Físicas:

- Su símbolo es Au
- Su número atómico es 79
- El peso atómico es 197.2 g/mol
- El punto de fusión es 1063 °C
- Su punto de ebullición es de 2970 °C
- El Oro es maleable y dúctil,
- Es blando,
- Su dureza es de 3 Mohs.
- La densidad es de 19.3 g/cm³,
- Cristaliza en sistema cúbico.

Químicas:

- El oro es fácilmente soluble en agua regia, que produce cloro nascente.
- El oro se disuelve en ácido clorhídrico concentrado en presencia de sustancias orgánicas.
- Se disuelve en cloruros férricos y cúpricos.
- Es soluble en soluciones de carbonatos de sodio al 10 % y cianuradas.

² Módulos de capacitación técnico-metalúrgico-ambiental, SACC Ingenieros SRL, Mollehuaca Ica, Lima, Perú, 2004, paginas 2, 3.

2.1.2 Mineralurgia

El Oro es susceptible de existir en cercanías geológicas relativamente variadas (rocas sedimentarias, vetas intraplutónicas, o periplutónicas). Es químicamente inerte en ambientes naturales y es poco afectado durante el intemperismo y por la roca que lo contiene.³

Tipos de yacimientos:

Vetas de cuarzo con Oro:

Los placeres jóvenes compuestos por areniscas y grava no consolidada, están en los cauces de los ríos. Los placeres fósiles o antiguos se forman en el precámbrico que han sido litificados o conglomerados.⁴

Oro diseminado:

En estos yacimientos las rocas albergantes son calizas dolomíticas o carbonáceas, el oro está diseminado en tamaños de 0.1 – 10 micrones.⁵

Oro como subproducto:

Con otros metales como la plata, el cobre, y el plomo.⁶

^{3, 4, 5, 6} Módulos de capacitación técnico-metalúrgico-ambiental, SACC Ingenieros SRL, Mollehuaca Ica, Lima, Perú, 2004, página 3.

Minerales del Oro:

El Oro se encuentra comúnmente en estado nativo y se puede presentar en venas y filones de cuarzo, en placeres y depósitos aluviales.

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 electrum, Oro cuprífero.

El Oro en otros minerales, como producto secundario, se encuentra con las especies como: Plata, Cobre, Arsénico, Plomo, y Antimonio.

El Oro asociado a la piritita y a la arsenopiritita se encuentra 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 aluvial en forma de pepitas, el Oro filoniano en forma de escamas o hilos, hasta un tamaño no menor de 200 a 10 micrones, y el Oro ultra fino, que está libre o encapsulado y su tamaño es menor a 10 micrones.

El tratamiento de los minerales de Oro se basa fundamentalmente, en sus propiedades, su alto peso específico, su carácter hidrofóbico, su solubilidad en soluciones cianuradas, y soluciones salinas en medio ácido. Todas estas características dan lugar a varios esquemas o escenarios de tratamientos metalúrgicos para recuperarlo.

2.1.3 Operaciones y Procesos Metalúrgicos

Antes de cualquier tratamiento para la recuperación del Oro hay que incurrir en las operaciones de reducción de tamaño. Estas operaciones comprenden el chancado, molienda y clasificación.

El tamaño de grano del Oro libre y el grado de asociación del mismo con otros minerales, es determinante en la selección del proceso metalúrgico a seguir. Tradicionalmente se conocen en la actualidad tres grandes procesos adecuados: La gravimetría, la flotación, y la Cianuración.

Esto no quiere decir que estos sean los únicos procesos para su extracción, por supuesto que al igual que todo, la tecnología en la minería avanza, tal es el caso de la lixiviación con sales oxidante en medio ácido. El término de sales oxidantes y la técnica de extracción son relativamente nuevos.

El Oro denominado “**Grueso**” es sometido a procesos gravimétricos, el fundamento de la gravimetría se basa en el alto peso específico del oro para su separación. Hay equipos que vienen diseñados con el objeto de recuperar solamente el Oro libre.⁷

El Oro denominado “**Fino**” y “**Ultra Fino**” si está totalmente libre y expuesto, lo más conveniente es el proceso de Cianuración convencional. Si el Oro está asociado íntimamente con los sulfuros, entonces se aplica la flotación convencional para recuperar los sulfuros que lo acompañan. La otra alternativa y que es motivo de nuestro estudio es la de lixiviar estos minerales con sales oxidantes en medio ácido, este tema lo detallaremos mas adelante.⁸

La decisión de realizar la “liberación del metal” depende exclusivamente de evaluación económica que se haga del proceso que se aplique. Esta “liberación” pasa por una evaluación costo-beneficio, y de acuerdo a esta decisiones se practican los procesos de gravimetría, la Cianuración o en nuestro caso de estudio la lixiviación con sales oxidantes en medio ácido.

A continuación expondremos los fundamentos básicos de la gravimetría, la Cianuración y la lixiviación con sales oxidantes en medio ácido.

^{7, 8} Módulos de capacitación técnico-metalúrgico-ambiental, SACC Ingenieros SRL, Mollehuaca Ica, Lima, Perú, 2004, pagina 3.

.2.1.4 El Proceso Gravimétrico y Amalgamación

Gravimetría:

La gravimetría es un proceso metalúrgico de concentración de metales y/o minerales pesados, que se basa en la diferencia de densidad entre la mena pesada (oro, galena, cerusita, etc.) y la ganga que es liviana que son los estériles (óxidos de hierro, sílice etc.).⁹

Amalgamación:

La amalgamación consiste en poner en contacto el metal Oro o la Plata con el Mercurio líquido para formar una amalgama, es decir una aleación de Mercurio-Oro-Plata, dando lugar a partículas de metal revestidas de Mercurio, las partículas amalgamadas se adhieren unas a otras, para formar una mayor llamada amalgama.

El Mercurio:

Es el único metal que a temperatura ambiente se encuentra en estado líquido, su nombre proviene de *Hidrargyrium*, su símbolo es Hg, su peso específico es

⁹P. C. Severo, Gallego P Edwin, *Workshop Práctico del Oro*, Editorial INEA, 1ª Edición, Perú, 2004. Páginas 56.

de 13.5 g/cm³, su punto de fusión es de 39 °C y su punto de ebullición es de 357 °C. El Mercurio no reacciona con los ácidos clorhídrico y ácido sulfúrico, pero si con el ácido nítrico. Este forma amalgama con todos los metales comunes con excepción del hierro y el platino.¹⁰

Consecuencias del uso de mercurio:

Durante el proceso de Gravimetría-amalgamación se introduce Mercurio metálico al ambiente en:

- Los relaves de amalgamación producidos durante el deslamado.
- Durante la preparación de la amalgama hasta obtener la amalgama sólida.
- Durante el proceso de refogado al sopletar la “bola de amalgama”

Tanto el Mercurio líquido como sus vapores condensados, terminan en los cursos de agua, y por acción de los microorganismos acuáticos se transforman en compuestos altamente tóxicos, uno de los cuales es el metilmercurio, que es fácilmente absorbido a través de la piel, vía respiratoria y vía gastrointestinal.

El Mercurio ataca el sistema nervioso central de los seres humanos produciendo alteraciones motoras (ataxias) y sensoras (ceguera y sordera) de

¹⁰ Módulos de capacitación técnico-metalúrgico-ambiental, SACC Ingenieros SRL, Mollehuaca Ica, Lima, Perú, 2004, página 5, 7-8.

carácter irreversible. Generalmente este metal no mata inmediatamente, pero el envenenamiento es gradual, crónico e irreversible.

Los síntomas de envenenamiento por el Mercurio son los siguientes: cólicos, calambres abdominales, diarreas, falta de apetito, desgano, inflamación y sangramiento de las encías, disminución de la visibilidad hasta la ceguera, temblores musculares, irritabilidad, afectación del sistema nervioso, y estado anímico depresivo.¹¹

Reglas de seguridad para el uso de mercurio:

- No verter ni utilizar en canaletas gravimétricas.
- Al amalgamar, no permitir que este entre en contacto con la piel.
- No ingerir alimentos, ni fumar cuando se utilice Mercurio.
- No usar recipientes que hayan contenido mercurio para guardar alimentos y bebidas.
- No guardarlo en las casas y alejarlo de los niños, y mujeres embarazadas.
- Para quemar el Mercurio utilizar las retortas.

¹¹ Módulos de capacitación técnico-metalúrgico-ambiental, SACC Ingenieros SRL, Mollehuaca Ica, Lima, Perú, 2004, página 7-8.

Operaciones metalúrgicas de gravimetría y amalgamación:

Operación de gravimetría:

El mineral es molido hasta alcanzar 75 micrones, en circuito cerrado de molienda y clasificación, la pulpa obtenida es diluida entre un 5 – 20 % y es concentrado en los concentradores como: Canaletas, concentradores Knelson, concentradores Knudsen, concentradores de espiral, jibs, mesas vibratorias, en las que se obtienen dos productos: Un concentrado de Oro hasta del 0.1 % de alimentación inicial y un relave de gravimetría con contenido de Oro fino que no son recuperables por este método.¹²

Operación de amalgamación:

El concentrado de alta ley en Oro obtenido en la gravimetría, se mezcla con el Mercurio líquido en un molino amalgamador con una carga mínima de bolas de acero, con una dilución de agua 2/1 y un pH=12, puede ser discontinuo o continuo, la amalgama líquida de Oro-Mercurio se separa de la pulpa con agua a presión en contracorriente, la amalgama líquida es escurrida con un filtro a presión con aire, la amalgama sólida (en la que están en proporcione de 1:3 el Oro y el Mercurio), es sometido a fuego dentro de una retorta para sublimar el

¹² Módulos de capacitación técnico-metalúrgico-ambiental, SACC Ingenieros SRL, Mollehuaca Ica, Lima, Perú, 2004, página 5, 7-8.

Mercurio y obtener el Oro refogado o esponja de oro, con una pureza que dependerá de la presencia de Plata en la bola de oro. El Mercurio es recuperado para ser usado nuevamente.¹³

Operación de gravimetría y amalgamación en el método artesanal:

Los mineros artesanales procesan el mineral directamente en molinetes, rastras, y molinos rústicos, aquí se les adiciona el Mercurio líquido y agua. Después de un tiempo de mezclado, se deslama (separación de las arenas o lodos de la amalgama de Oro-Plata-Mercurio) la mezcla quedando en el fondo lo más pesado, que es la amalgama de Mercurio con oro y Plata.

Posteriormente se retira la amalgama haciendo uso del método de paneo, se limpia de las impurezas de ganga y se exprime con una tela fina (telas de sombrías generalmente), quedando así la amalgama sólida que a continuación es sopleteada para eliminar el Mercurio.

Este método de eliminar el Mercurio con sopletes o quemarlo en fuego expulsa el Mercurio al medio ambiente.

Cuando la amalgama es quemada con leña se le ponen hojas de higuera para absorber el Mercurio. Al final se obtiene el Oro refogado.

¹³ *Módulos de capacitación técnico-metalúrgico-ambiental, SACC Ingenieros SRL, Mollehuaca Ica, Lima, Perú, 2004, página 7-8.*

Todas estas operaciones de obtención de Oro refogado, en cada una de las etapas, se da una alta contaminación con Mercurio, cuyo mayor porcentaje de pérdidas están en los relaves de amalgamación, que son amontonados cerca de las viviendas, originando así, una gran contaminación en los lugares en donde habitan personas.¹⁴

¹⁴ Módulos de capacitación técnico-metalúrgico-ambiental, SACC Ingenieros SRL, Mollehuaca Ica, Lima, Perú, 2004, pagina 5, 7-8.

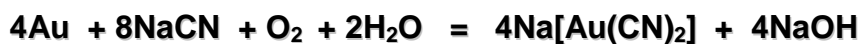
2.1.5 Proceso de Cianuración Convencional:

Lixiviación:

La lixiviación es la solución preferencial de uno o más componentes de una mezcla sólida por medio del contacto de un solvente líquido.¹⁵

Es precisamente en esta operación unitaria de la ingeniería química que se da la extracción del Oro de los minerales.

La reacción que tiene lugar durante la disolución del Oro en soluciones cianuradas bajo condiciones normales ha sido establecida como:



La concentración del cianuro determina la velocidad de disolución anódica del oro, mientras que la cinética de reducción depende de la concentración de oxígeno disuelto.

La relación entre la concentración del cianuro y el Oxígeno en solución determinan la velocidad de reacción.

Esto significa en lenguaje sencillo que por cada cuatro partes de Oro se necesitan ocho partes de cianuro dos de agua y una de Oxígeno puro para dar

¹⁵ Treybal Robert E., *Operaciones con Transferencia de Masa, Edición Revolucionaria, 1ª Edición, Cuba 1985.*

cuatro partes el complejo aurocianurado y cuatro de hidróxido de sodio.

En sistemas relativamente simples el Oro se disuelve con facilidad. El único requerimiento es que el Oro sea libre y limpio, y que la solución cianurada no contenga impurezas que puedan inhibir la reacción y tener un suministro adecuado de oxígeno.

Una cosa a destacar de esta ecuación es la gran importancia que tiene la participación del Oxígeno debido a que él es el agente oxidante de esta reacción; es decir que él es el responsable de facilitar la oxidación, la disolución del Oro y así formar el complejo cianurado ($\text{Na}[\text{Au}(\text{CN})_2]$) que posteriormente será precipitado por el cinc o por otro método.

La presencia de un agente oxidante es esencial para la disolución del Oro bajo condiciones normales de Cianuración. Existen agentes oxidantes que han sido usados en mayor o en menor grado en el pasado; pero que se han dejado de usar por su difícil manipulación, costo y los productos indeseables que se obtienen.

Por otra parte se ha demostrado que con una adecuada aireación se obtiene buenos resultados utilizando al aire como oxidante químico, debido a que el mismo está compuesto por un 29 % de Oxígeno y un 70 % de Nitrógeno aproximadamente.

Se han realizado ensayos en los que se ha determinado las velocidades de disolución del Oro en una solución cianurada al 0.10 % utilizando nitrógeno, oxígeno, y una mezcla de ambos en los cuales se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 2.1 Velocidad de disolución del Oro (Au) en diferentes mezclas de Oxígeno - Nitrógeno.

N°	Mezcla de Oxígeno – Nitrógeno		Velocidad de disolución del oro en la solución cianurada. (K)
	Oxígeno	Nitrógeno	
	%	%	mg/cm ² .hr
1	00	100	0.04
2	9.60	90.40	1.03
3	20.90	79.10	2.36
4	29.0	71.00	3.44
5	60.10	39.90	7.62
6	70.00	30.00	8.37
7	99.50	0.50	12.62

Muchos minerales auríferos están acordes en la práctica con esta reacción y los problemas presentes en la extracción del Oro son más mecánicos que químicos. Sin embargo muchos otros presentan una gran variedad de problemas químicos que dependen de diferentes constituyentes del mineral. Muchos de estos constituyentes tales como el cuarzo, silicatos, carbonatos de metales alcalinos son relativamente inertes en la Cianuración. Sin embargo otros componentes pueden reaccionar en mayor o en menor grado en soluciones cianuradas y competir con el Oro en la Cianuración.

Es difícil predecir como un mineral va actuar durante la Cianuración debido a que cada mineral tiene sus características particulares.

Fuentes de problemas en los minerales:

Cobre:

La concentración de Cobre en minerales debe ser menor del 0.10 % debido a que sus efectos en la Cianuración y precipitación pueden ser pronunciados. No solamente se disuelve en cianuro provocando un consumo excesivo de este reactivo, sino que, el complejo cianurado de Cobre afecta indirectamente la disolución del oro. En adición este metal influye en la precipitación del Oro por el Cinc. El resultado del Oro precipitado con contenido de Cobre repercutirá subsecuentemente en las operaciones de fundición.

Níquel:

Este en pequeñas cantidades tiene efectos perjudiciales en la precipitación del Oro y pocos en la disolución. El por que no está definido aun, ni su cura.

Arsénico y antimonio:

En la forma de rejalgar (As_2S_2), oropimente (As_2S_3) y el Antimonio como estibino (Sb_2S_3) representan serios problemas en la Cianuración. Ellos no forman

compuestos complejos cianurados rápidamente como es conocido, pero se disuelven en soluciones alcalinas para formar compuestos tales como tioarseniato y tioantimoniato ($\text{Ar}(\text{CNS})_3$ y $\text{Sb}(\text{CNS})_3$). Estos compuestos reaccionan con el oxígeno en la solución cianurada para formar el correspondiente arseniato y antimoniato. El resultado de esto es que posteriormente no habrá Oxígeno disponible para la disolución del Oro y por consecuencia su extracción decaerá.

Factores físicos químicos que afectan la velocidad de Cianuración.

Los principales factores que afectan la velocidad de Cianuración son las concentraciones de Oxígeno y cianuro, el espesor de la capa límite de Nerts, y el coeficiente de difusión del Oxígeno y el cianuro respectivamente.

La cinética de Cianuración del Oro es limitada por difusión. Durante la reacción química (Cianuración) una película o capa límite cubre la partícula de Oro y para lograr la cianuración, el Oxígeno y el cianuro deben de pasar a través de la capa límite hasta la superficie del Oro y luego formar el complejo Oro-cianuro. Deben difundirse fuera atravesando la capa límite.

Cinética de disolución del Oro

Una reacción fisicoquímica en la cual se hallan involucradas una fase sólida y otra líquida se consume en cinco etapas siguientes:

1. Difusión de los reactantes desde la solución hasta la interfase sólido líquido.
2. Adsorción de los reactantes en la superficie del sólido.
3. Reacción en la superficie.
4. Desorción de los productos de la reacción de la superficie del sólido.
5. Difusión de estos productos de la interfase sólido-líquido a la solución.

Efectos retardadores y aceleradores.

Efecto del oxígeno en la disolución del Oro

1. El alto consumo de Oxígeno retarda la reacción, existen altos consumidores de esta sustancia como la pirrotina (sulfuro natural de hierro, FeS), la cual se descompone fácilmente formando hidróxidos que se oxidan con el Oxígeno.
2. Para estos casos es necesario usar agentes oxidantes como el peróxido de hidrógeno o en todo caso airear la pulpa para compensar el consumo excesivo de Oxígeno.

Efecto del cianuro libre en la disolución del oro.

La presencia de cianuro libre, retarda la disolución en el caso que se de un alto consumo de cianuro debido a:

1. La formación de complejos cianurados.
2. La producción de un sulfuro airoso insoluble sobre la superficie del Oro
3. La deposición de peróxidos.

4. La absorción sobre la ganga especialmente de cuarzo y aluminosilicatos.
5. La degradación del cianuro por hidrólisis, el cual depende de álcali libre.
6. La presencia de zantatos en el mineral flotando que forma una capa fina de zantato aúrico insoluble que evita la disolución del Oro.
7. Las concentraciones bajísimas de cianuro menores a 0.001 % en la cual no disuelve el Oro.

Efecto del tamaño de partícula en la disolución del Oro.

El tamaño de partícula es determinante en el tiempo de disolución, a mayor diámetro, mayor será el tiempo de disolución. El denominado Oro grueso, si asumimos una reducción de 3.36 micrones por hora (datos encontrados por Barsky), un gramo de Oro de 44 micrones de espesor tomaría no menos de 13 horas para disolverse, otro grano de 119 micrones tomaría no menos de 44 horas para su disolución. Si la disolución es con Plata metálica es mayor el tiempo. Cuando el Oro grueso aparece en los minerales, la práctica usual es superarlos con gravimetría previa.

Efectos de la alcalinidad sobre la disolución del Oro.

1. Evita pérdidas de cianuro por hidrólisis.
2. Evita pérdidas de cianuro por acción del dióxido de carbono del aire.
3. Descompone los bicarbonatos en el agua antes de ser usados en cianuración.

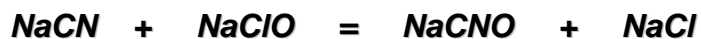
4. Neutraliza los compuestos ácidos contenidos en el mineral.
5. Ayuda a la sedimentación de partículas finas en el agua.
6. Mejora la extracción cuando se trata de minerales conteniendo teluros.

Efectos del pH.

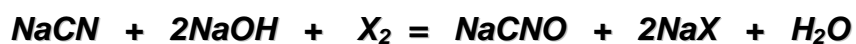
Si se incrementa el pH de 10.5 a 12, el nivel de disolución del Oro disminuye. Esto es debido que a pH por encima de 12, se depositan carbonatos sobre la superficie de las partículas de Oro y de las rocas que contienen intrínsecamente el metal, lo cual impide que la solución cianurada penetre y disuelva al Oro. El pH óptimo debe mantenerse en el rango de 10.5 a 11.

Destrucción del cianuro de sodio.

La neutralización del cianuro de sodio se lleva a cabo con la adición del hipoclorito de sodio al 1%. La reacción de neutralización del cianuro de sodio ocurre de acuerdo a la siguiente reacción:



El mecanismo de esta reacción está dado de la forma siguiente:



Donde X es el halogenuro (que puede ser el Cl).

Industrialmente la forma de obtener hipocloritos, es la de hacer reaccionar hidróxido de sodio o de potasio en agua de cloro.

En todos los ensayos en donde se utilice cianuro ya sea a escala de laboratorio, planta piloto, como así también en operaciones a escala Industrial, se debe prever un sistema de destrucción del cianuro residual en soluciones y colas.

Los reactivos más eficientes para realizar la destrucción del cianuro encuentran su base en los halógenos, y su efecto es el de la oxidación del cianuro y el de sus compuestos. Se puede tomar ventaja del pH positivo de la reacción de oxidación del cianuro y de esta forma reducir los costos haciendo una operación rápida y controlada. El mecanismo utilizado es el de pasar el CN^- a CNO^- .

2.1.6 Lixiviación con sales oxidantes en medio ácido.

Ámbito de trabajo:

El trabajo de Lixiviación con sales oxidantes, se desarrolla en Menas, Concentrados y Material Refractario (sulfurado), en pulpa o partículas (agitación o pilas) a temperatura ambiente.

Para el caso de lixiviación en pilas se necesita un tiempo mínimo de quince días.

El medio ácido que se usa es el ácido sulfúrico concentrado. Las sales oxidantes usadas para este proceso son los **cloruros y nitrato de sodio o nitrato de amonio** en distintas proporciones. Estas sales son de calidad industrial y fertilizantes.

Si el Oro está encapsulado en el cuarzo o arena aurífera, deberá adicionarse fluoruro de sodio (nunca usar el calcio, porque forma yeso que entorpece el proceso) con la finalidad de disolver el cuarzo, no disuelve ni forma complejos con el Oro, además sirve para dejar en libertad metales nobles como el Titanio, Platino, talio, Germanio, etc.

La adición de sales a la pulpa ácida, tiene por finalidad producir cloro y agua regia in situ, lixiviante enérgico para recuperar elementos nobles de concentrados o minerales auríferos.

Beneficios:

1. Los residuos productos de la lixiviación se utilizan como fertilizantes.
2. No se utiliza cianuro en ninguna etapa del proceso.
3. El tiempo de lixiviación, es más rápido que la cianuración.
4. Recuperación de oro sobre 95% a nivel industrial.
5. Lixivia minerales: refractarios, sulfurados, encapsulados y ripios productos de cianuración.
6. Todo el circuito de operación trabaja a medio ambiente.

7. Si el mineral presenta altos contenidos de Cobre, Arsénico, Antimonio, Cinc, y otros elementos cianógenos, el proceso, opera sin restricción alguna.
8. Trabaja con las diversas formas de minerales existentes en la naturaleza.

Apreciación de la lixiviación cianurada con respecto a las sales oxidantes.

El cianuro de sodio ha sido el reactivo de lixiviación preponderante para el Oro, debido a su excelente extracción de una gran variedad de menas y su bajo costo. Si bien el cianuro es un lixivante poderoso para el Oro y la Plata, no es selectivo y forma compuestos complejos con una variedad de iones metálicos y minerales.

Las velocidades de cianuración son relativamente lentas y la industria ha estado investigando reacciones de lixiviación de Oro más rápidas, que sean capaces de alcanzar extracciones de Oro muy altas.

Debido al elevado valor del metal amarillo, incluso pequeños incrementos en la recuperación son siempre preferibles para mejorar la velocidad de lixiviación.

Por otro lado la aplicación de los métodos hidrometalúrgicos en el Oro, especialmente la lixiviación cianurada, que tiene una aplicación mayoritaria en el tratamiento de minerales oxidados, han dado lugar al desarrollo de técnicas ecológicas e innovadoras de lixiviación, extracción por carbón activado,

extracción por solventes y electrodeposición del Oro, con la finalidad de obtener un cátodo de Oro de gran pureza. El desarrollo de este proceso, el cual es una técnica de lixiviación con sales oxidantes permite procesar por vía hidrometalurgia las diversas formas de minerales auríferos presentes en la naturaleza.

Los procesos evolutivos de utilización del Oro y que tiene como parámetros limitantes el incremento de precios de sus diferentes productos ocasionales por la elevación de los costos de producción, los que a su vez son parte estructural de las tecnologías que se usan y que en muchos casos contienen procesos con carácter innecesario, lo indicado motiva que los procesos de lixiviación y su posterior recuperación por procesos electrolíticos sea de análisis en los estudios para obtener el Oro como producto derivado de él.

Proceso operatorio de lixiviación

El presente proceso es innovador y ecológico para la recuperación de Oro de menas, concentrados y materiales refractarios (sea por agitación, en pilas o inundación).

La lixiviación se realiza mediante la adición de sales oxidantes en medio ácido, tiene las siguientes ventajas frente a los procesos convencionales:

1. Alta sensibilidad a elementos incrustados en las menas de Pb, Cu, Zn, Sb, etc. No interacciona con el azufre residual liberándolo del proceso.
2. Alta recuperación del Oro y elementos nobles: Platino, Paladio, Iridio, Rodio, Osmio, Rutenio, Titanio, Germanio, Talio, etc. de las arsenopiritas y calcopiritas.
3. Recuperación satisfactoria del Oro de menas refractarias.
4. Regeneración del lixiviante adicionando sales y precipitando sales.
5. Las sales con el oro forman un complejo aniónico en medio ácido, siendo su mecanismo de reacción:

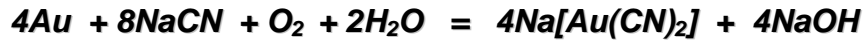


Esta reacción es rápida y logra extracciones de oro hasta un 98%. La principal ventaja es que se recicla la solución lixiviante. Además no se genera gas de dióxido de nitrógeno que es venenoso y tóxico.

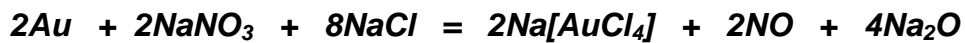
Química de la lixiviación

Las reacciones de lixiviación del Oro con cianuro y sales oxidantes son mostradas a continuación:

Cianuración



Sales oxidantes



Las ventajas existentes para el proceso en estudio son:

La reacción con sales oxidantes utiliza como lixivante el nitrato y cloruro de sodio, formando por la reacción con el medio ácido el cloruro de nitrosilo (NOCl). Por lo tanto, cinéticamente la lixiviación con sales oxidantes es función de la concentración del ácido y sales.

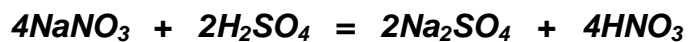
Las sales disueltas del Oro forman compuestos complejo ($H[AuCl_4]$, $Au[AuCl_4]$) de Oro (I) y (III) estables en el medio. Las sales forman un ligando de cloruro y nitrosilo con el Oro.

Para la recuperación del Oro, Plata, Titanio, Germanio, Talio, Platino, etc. del mineral, el costo de las sales es insignificante.

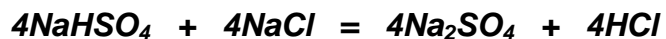
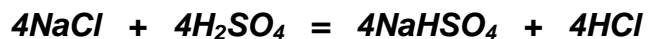
Mecanismo de reacción

Semi reacciones

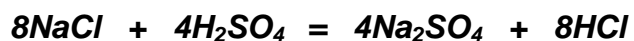
El ácido nítrico se forma mediante la interacción del nitrato de sodio, amonio o potasio, adicionando ácido sulfúrico concentrado, siendo el mecanismo de reacción:



Para obtener ácido clorhídrico se hace reaccionar cloruro de sodio, cloruro cuproso, cloruro férrico o cualquier cloruro adicionando ácido sulfúrico concentrado, siendo el mecanismo de reacción en dos etapas:



Ecuación total:



Notará que el cloruro de sodio en reacción con el ácido sulfúrico concentrado primeramente forma bisulfato, en una segunda reacción forma sulfato de sodio,

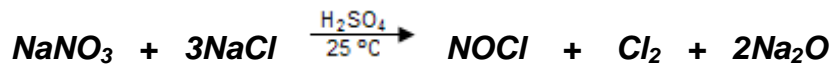
lo cual forma un exceso de ácido clorhídrico, el cual es benefactor para la lixiviación de los metales nobles (especialmente para la lixiviación de la Plata) presentes en el mineral.

El nitrato de sodio o de potasio es de calidad industrial (fertilizante) o comercial el cual interactúa con el medio ácido produciendo ácido nítrico naciente In Situ. El cloruro de sodio de igual manera es de calidad comercial.

Dichas reacciones favorecen el proceso para poder lograr formar el cloruro de nitrosilo. La formación de agua regia in situ es mucho más energética que el agua regia obtenida al hacer reaccionar el ácido nítrico y clorhídrico concentrado, ya que el agua regia a partir de sales oxidantes se genera en el medio, de tal manera que disuelve todo el material valioso sin eliminarse (evaporarse) como ocurre con los ácidos comunes.

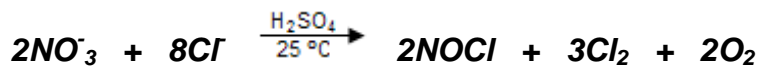
La generación de cloruro de nitrosilo, (NOCl), se desarrolla al hacer reaccionar las sales oxidantes en el medio ácido, es necesario controlar la cantidad de las sales, ya que un exceso del nitrato genera la formación de gas NO_2 , el exceso de cloruro de sodio, genera la formación de compuestos de cloro (indeseables en el medio).

La ecuación que se adjunta a continuación es recomendable para desarrollar el presente proceso.



Reacción del lixiviante

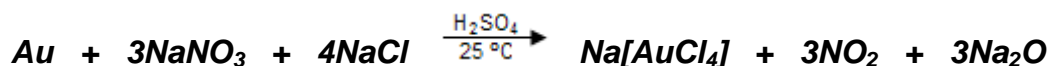
La reacción general del proceso de lixiviación se desarrolla bajo:



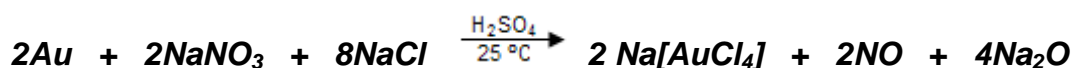
Siendo el cloruro de nitrosilo, parte importante en el proceso de formación del agua regia en el medio.

Reacción con el mineral aurífero

La interacción del mineral aurífero con el medio lixiviante se desarrolla bajo la reacción:



Dicha reacción no es recomendable por la generación del gas **NO₂**, que es altamente tóxico, Por lo que se ha desarrollado la siguiente reacción química que es bastante favorable para el proceso de lixiviación con sales oxidantes:

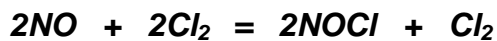


Notará que se obtiene **NO**, óxido nítrico, el cual luego es regenerado a cloruro de nitrosilo, dicho mecanismo se verá en el siguiente párrafo.

La adición de las sales oxidantes es muy importante para este proceso, por lo que es necesario dosificar adecuadamente con el propósito de evitar la contaminación del medio ambiente, ya que el presente proceso es ecológico, y loable debido a que se regenera la solución lixivante para procesos posteriores de tratamiento de mineral fresco.

Reciclado del óxido nítrico

Dicha reacción es espontánea ya que la presencia del cloruro (en exceso) en el medio interactúa con el óxido nítrico y genera cloruro de nitrosilo y cloro naciente, por lo tanto el gas nitrosilo siempre estará presente en dicho medio lixivante, bajo la siguiente reacción:



El óxido nítrico, a pesar de su carácter endotérmico, es perfectamente estable en condiciones normales.

Termodinámica de lixiviación del oro

La termodinámica define el estado de equilibrio a que deberá llegar finalmente la reacción de lixiviación en las condiciones dadas, aunque en la práctica no se logre alcanzar el equilibrio.

La termodinámica nos indica que reacciones son posibles y cual no, por lo tanto para las ecuaciones se obtuvieron los siguientes valores:



Dicha reacción es factible ya que la energía libre es espontánea, no requiriendo energía externa para su formación.

Por tal motivo es importante estudiar la termodinámica primero, antes de desarrollar cualquier trabajo que pueda entorpecer el estudio.

Los diagramas de estabilidad (E-pH) son representaciones termodinámicas del sistema que permiten visualizar de una manera global las zonas de estabilidad de los elementos y compuestos basándose en el pH y el potencial del proceso de oxidación y reducción.

Dichas variables son tan importantes para mostrar la extensión de las reacciones. Las cuales se pueden expresar mediante ecuaciones en que intervienen las variables mencionadas.

Siempre hay que tener presente que los diagramas representan, en cuanto a exactitud, por los datos experimentales un aproximado a la realidad. En dicho caso no se considera la cinética del proceso involucrado.

Los diagramas de estabilidad es una herramienta muy valiosa para el estudio de los procesos de lixiviación. El conocimiento real de las variables permite tener una visión muy clara de lo que está ocurriendo en el proceso desde el punto de vista de las especies que están presentes en el medio.

Consideraciones termodinámicas

Una primera evaluación termodinámica, indica que la disolución del Oro usando sales oxidantes a temperatura ambiente es un proceso atractivo, que se muestra a través de las siguientes reacciones:



La estabilidad del complejo es parte importante para su extensión en el medio, por lo cual es importante que la reacción sea de izquierda a derecha. Dicha reacción ocurre en medio ácido, en presencia de sales oxidantes.

En particular, esto se puede lograr, adicionando adecuadamente las concentraciones de las sales de nitrato y cloruro de sodio en el medio ácido, en la que los iones cloro son los que controlan el proceso, un exceso del nitrato genera gas NO_2 contaminante para el medio ambiente.

Cinética de lixiviación del Oro

Mientras más amplio sea el tiempo de lixiviación requerido para alcanzar una recuperación deseada de una mena de oro, mayor será la capacidad requerida del volumen de lixiviación y por lo tanto el costo de capital de la planta.

En procesos de lixiviación con cianuro en pilas, el tiempo de residencia en plantas de Oro varía en un rango de 45 a 60 días. En cambio en el proceso de lixiviación con sales oxidantes el tiempo de residencia es de 15 días como mínimo (dependiendo de la variedad de mineral aurífero).

La disolución del Oro en medio ácido con sales oxidantes es una reacción heterogénea que ocurre en la interfase sólido-líquido. La velocidad de transferencia de masa de reactantes (sales oxidantes) desde la fase líquida,

tiene un efecto importante sobre la cinética total de lixiviación del Oro. Así la velocidad de disolución no solo depende de la velocidad de reacción química en la interfase sólido-líquido, sino también de la velocidad de transferencia de masa entre las fases. La velocidad también dependerá del área de la interfase en reacción, el cual se reduce constantemente durante la disolución del Oro.

Estudios preliminares han demostrado que la disolución del Oro está controlada por la difusión (transferencia de masa) del cloruro y el nitrato de sodio disueltos a través de la capa límite de la interfase sólido-líquido. La velocidad de disolución se incrementa con la concentración del cloruro de sodio, el Oro puede llegar a pasivarse (por la presencia del cloruro de plata – insoluble en el medio, esto debido a que parte del cloruro disuelto interactúa con la plata por ello se recomienda un exceso de cloruro de sodio) y disminuir su velocidad de disolución a un nivel más bajo y constante.

A bajas concentraciones de nitrato de sodio, el cloruro de sodio tiene efecto sobre la velocidad de disolución del oro, mientras que a elevadas concentraciones de nitrato de sodio donde la reacción no está controlada por el nitrato, la velocidad de reacción depende del cloruro de nitrosilo NOCl.

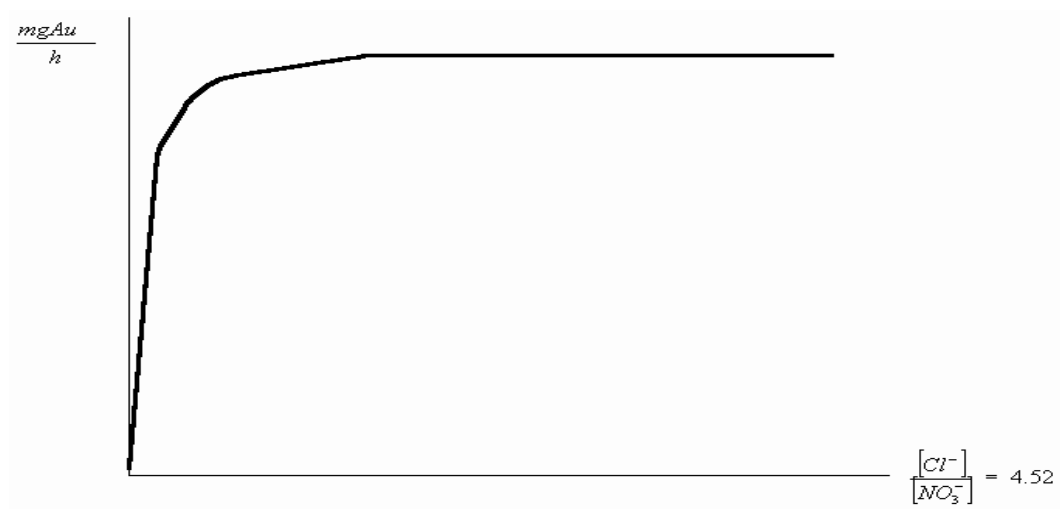
La descarga de óxido nítrico NO, es instantánea y conduce a una acumulación de cloruro de nitrosilo bajo la siguiente reacción:



En la solución la lixiviación de minerales auríferos con sales oxidantes es controlada por la difusión. La rapidez de reacción involucra difusión en la capa líquida de los iones cloro para capturar al ion oro y formar el complejo de cloruro de oro, esto es debido a la alta concentración de cloruro de sodio y el ion cloruro causa la alta concentración de cloruro de nitrosilo (fig. 2.1).

Figura 2.1

La rapidez de reacción involucra la difusión de la capa líquida de los iones cloro para capturar el ion oro y formar el complejo de cloruro de oro.



$$\frac{[Cl^-]^4}{[NO_3^-]} = 4 \frac{D_{NO_3^-}}{D_{Cl^-}} = 4 \frac{2.59 \times 10^{-5}}{2.29 \times 10^{-5}} = 4.52$$

Por lo tanto, se alcanza la velocidad límite, cuando la razón de concentración de iones nitrato a cloruro en solución es igual a 4.52.

Lo cual corrobora que la ecuación estequiometría está bien aplicada, porque se requieren una relación de 1:4 de nitrato de sodio a cloruro de sodio.

La razón de las dos concentraciones es de gran importancia. Si se usa un exceso de solución concentrada de cloruro respecto al nitrato disuelto, éste es desperdiciado.

Por otro lado, si se alcanza a saturar de iones cloruro una solución pobre de ion nitrato, la velocidad de lixiviación será lenta. Para la máxima velocidad de lixiviación con sales oxidantes en un proceso productivo, es importante el control de la concentración de nitrato y cloruro de sodio disuelto en un radio molar óptimo (igual o cercano a cuatro punto cinco).

Lo cual nos confirma que la ecuación estequiometria de la lixiviación con sales oxidantes se requiere una relación de uno a cuatro para establecer la disolución del oro presente en el mineral.

2.1.7 Análisis del oro en muestras geoquímicas.

2.1.7.1 Ensayo por fuego

El ensayo por fuego es una forma de arte antiguo en el análisis químico cuantitativo, los orígenes del ensayo utilizando el fuego se pueden remontar aproximadamente al año 2600 antes de Jesucristo.

Hoy en día el ensayo por fuego para obtener metales preciosos (nobles) todavía se cataloga como el mejor método general para la cuantificación de Oro.

Etapas del método de ensayo por fuego

Preparación de las muestras:

Las muestras que se reciben en el laboratorio tienen códigos de identificación y las rocas no son mayores a 2 pulgadas de diámetro equivalente. El mineral generalmente llega en sacos con capacidad 10 kg aproximadamente

El mineral es depositado en sartenes de metal e introducidos en hornos secadores eléctricos para extraer la humedad del mineral a una temperatura de 110 °C.

Reducción de tamaño:

Las muestras secas son reducidas de tamaño hasta un diámetro equivalente de $\frac{1}{4}$ " o 6.0 mm. Para este fin se hace uso de una trituradora de mandíbulas. Ver **imagen 9.1.2** de los anexos.

Cuarteo

La operación de cuarteo es una etapa de suma importancia en el ensayo de las muestras. En esta operación se hacen las selecciones representativas y aleatorias de las alícuotas de muestras para sus análisis. Es aquí donde el material obtenido de la trituración posteriormente reduce su masa cuarteando (en un cuarteador Johns) hasta dejar unos 350 g aproximadamente. Una vez obtenida la muestra cuarteada esta se somete a secado nuevamente para posteriormente ser pulverizarla.

Pulverización:

En la pulverización los tamaños de partículas de las muestras son reducidos de tamaño hasta diámetro menores de 75μ (micrones) o lo que es lo mismo decir menores que 200 mallas. Ver **imagen 9.1.3** de los anexos.

La reducción de tamaño de las partículas es importante para la homogenización de las muestras, y por otra parte para aumentar la superficie de contacto de las muestras con los reactivos a usar en el proceso.

Pesado de las muestras y adición del fundente

Las muestras ya pulverizadas se pesan y son depositadas en crisoles refractarios los cuales contienen previamente 120 g de material fundente el cual está constituido de óxido de plomo (litargirio), tetraborato de sodio (Bórax), carbonato de sodio (Soda Ash), y sílice.

A la muestra se le agregan harina o azúcar con el propósito de producir carbón en el proceso de fundición y posteriormente transformarse en dióxido de carbono, dándose de esta manera una reacción de oxidación y como consecuencia reacciones de reducción de los metales (Oro, Plata, cobre, etc) presentes en la muestra.

Finalmente se le agregan a la muestra de 2 a 5 ml de solución de nitrato de plata al 0.05 Molar (8.7 g / L), esto se hace con dos propósitos: Primero proteger el botón de que sea absorbido en la copelación y segundo para garantizar que la composición de Oro en el botón copelado sea menor del 22 %. De ser mayor se experimenta pasividad química y la plata no reacciona con el ácido nítrico.

Material fundente

Un material fundente puede definirse como una sustancia que convierte los compuestos que son infusibles a cierta temperatura y presión en compuestos que se licuan a esas condiciones de temperatura y presión.

Sustancias químicas fluidificantes

Oxido de plomo II (PbO) o litargirio:

Esta sustancia tiene punto de fusión de 888 °C, es un gran fundente básico y actúa como agente oxidante y desulfurante. Una vez reducido, provee el plomo necesario para la colección de los metales nobles.

El litargirio tiene gran afinidad por la sílice, es por ello que al fundente se le agrega cierta cantidad de la misma porque sino el óxido de plomo ataca las paredes del crisol.

Bórax Glass (Na₂B₄O₇):

El bórax es una sal blanca que tiene un comportamiento anfótero en solución, lo que permite regular el pH en disoluciones y productos químicos en base acuosa. La disolución de ambas sales en agua es lenta y además relativamente a baja concentración (apenas un 6%).

El bórax tiene la propiedad de disolver óxidos metálicos (ácidos o básicos) cuando este compuesto se fusiona con ellos. Tiene un mejor comportamiento disolutivo si el pH está entre 12 y 13, formándose sales de $(\text{BO}_2)^-$ en ambiente alcalino.

El punto de fusión es de 74.85 °C, es extremadamente viscoso cuando es fundido, pero a altas temperaturas de fundición se vuelve fluido y un ácido fuerte, disolviendo y fundiendo prácticamente todos los óxidos metálicos (ácido y básico).

El hecho de que se funde a baja temperatura baja el punto de fusión de toda la matriz (muestra y fundente) y facilita la escorificación de los minerales.

Carbonato de sodio (Na_2CO_3) Soda Ash:

El **carbonato de sodio** es una sal blanca y translúcida con punto de fusión 852 °C, es un gran fundente básico. Se combina con sílice y alúmina produciendo aluminatos y silicatos fundibles. Fundido, tiene la propiedad de disolverse o mantener en suspensión una cantidad de materiales de ganga refractaria. Algunos sulfuros se forman en presencia de carbonato de sodio es por ello que es considerado como agente oxidante y desulfurante.

Óxido de silicio (SiO₂) sílice:

El **óxido de silicio (IV)** o dióxido de silicio (SiO₂) es un compuesto de silicio y oxígeno, llamado comúnmente **sílice**. Es uno de los componentes de la arena. Una de las formas en que aparece naturalmente es el cuarzo. Su punto de fusión 1,713°C, es un agente ácido fuerte que se combina con los óxidos del metal para formar silicatos fusibles (fundición de casi todas las escorias).

Tabla 2.2: Composición del fundente para muestras oxidadas:

Fundente A			130		
Nº	Reactivo	Porcentaje	M	T(f)	T(f)parcial
		%	G	° C	° C
1	Bórax	28.0	36.4	74.85	20.96
2	Soda	20.0	26.0	852.00	170.40
3	Litargirio	50.0	65.0	888.00	444.00
4	Sílice	2.0	2.6	1713.00	34.26
5	Total	100.0	130.0		669.62

Tabla 2.3: Composición del fundente para muestras sulfurosas:

Fundente B			130		
Nº	Reactivo	Porcentaje	M	T(f)	T(f)parcial
		%	G	° C	° C
1	Bórax	12.0	15.6	74.85	8.98
2	Soda	25.0	32.5	852.00	213.00
3	Litargirio	55.0	71.5	888.00	488.40
4	Sílice	8.0	10.4	1713.00	137.04
5	Totales	100.0	130.0		847.42

Harina o azúcar:

Es una sustancia rica en carbón el cual al reaccionar con el oxígeno a altas temperaturas forma el dióxido de carbono. Por tanto al oxidarse el carbono hace que el óxido de plomo se reduzca a Plomo, por lo tanto el carbón implícito en la harina es un agente reductor. La dosificación adecuada de harina juega un papel fundamental en el proceso de fundición ya que al agregar menos o más harina de la debida puede suceder lo siguiente:

El Plomo es el encargado de colectar los metales preciosos, por lo tanto si se agrega menos harina de la debida produce un régulo de Plomo pequeño, y existe la posibilidad de que no se hayan colectado todos los metales preciosos.

Si se agrega mas harina de la necesaria produce un plomo excesivamente grande y el tiempo de copelación se prolonga, esto ocasionaría absorción de Plata en el Copel.

Se sugiere que el régulo de plomo debe de tener un peso promedio de 28 g para obtener una óptima recuperación de los metales preciosos.

Funciones del nitrato de plata:

1. Proteger la pérdida de Oro durante la copelación.
2. Facilita el traslado de la pelotita desde el copel hasta el recipiente de partición.
3. Garantiza la proporción apropiada entre el Oro y la Plata, lo cual hace más fácil la partición (separación de la Plata del Oro). A medida que proporción de Oro es mayor al 22 %, la aleación se pasiva ante el ácido.

Una vez incorporadas las muestras y todos los reactivos en los crisoles se introducen en una mufla y se funden en un rango de temperatura entre 1000 a 1100 °C durante una hora aproximadamente. Ver **imágenes 9.1.8 y 9.1.9** de los anexos.

Una vez que todos los reactivos y muestras estén licuados (fundidos) se procede a verterlos en moldes cónicos, se dejan que las escorias cristalicen hasta formar capas vítreas.

Posteriormente se rompen las capas vítreas para extraer los botones de plomo, se martillan para encuadrados y posteriormente copelarlos.

Copelación

Se introduce los copeles en la mufla para precalentarse a una temperatura de 900 °C por un tiempo de 20 minutos para evaporar la humedad y cualquier sustancia orgánica.

Se depositan los régulos de Plomo en los copeles durante 45 minutos aproximadamente hasta que los copeles hayan absorbido todo los metales con excepción del Oro y la Plata.

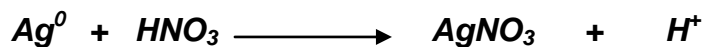
El control de la temperatura en esta etapa es necesario debido a que altas temperaturas pueden provocar pérdidas de Oro y Plata. Muy bajas temperaturas forman óxidos infusibles sobre el Plomo.

Si la temperatura fue reducida durante la copelación, se debe incrementar nuevamente a 900 °C con el objeto de evitar que se molifiquen los botones

antes de que se oxiden completamente los metales base. Después que han desaparecido los metales base, los botones se solidifican rápidamente y en ese momento los botones se encienden debido a la liberación del calor latente de la fundición. Ya en esta etapa los copeles se extraen de la mufla y se deja enfriar. Una vez fríos los botones se retiran de los copeles con una pinza y son martillados y transferidos a cápsulas de porcelana. El martillado es importante porque aumenta la superficie de contactos de los botones para la separación del Oro y la Plata.

Partición

La partición consiste en digerir los botones con ácido nítrico a diferentes concentraciones de menor a mayor (concentraciones que van de 1:5 a 1:1) en caliente a fin de que este reaccione con la plata y llevarlo a solución en forma oxidada y de esta forma dejar al Oro libre.



Ya extraída la Plata el botoncitos resultantes se secan y se introducen en la mufla por un tiempo de 20 a 30 segundos para darles el brillo metálico.

Estos son pesados en una micro balanza analítica, se hacen los cálculos y se obtienen los resultados expresados en g / T (gramos por toneladas)

Cálculo de los resultados y análisis dimensional:

M: masa de la muestra expresada en g (gramos)

m: masa del botón expresada en mg (miligramos)

$$\text{Ley} = \frac{m \text{ mg}}{M \text{ g}} * \frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}} * \frac{10^6 \text{ g}}{1 \text{ T}} = \frac{m * 1000 \text{ g}}{M * \text{T}}$$

Por tanto para los cálculos de los resultados finales expresados en gramos por toneladas (g / T) se aplica la siguiente ecuación:

$$\text{Ley} = \frac{m * 1000}{M}$$

2.1.7.2 Espectrometría de absorción atómica

Aspectos teóricos

Los principios teóricos de la absorción atómica fueron establecidos en 1840 por Kirchhoff y Bunsen en sus estudios del fenómeno de auto absorción en el espectro de los metales alcalinos y alcalinos térreos.

La base de la espectroscopia de absorción atómica (EAA) la entregó Kirchhoff al formular su ley general: « **cualquier materia que pueda emitir luz a una cierta longitud de onda también absorberá luz a esa longitud de onda**». El significado práctico de esto fue recién desarrollado en 1955 por el australiano Walsh, apareciendo los primeros instrumentos comerciales a principios de 1960.

El átomo consiste de un núcleo y de un número determinado de electrones que llenan ciertos niveles cuánticos. La configuración electrónica más estable de un átomo corresponde a la de menor contenido energético conocido como “estado fundamental”.

Si un átomo que se encuentra en un estado fundamental absorbe una determinada energía, éste experimenta una transición hacia un estado particular de mayor energía. Como este estado es inestable, el átomo regresa a su configuración inicial, emitiendo una radiación de una determinada frecuencia.

La frecuencia de la energía radiante emitida corresponde a la diferencia de energía entre el estado excitado (E_1) y el estado fundamental (E_0) como se encuentra descrito en la ecuación de Planck:

$$E = E_1 - E_2 = h\nu = hc/\lambda$$

h: Constante de Planck

v: Frecuencia

c: Velocidad de la luz

λ : Longitud de onda

Según la teoría atómica, el átomo puede alcanzar diferentes estados (E_1, E_2, E_3, \dots) y de cada uno de ellos emitir una radiación a una longitud de onda determinada ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots$) característica, obteniéndose así un espectro atómico, caracterizado por presentar un gran número de líneas discretas. En absorción atómica es relevante solamente aquella longitud de onda correspondiente a una transición entre el estado fundamental de un átomo y el primer estado excitado y se conoce como longitud de onda de resonancia.

De la ecuación de Planck, se tiene que un átomo podrá absorber solamente radiación de una longitud de onda (frecuencia) específica. En absorción atómica interesa medir la absorción de esta radiación de resonancia al hacerla pasar a través de una población de átomos libres en estado fundamental. Estos

absorberán parte de la radiación en forma proporcional a su concentración atómica.

La relación entre absorción y concentración se encuentra definida en la Ley de Lambert-Beer.

Como la trayectoria de la radiación permanece constante y el coeficiente de absorción es característico para cada elemento, la absorbancia es directamente proporcional a la concentración de las especies absorbentes.

Análisis instrumental cuantitativo

Cuando la absorbancia de soluciones estándar de concentración conocida del elemento a determinar se grafica vs. la concentración, se obtiene una curva de calibración. La curva así obtenida es generalmente lineal a bajas concentraciones y la concentración de la muestra puede ser determinada por interpolación de su absorbancia en la curva de calibración.

Para emplear este método de análisis cuantitativo la composición de las soluciones estándar deben ser preparadas lo más semejante posible a la composición de la solución-muestra para compensar o eliminar interferencias.

Especialmente útil resulta el empleo del método de adición estándar, el cual permite trabajar en presencia de una interferencia sin eliminarla y obtener una determinación con buena exactitud del elemento en la solución-muestra.

Interferencias físicas y algunas interferencias químicas pueden ser compensadas empleando este método que consiste en la adición de cantidades diferentes de una solución estándar del elemento a determinar a varias porciones iguales de la solución-muestra. De esta forma, la interferencia afectará por igual a todas las soluciones. Si existe interferencia, se observará que la pendiente de la adición estándar es menor que la de la curva de calibración.

La fotometría o "medida de la luz" es un método óptico de análisis dentro del cual se encuentran **la colorimetría y la espectrofotometría**, que miden la cantidad de luz absorbida por sustancias coloreadas o incoloras respectivamente.

La luz puede ser considerada como una perturbación electromagnética de naturaleza ondulatoria que se propaga en el vacío en línea recta.

Longitud de onda:

Es la distancia entre dos picos sucesivos de una onda. La luz que percibe el ojo humano es la **luz visible** y comprende desde 400 a 700 nm. La que contiene longitudes de onda superiores a 700 nm no es visible para el ojo y se llama **infrarroja**. Por debajo de 400 nm tenemos la radiación ultravioleta (100-400 nm).

Las medidas de absorción de luz se basan en dos leyes, **la ley de Lambert y la ley de Beer**.

Ley de Lambert.

Cuando un rayo de luz monocromática pasa a través de un medio absorbente, su intensidad disminuye exponencialmente a medida que la longitud del medio absorbente aumenta.

$$I = I_0 \cdot 10^{-KL}$$

$$\log \frac{I_0}{I} = K \cdot L$$

Donde:

I = intensidad de luz transmitida

I₀ = intensidad de luz incidente

K = coeficiente de extinción

L = espesor de capa de camino óptico

K se refiere a las sustancias en general, sin estar en disolución.

Ley de Beer:

Cuando un rayo de luz monocromática pasa a través de un medio absorbente, su intensidad disminuye exponencialmente a medida que aumenta la concentración de la sustancia absorbente en el medio así como se muestra en la figura 2.0.

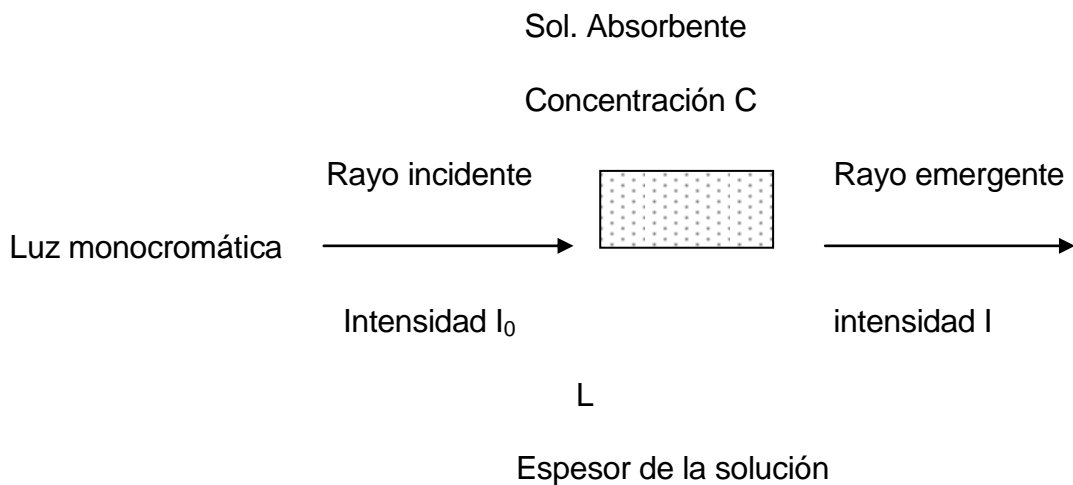
$$I = I_0 \cdot 10^{-K \cdot L}$$

$$\log \frac{I_0}{I} = K \cdot L$$

Donde

C = concentración de la sustancia absorbente

Figura 2.2



Estas dos leyes se combinan en LA LEY DE LAMBERT-BEER:

$$I = I_0 \cdot 10^{-\epsilon \cdot C \cdot L}$$

$$\log \frac{I_0}{I} = \epsilon \cdot C \cdot L$$

Donde:

ϵ = coeficiente de extinción molar cuando la solución contiene un mol por litro.

El cociente de las intensidades se conoce como Transmitancia (T) y se suele expresar como un porcentaje

$$T = \frac{I}{I_0} = 10^{-\epsilon \cdot C \cdot L}$$

$$\%T = \frac{I}{I_0} \cdot 100$$

La expresión $\log \frac{I_0}{I}$ se le conoce como absorbancia (A) o densidad óptica (DO)

$$A = D.O = \log \frac{I_0}{I} = \epsilon \cdot C \cdot L ; \quad \text{para } L = 1 \Rightarrow A = \epsilon \cdot C$$

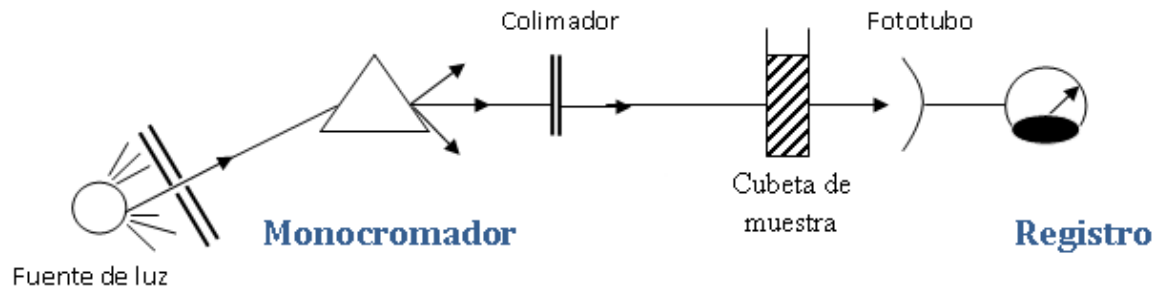
T y A quedan relacionados de la forma $A = -\log T = 2 - \log \%T$

Esquema del aparato

Espectrofotómetros.

Los métodos fotométricos de análisis utilizan los efectos de la interacción de las radiaciones electromagnéticas con las moléculas. Los aparatos de medida de la absorción de la radiación electromagnética se denominan "espectrofotómetros" y pueden representarse de forma sencilla mediante el siguiente esquema:

Figura 2.3



%T 0 —————> 100

A ∞ —————> 0

La luz procedente de la fuente se hace pasar por el monocromador, que la desdobra en haces monocromáticos. El colimador tiene una rendija de ajuste variable, pasando a su través sólo luz de una determinada longitud de onda.

La utilización de la luz monocromática o de un intervalo pequeño de longitudes de onda es importante, ya que la ley de Lambert - Beer solo se cumple en estas condiciones.

La luz que sale del colimador se hace pasar por la solución y luego incide sobre el fototubo donde es detectada. La señal se envía a un registrador que puede ser la escala de un galvanómetro calibrado o un registro gráfico.

En algunos colorímetros este registro consta de dos escalas, una mide absorbancias y la otra transmitancias. La escala de A va desde 0 a ∞ , la de T va desde 0 a 100, en sentido contrario.

Antes de realizar una medida, el aparato debe calibrarse, para lo cual se introduce la cubeta con el blanco y se lleva a cien de transmitancia y a cero de absorbancia. Posteriormente, la introducción de la disolución con la muestra nos da directamente su absorbancia.

Colorímetros:

Los métodos colorimétricos son una aplicación de la espectroscopía y se basan en la medida de la absorbancia de una solución coloreada en la región visible del espectro (400-700 nm). La fuente de luz suele ser una lámpara de wolframio. Los

compuestos no coloreados se transforman en otros con color, susceptibles de ser medidos colorimétricamente, mediante reacción con compuestos adecuados, y de esta forma se puede analizar en la región visible del espectro compuestos coloreados y sin color y ampliar sus posibilidades de utilización.

Los colorímetros encuentran una gran aplicación en los laboratorios de análisis clínicos.

Calibración de la curva:

Si se observa la ecuación resultante de Lambert – Beer, esta tiene la forma de la ecuación de la recta que parte del origen:

$$\mathbf{A = \epsilon \cdot C}$$

$$\mathbf{y = m \cdot x}$$

Donde:

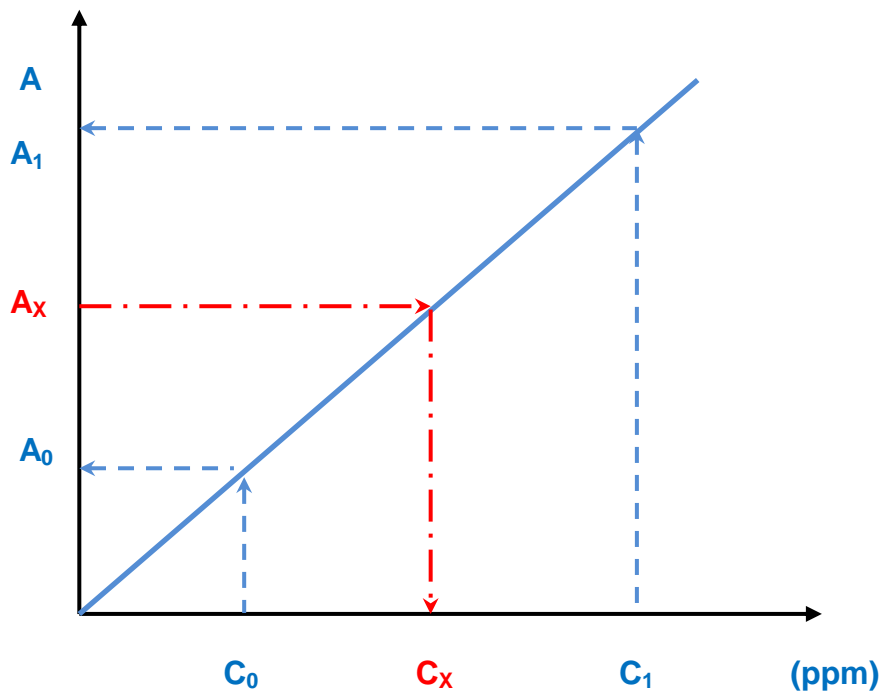
y: es la absorbancia (A)

m: es el coeficiente de extinción molar ϵ

x: es la concentración C

Por consecuente la ley de Lambert – Beer permite la determinación de concentraciones de disoluciones, a partir del calibrado de una recta, obtenida midiendo las absorbancia de disoluciones patrones de concentraciones conocidas. El calibrado de la recta se construye representando absorbancias en ordenadas frente a concentraciones en abscisas; interpolando el valor de absorbancia de la sustancia problema obtenemos sus concentración.

Figura 2.4 Grafico de la curva de Calibración (Absorbancia Vs Concentración)



Interferencias que se presentan en Espectrometría de absorción atómica

Interferencias físicas

Este tipo de interferencias está relacionado con la efectividad con que la solución es transportada a la llama y son causadas por diferencias en las propiedades físicas de las soluciones: **viscosidad, tensión superficial o presión de vapor.**

Un ejemplo de estas interferencias se observa en la determinación de Mg y Cu en presencia de ácido fosfórico. A mayor concentración de H_3PO_4 la viscosidad de la solución aumenta, disminuyendo la velocidad de aspiración de ella y una fracción menor llega a la llama, produciéndose una absorbancia menor de la muestra.

También la presencia de solventes orgánicos produce este tipo de interferencias debido a un aumento en la eficiencia de la nebulización (menor viscosidad y menor tensión superficial), lo que produce un aumento de la absorbancia.

Una forma de compensar este tipo de interferencia es preparar las soluciones estándar con los mismos componentes de la matriz de la solución problema.

Interferencias químicas

Interferencia química es cualquier alteración en el número total de átomos libres formados por unidad de volumen debido a la formación de compuestos químicos termoestables. Las causas más comunes de éstas son:

Disociación incompleta de la molécula formada o formación de una sal difícil de fundir.

El efecto del fosfato en la determinación de calcio es un ejemplo de este tipo de interferencia. El calcio con el fosfato forman el fosfato de calcio, el cual se transforma en pirofosfato de calcio, que es relativamente estable en una llama aire/acetileno. Así la cantidad de átomos libres de calcio generados en la llama será menor que la obtenida con una solución de calcio de igual concentración, pero sin presencia de fosfato, provocando una disminución de la señal.

Existen otros componentes refractarios que dan también una disminución de la señal de absorción del elemento de interés. Tal es el caso de silicatos, aluminatos y piro sulfatos de Calcio, Magnesio, Estroncio y Bario.

Reacción espontánea de los átomos libres con otros átomos o radicales presentes en el medio ambiente

Esta interferencia es causada por la formación de óxidos e hidróxidos u ocasionalmente carburos o nitruros, debido a la reacción de los átomos libres

con los productos de la combustión de la llama. Aproximadamente unos 30 metales no se pueden determinar con llama aire/acetileno (ejemplo: aluminio, silicio, boro, elementos lantánidos, etc.). La magnitud de la interferencia va a depender del tipo de estequiometría de la llama.

Las interferencias químicas pueden ser minimizadas por las siguientes formas:

- Empleo de llamas con mayores temperaturas. Como ejemplo tenemos la llama acetileno/óxido nítrico, la que es capaz de descomponer totalmente los compuestos refractarios.
- Agregar a la solución muestra un elemento "buffer", el cual forma con el elemento interferente un compuesto más estable que con el elemento a determinar. El ejemplo más conocido es la adición de lantano o estroncio en la determinación de calcio en presencia de fosfato.
- Preparación de las soluciones estándar de modo tal que su composición sea lo más semejante con la de la solución problema. Esta alternativa es difícil de aplicar debido a que requiere un conocimiento completo de la muestra.

Interferencia de ionización

Un átomo neutro en su estado fundamental puede ser ionizado a temperaturas elevadas. Estos iones exhiben propiedades espectroscópicas diferentes a un átomo neutro y no pueden ser determinados por espectroscopia de absorción

atómica. Así, el número total de átomos disponibles para la absorción atómica. Así, el número total de átomos disponibles para la absorción de la radiación por unidad de volumen disminuye, lo que produce una pérdida de sensibilidad. Esta interferencia depende tanto de la temperatura de la llama como del potencial de ionización del elemento en estudio.

La ionización puede ser detectada notando que la curva de calibración tiene una desviación positiva a concentraciones altas, dado que la fracción de átomos ionizados es menor a concentraciones mayores. Estas interferencias se pueden eliminar agregando a todas las soluciones estándar y a la muestra un exceso del elemento que sea fácilmente ionizable en la llama, por ejemplo: el sodio, potasio, litio o cesio, o mediante el empleo de una llama de menor temperatura.

Interferencias espectrales

En este tipo de interferencias, la radiación del elemento a determinar es directamente influenciada, existiendo interferencias espectrales de línea e interferencias espectrales de banda:

Las interferencias espectrales de línea ocurren cuando hay superposición de dos líneas atómicas o cuando éstas no son resueltas por el monocromador.

Un ejemplo para el primer caso se tiene en la determinación de trazas de zinc en una matriz de hierro, debido a que la línea de absorción del hierro (213.86 nm) se superpone a la línea de resonancia del zinc (213.86 nm).

El empleo de lámparas multielementos fabricadas con una combinación inadecuada de elementos puede producir interferencias del segundo tipo, si dentro de la banda espectral del monocromador se encuentra una línea de resonancia de otro elemento junto a la del elemento a determinar.

En general este tipo de interferencias no son frecuentes debido a la naturaleza muy específica de la longitud de onda que se usa en espectroscopia de absorción atómica. Si se llegan a presentar se pueden eliminar seleccionando una segunda línea de resonancia del elemento de interés (probablemente se obtenga mayor sensibilidad o empleando una ranura del monocromador más angosta).

Las interferencias espectrales de banda se producen debido a la absorción de la radiación por moléculas o radicales, y por dispersión de la radiación por sólidos. Para ambos efectos, que en principio son distintos, se emplea el término absorción de fondo. Aquí existe una pérdida de radiación no específica que lleva a absorbancias mayores que la absorbancia obtenida por el analito. La señal está compuesta por la absorción del elemento a determinar más la absorción no específica.

La absorción molecular ocurre cuando una especie molecular en el atomizador posee un perfil de absorción que se superpone al del elemento de interés. El espectro molecular del hidróxido de calcio muestra un máximo de absorción en la línea de resonancia del bario.

Este problema es más serio en la región espectral bajo los 250 nm, donde concentraciones altas de metales alcalinos y de otras sales muestran una alta absorción molecular.

La dispersión de la luz ocurre cuando partículas de sólidos causan una deflexión de parte de la radiación de la fuente fuera del eje del sistema monocromador-detector. Estos problemas son relevantes con muestras conteniendo altas concentraciones de elementos refractarios.

Los métodos más empleados en la corrección de la absorción de fondo (BG) son:

Método de corrección de doble línea.

En este método se realiza la medición de una línea de emisión no absorbida por el analito, cuyo valor se resta al valor de la medición obtenida a la longitud de onda de resonancia del analito. El método tiene la desventaja que a veces no es fácil disponer de una línea de no resonancia cercana a la línea de resonancia del analito.

Método de corrección continua de fondo.

La forma más eficaz para medir la absorción de fondo es realizar la medición empleando una lámpara de deuterio o de hidrógeno que emite un espectro continuo bajo los 320 nm. En estos instrumentos ambas fuentes radiantes (lámpara de cátodo hueco (LCH) y de deuterio (LD) son moduladas a la misma frecuencia, pero desfasadas, recorriendo el mismo camino óptico a través de la muestra en el monocromador para llegar al detector. Este observa alternadamente en el tiempo las dos fuentes radiantes. La absorción de fondo disminuye la intensidad de ambas fuentes, mientras que la absorción proveniente de la lámpara de cátodo hueco. La electrónica del instrumento separa ambas señales y compara la absorción de ambas fuentes entregando una señal corregida con respecto a la absorción de fondo.

3.1 Hipótesis:

Las sales oxidantes en medio ácido son mejores lixiviantes del Oro con respecto al cianuro de sodio para el mineral del yacimiento El Danto, ubicado en la Comarca El Danto con coordenada UTM 5257700 E, 14465 N, municipio de Somotillo, Chinandega, en el mes de Febrero del 2008.

4.1 Diseño metodológico

4.1.1 Ubicación geográfica del estudio

Este estudio se realizó en la empresa IBEROMINAS, S.A. ubicada en Villanueva municipio de Chinandega, km 193.5 carretera al Guasaule. La muestra para este estudio se tomó del yacimiento El Danto, Comarca El Danto Con coordenadas UTM 5257700 E y 14465 N, Somotillo, Municipio de Chinandega.

4.1.2 Tipo de estudio

Este es un estudio experimental, descriptivo, y analítico, para el cual se manipularon variables experimentales no comprobadas en condiciones controladas para describir el problema de estudio que fue objeto de investigación.

4.1.3 Universo de estudio

El universo del estudio estuvo constituido por la toma de una muestra de 50 kg de broza (mineral) tomada del corte transversal de una veta mineralizada del yacimiento El Danto.

4.1.4 Muestras

La muestra de estudio fue el total del mineral extraído de una veta del yacimiento El Danto, la cual estaba compuesta por rocas silicificadas, andesíticas y alterada.

De esta muestra se obtuvieron 16 réplicas.

Catorce réplicas se usaron para estudiar la capacidad de recuperación de las sales oxidantes, Conociendo el comportamiento de la lixiviación ante diferentes arreglos de cantidades de reactivos se tomaron cuatro muestras para conocer mejor la acción de las sales oxidantes en la extracción del oro. Las últimas dos muestras se tomaron para lixiviar con cianuro de sodio.

4.1.5 Selección de muestra

El punto de la toma de la muestra a analizar se tomó de una veta del yacimiento El Danto, Comarca El Danto, la cual presenta buenos valores de contenido de oro. La toma de la misma se hizo de forma transversal, para lo cual se hizo uso de una piqueta, una barra, y una pala para romper y recolectar el mineral.

4.1.6 Definición operacional de variables

Variable	Definición	Indicador	Escala
Ley inicial de los sólidos	Concentración de Oro en el mineral antes de ser lixiviado.	g / T	$L_i = 8.452$
Ley final de los sólidos	Concentración de Oro en el mineral después de ser lixiviado.	g / T	$L_f < 8.452$
Ley de soluciones	Concentración de Oro en la solución posterior a la lixiviación	g / T	$0 < L_s < 8.452$
Recuperación de Oro	Diferencia de la ley inicial de Oro en sólidos y la ley final de sólidos entre la ley inicial por cien.	%	0 - 100

4.1.7 Materiales para recolectar la información

- Revistas mineras.
- Fichas de contenido.
- Revisión bibliográfica
- Libros
- Tablas de datos
- Sitios Web
- Fotografías
- Manuales de operaciones

4.1.8 Materiales para procesar la información

- Matriz comparativa
- Flujograma

4.1.9 Métodos según el tipo de estudio

- Mixto (cuantitativo y cualitativo)
- Herramientas estadísticas
 - STATGRAPHICS Plus.
 - Microsoft Excel

4.1.10 Equipos, reactivos y método

4.1.10.1 Equipos

Equipo	Modelo	Compañía	Función
Secador	N.D	Diseñado por José Adán Rodríguez	Eliminar humedad
Agitador de rodillos	N.D	Diseñado por José Adán Rodríguez	Agitar, Mezclar,
Trituradora de mandíbula	Bico-Braun 2 ¼ " x 3"	Sepor	Reducción de tamaño < de 6 mm
Pulverizadora	De discos	Sepor	Reducción de tamaño < 75 micrones
Balanza de precisión	CBW6a	Sepor	Medición de masa
Micro balanza analítica	XP6Y	Metler Toledo	Medición de masa
Espectrómetro de absorción atómica	AAnalyst 100	PERKIN ELMER	Medición de absorbancias y concentración
Muflas	N.D	Diseñado por José Adán Rodríguez	Fundir y copelar
Filtro	A presión	Diseñado por José Adán Rodríguez	Separación de fases sólidas y líquidas
Plato de calentamiento	N.D	Diseñado por José Adán Rodríguez	Calentar y secar
Botellas plásticas	19 litros	Fuente pura	reactor
Matraces aforado de 100 ml	Pyrex de +/- 0.08 ml	Pyrex	Medición de volúmenes
Matraces aforado de 500 ml	Pyrex de +/- 0.16 ml	Pyrex	Medición de volúmenes
Probeta graduada de 1000 ml	Duran +/- 0.5		Medición de volúmenes

Equipo	Modelo	Compañía	Función
Pipetas volumétricas 1.0 ml	Fisherbrand +/-0.006 ml	Fisher Scientific	Medición de volúmenes
Pipetas volumétricas 5.0 ml	Fisherbrand +/-0.01 ml	Fisher Scientific	Medición de volúmenes
Pipetas volumétricas 10 ml	Fisherbrand	Fisher Scientific	Medición de volúmenes
pH metro portátil Orion	3 Star Plus	Fisher Scientific	Medición del potencial de Hidrógeno (pH)
Erlenmeyer de 125 ml	Pyrex	Fisher Scientific	Medición de volúmenes
Pinzas para régulos	De acero	Sepor	Encuadrar
Pinzas para capsulas de porcelana		Fisher Scientific	Sujetar cápsulas
Crisoles	Refractarios	Barahona Cia. LTDA	Fundir muestras
Copeles de Magnesita		Barahona Cia. LTDA	Copelación
Embudos de vidrio	Pyrex	Fisher Scientific	Filtrar
Tubos de ensayos de 25 ml	Pyrex	Fisher Scientific	Toma de muestra
Baldes plásticos de 20 L			Preparación de solución lixivante
Malla 200	Tyler	Sepor	Cuantificación del tamaño de partícula
Riffle Splitter	040G-009	Sepor	Para tomar representativa y aleatoriamente la muestra.

4.1.10.2 Reactivos

Nombre	Fórmula	Grado	Marca
Cloruro de sodio 99 %	NaCl	industrial	
Nitrato de sodio 99 %	NaNO ₃	Industrial	Uhuachem
Acido sulfúrico 98 %	H ₂ SO ₄	Industrial	Transmequím de Nicaragua
Óxido de plomo 99%	PbO	Industrial	Barahona Cia. Ltda.
Tetra borato de sodio 99.0 %	Na ₂ B ₄ O ₇	Industrial	Transmerquim de Nicaragua
Carbonato de sodio 99.0%	Na ₂ CO ₃	industrial	Transmerquim de Nicaragua
Azúcar	C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁	De mesa	San Antonio
Acido nítrico 70 %	HNO ₃	Reactivo	Fisher Scientific
Nitrato de plata	AgNO ₃	Reactivo	Fisher Scientific
Cianuro de sodio 99.0%	NaCN	Industrial	DUPON
Oxido de calcio 52 %	CaO	Industrial	Calera de San Rafael
Solución estándar de Oro 1000 ppm	Au	Reactivo	PERKIN ELMER

4.1.10.3 Lixiviación con sales oxidantes en medio ácido.

Para la realización de estos ensayos, se tomó broza procedente del yacimiento El Danto. Esta fue triturada en una trituradora de mandíbula hasta (ver imagen 9.1.2 de los anexos) lograr un diámetro equivalente de partícula de 6 mm, luego pulverizada en una pulverizadora de disco (ver imagen 9.1.3 de los anexos) hasta lograr a un diámetro equivalente de partícula de 75 micrones (menores que 200 mesh).

Materiales utilizados.

- 1 Agitador de rodillos.
- 1 Cuarteador (Riffle splitter)
- 4 Botellas plásticas de 19L.
- 1 Probeta de 2000 ml.
- 2 Baldes de 20L.
- 1 Balanza digital de 6000g.
- 1 Espectrofotómetro de absorción atómica AANALYST 100 PERKIN
ELMER
- 1 Filtro a presión de aire.
- 1 Mufla
- 28 Tubos de ensayo

28 Crisoles refractarios

28 Copeles

Reactivos utilizados:

- 14000 g de broza.
- 3600 g de cloruro de sodio grado industrial.
- 900 g de nitrato de sodio grado industrial 98 %.
- 3000 ml de ácido sulfúrico al 98 % de concentración.
- 24000 ml de agua normal sin destilar.

Procedimiento:

Para la lixiviación de las muestras con sales oxidantes en medio ácido por agitación en botellas los pasos que se dieron fueron los siguientes:

Como primera etapa fue hacer uso del programa estadístico STATGRAPHICS Plus en el cual se introdujeron valores masas para el cloruro de sodio de 150 g y 250 g y para el nitrato de sodio de 20 g y 50 g. Con estos valores el programa arrojó un diseño experimental de tipo factorial simple² como se

muestra en la tabla 5.1.1. Los rangos seleccionados fueron tomados producto de un minucioso y amplio estudio empírico de ensayo y error.

Con el diseño experimental arrojado por el programa se prepararon diez ensayos, que consistió en el pesando del mineral y reactivos, actividades mecánicas y operaciones realizadas así como se muestra a continuación:

1. Pesado de diez muestras de mineral de 1000 g cada una y colocadas en botellas plásticas de 19 litros cada una de ellas.
2. Adicionado 250 ml de ácido sulfúrico al 98 % a cada una de las botellas.
3. Se pusieron a rotar las botellas conteniendo las muestras y el ácido sulfúrico por un lapso de 1 h. A esta operación se le conoce como curado del mineral y consistió en impregnar la muestra con el ácido. Ver **imagen 9.1.4** de los anexos.
4. Pesado del cloruro de sodio y el nitrato de sodio según el diseño experimental para cada uno de los ensayos.
5. Medición de 2000 ml de agua y el agregado del cloruro de sodio y de nitrato de sodio ya pesados para cada uno de los ensayos.
6. Dosificación de los dos litros de solución salina a cada una de las botellas y se pusieron a rotar por 48 horas para agitar la pulpa (mineral mas solución salina). Ver **imagen 9.1.4** de los anexos.

7. Terminado el tiempo de agitación, se filtraron las pulpas (sólidos mas soluciones) para separar las fases sólidas de las fases líquidas de cada uno de los ensayos. Ya separadas ambas fases se analizaron las concentraciones de Oro de los sólidos y las soluciones.). Ver **imagen 9.1.4** y **9.1.6** de los anexos.

8. Con los resultados obtenidos se calcularon los porcentajes de recuperación para cada uno de los eventos haciendo uso de siguiente fórmula:

$$\% \text{ Rec.} = \frac{Li \text{ sólidos} - Lf \text{ sólidos}}{Li \text{ sólidos}} \times 100$$

9. Los datos de porcentajes de recuperación de Oro de cada uno de los eventos fueron introducidos en el programa estadísticos STATGRAPHICS Plus y este nos arrojó la ecuación de regresión que modela el diseño estadístico así como también diferentes gráficos que se muestran en los anexos y son objetos de discusión en el siguiente capítulo.

10. La ecuación de regresión se formuló en Microsoft Excel y se hicieron simulaciones para obtener las proporciones de cloruro de sodio y nitrato de sodio que nos optimizaría teóricamente la recuperación de Oro. Con esta información se prepararon cuatro ensayos de la misma forma que se

hicieron los diez anteriores para estudiar el comportamiento del mineral versus las diferentes cantidades de reactivos.

4.1.10.4 Lixiviación con soluciones cianuradas:

Para esto se prepararon dos ensayos de lixiviación con el mismo mineral en condiciones óptimas de pH y concentración de cianuro. El pesando del mineral y reactivos, actividades mecánicas y operaciones realizadas fue como se muestra a continuación:

Materiales usados.

- 1 Agitador de rodillos.
- 1 Cuarteador (Riffle splitter)
- 2 Botellas plásticas de 19L.
- 1 Probeta de 2000 ml.
- 2 Baldes de 20L.
- 1 Balanza digital de 6000g.
- 1 pH metro portátil Orion 3 Star Plus.
- 1 Espectrofotómetro de absorción atómica AANALYST 100 PERKIN
ELMER
- 1 Filtro a presión de aire.
- 1 Mufla

- 4 Tubos de ensayo de 25 ml
- 4 Crisoles refractarios
- 4 Copeles

Reactivos usados:

- 2000 g de broza.
- 50 g de cianuro de sodio al 99 %.
- 100 g de cal 45 %.
- 4 L de agua normal sin destilar.

Procedimiento:

1. Pesada de 1000g de broza para cada ensayo y se depositaron en las botellas plásticas.
2. Preparación de una solución de cal a $\text{pH} = 11$ para proteger el cianuro libre y evitar la formación de ácido cianhídrico que es altamente tóxico.
3. Una vez preparadas las soluciones de cal se les adicionó 2000 ml de agua a cada botella.
4. Ya preparada la solución alcalina se les adicionó 1 g cianuro de sodio.

5. Agitación durante un periodo de tiempo de 48 horas.
6. Filtrado de las pulpas (soluciones más sólidos) para separar las fases sólidas de las fases líquidas.
7. Una vez separadas ambas fases se analizaron para determinar las concentraciones de Oro en los sólidos y las soluciones y la determinación del porcentaje de recuperación de Oro de la misma manera que se hizo para sales.

4.1.10.5 Ruta analítica para el análisis de muestras geológicas (minerales).

1.0 Preparación de las muestras:

- Secado: se depositaron las muestras en bandejas de metal y se metieron en un secador a 110 °C durante un tiempo de 2 horas con el propósito de eliminar la humedad.
- Triturado: Las muestras fueron trituradas hasta obtener diámetros de partículas menores o iguales a 6 mm. Para el caso de las muestras ya lixiviadas esta etapa se omitió.
- Cuarteado: Las muestras fueron tomadas representativas y aleatoriamente.

- Pulverizado: Las partículas de las muestras fueron reducidas de tamaño a diámetros equivalentes menores que 200 mesh (75 micrones) con el propósito de aumentar la superficie de contacto de la muestra con los reactivos.

2.0 Pesado de las muestras y del fundente:

Preparación de los crisoles refractarios. Esta preparación consistió en limpiarlos con aire a presión, y enumerarlos en orden de menor a mayor.

Se pesaron las muestras, los reactivos y se colocaron en sus respectivos crisoles (ver **imagen 9.1.7**). Las cantidades pesadas fueron las siguientes:

- 30 g de la muestra.
- 36.4 g de bórax.
- 26.0 g de soda.
- 65.0 g de litargirio.
- 2.0 g de harina.
- La mezcla de reactivos y muestras se homogenizaron bien para lograr una perfecta fundición.
- Se agregaron 2.0 ml de nitrato de plata.

FUNDICIÓN:

- 1 Los crisoles se introdujeron en una mufla a 1100°C por un tiempo de 60 min. Ver **imagen 9.1.9** de los anexos.
- 2 Se precalentaron los moldes cónicos.
- 3 Ya fundidas las muestra, fueron vertidas en los moldes cónicos, y se esperó a que se enfriaran hasta que se cristalizaron las escorias vítreas de las superficies de las muestras.
- 4 Ya frías las muestras fueron quebradas las escorias vítreas de cada una de ellas para separar los régulos de Plomo que contenías al Oro y demás metales.
- 5 Los régulos de Plomo fueron quebrados con un martillo.
- 6 Se limpiaron los copeles, enumerarlos de menor a mayor, y se metieron en la mufla a calentar por 20 min a 950 °C.
- 7 Se depositaron de acuerdo al orden seguido los régulos de Plomo en los copeles y se dejaron en la mufla durante 45 min a una temperatura de 950 °C.
- 8 Culminado el tiempo de copelación retiramos los copeles de la mufla y se dejaron enfriar. En esta etapa se obtuvieron los botoncitos de Oro y Plata.

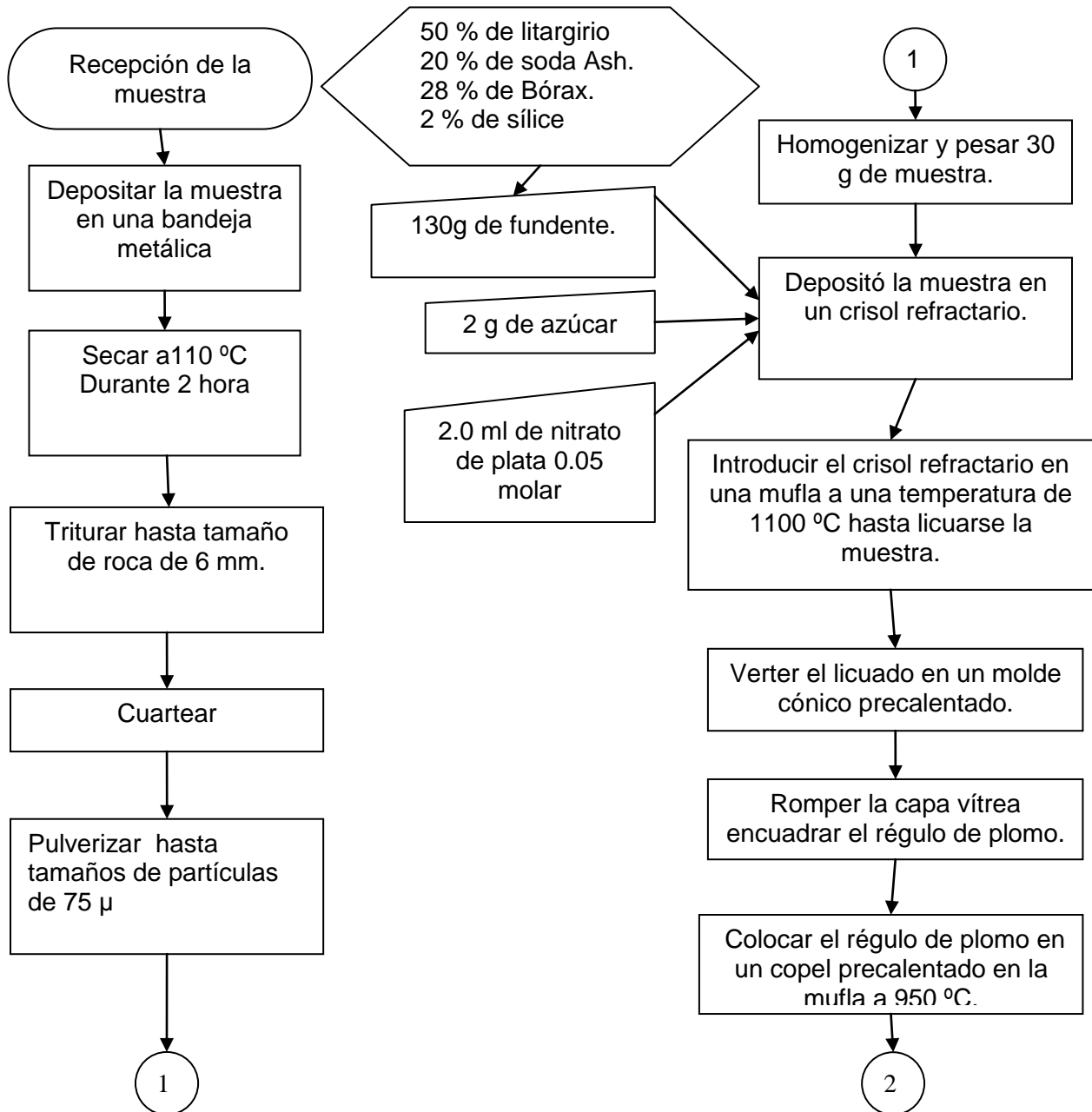
Nota: Fue de suma importancia el pre calentado de los copeles ya que de no hacerse las muestra salpicarían y se hubieran perdido parte de las mismas, de igual manera sucedería si no se controla la temperatura.

4.0 PARTICIÓN:

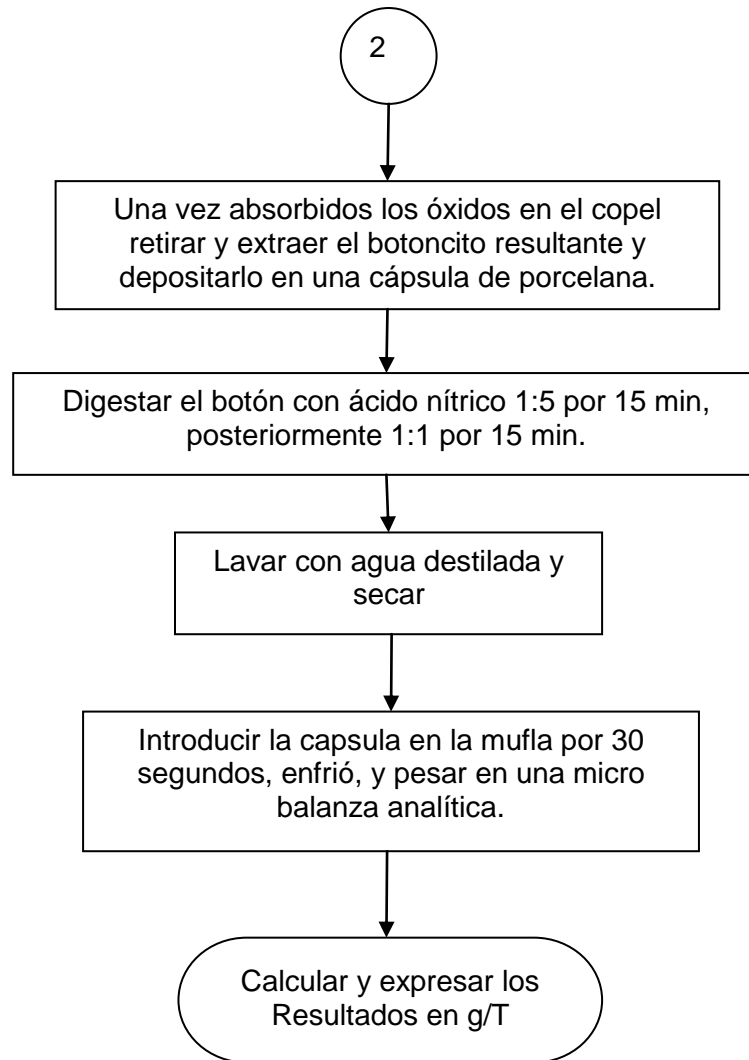
1. Los botoncitos de Oro y Plata fueron retirados de los copeles y martillados con el fin de aumentar la superficie de contacto de los mismos. Este procedimiento fue necesario para que los ácidos reaccionaran con la Plata.
2. Se depositar los botoncitos martillados en cápsulas de porcelana.
3. Se adicionaron 20 ml de ácido nítrico 1:5 a cada una de las cápsulas en caliente (90 °C) durante 15 min.
4. Se decantaron y lavaron con agua destilada.
5. Se adicionaron 20 ml de ácido nítrico 1:1 a cada una de las cápsulas en caliente (90 °C) durante 15 min.
6. Se decantaron y lavaron con agua destilada.
7. Los botoncitos resultantes fueron secados, se metieron en la mufla por 30 segundos a 950 °C para darles brillo metálico.
8. Los botoncitos resultantes fueron pesados en una micro balanza analítica y se apuntaron los resultados para cada una de las muestras respectivamente.

9. Se realizaron los cálculos para cada uno de los datos obtenidos y expresarlos en g/T.

Diagrama 4.1 Ruta analítica para muestras sólidas (referido a una muestra)



Continuación



4.1.10.6 Ruta analítica para soluciones lixiviadas con sales por espectrometría de absorción atómica:

Preparación de la solución madre de Oro para la preparación de los estándares de la calibración.

Preparación de la solución madre

1. Se preparó una solución madre de Oro a una concentración de 50 ppm a partir de un estándar certificado (Gold (Au) Perkin Elmer Pure AS Calibration Standard, Matrix: 10% HCl, Starting Material: Au, 500ml) con una concentración de Oro de 1000 ppm.

Procedimiento:

2. Se Calculó el volumen de solución de estándar certificado de la siguiente manera:

Concentración deseada (C_2):	50 ppm
Volumen deseado (V_2):	500 ml
Concentración del estándar (C_1):	1000 ppm
Volumen a calcular (V_1):	?

3. Con estos datos se aplicó la ley de la volumetría y se sustituyó de la siguiente forma:

$$V_1 * C_1 = V_2 * C_2$$

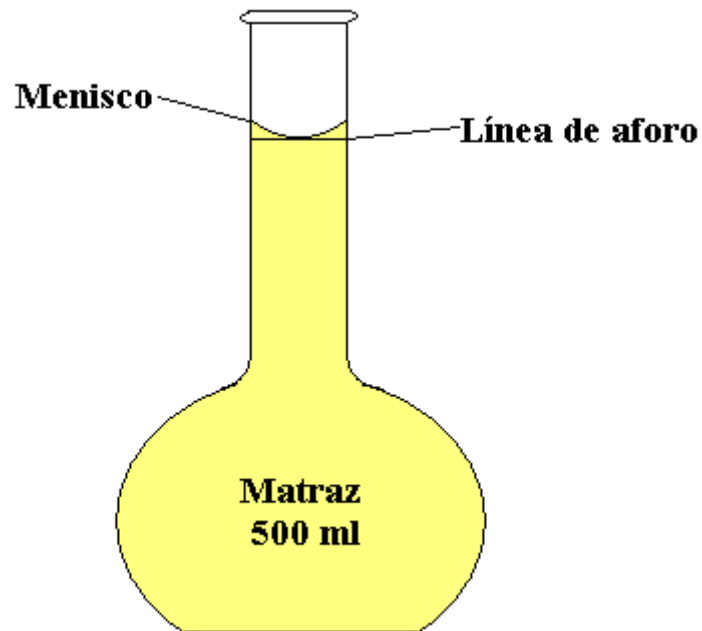
$$V_1 * 1000 \text{ ppm} = 500 \text{ ml} * 50 \text{ ppm}$$

$$V_1 = \frac{500 \text{ ml} * 50 \text{ ppm}}{1000 \text{ ppm}} = 25 \text{ ml}$$

$$V_1 = 25 \text{ ml}$$

4. Se midió con una pipeta volumétrica una alícuota de 25 ml de una solución patrón certificada y se adicionó en un matraz aforado de 500 ml.
5. El matraz fue enrasado con agua destilada hasta la línea de aforo así como se muestra en la siguiente figura.

Figura 4.1



Nota: Toda la cristalería que se usó en las mediciones de volúmenes se lavó bien, secó y endulzó con las soluciones que se midieron.

Preparación del juego de estándares de calibración

Se preparó un juego de estándares de concentración conocida en matraces volumétricos de 100 ml de forma tal que la calibración de la recta fuera lineal. Las concentraciones de los estándares fue de $C_1=1.0\text{ppm}$, $C_2 = 2.5 \text{ ppm}$, y $C_3 = 5.0 \text{ ppm}$. Estos se prepararon a partir de la solución madre de 50 ppm preparada anteriormente.

Procedimiento de preparación del estándar # 1:

1. Se calculó volumen de solución madre.

Concentración deseada (C_2): 1.0 ppm

Volumen deseado (V_2): 100 ml

Concentración de la Sol. Madre (C_1): 50.0 ppm

Volumen a tomar (V_1): ?

Con estos datos se aplicó la ley de la volumetría y se sustituyó de la siguiente manera:

$$V_1 * C_1 = V_2 * C_2$$

$$V_1 * 50.0 \text{ ppm} = 100 \text{ ml} * 1.0 \text{ ppm}$$

$$V_1 = \frac{100 \text{ ml} * 1.0 \text{ ppm}}{50.0 \text{ ppm}} = 2.0 \text{ ml}$$

$$V_1 = 2.0 \text{ ml}$$

2. Se midió con una pipeta una alícuota de 2 ml de solución madre y se depositó en un matraz aforado de 100 ml.

3. Se midió 25 ml de solución matriz (80 ml de HCl al 38 %, 20 ml de HNO₃ al 70 % aforado a 1000 ml en un matraz volumétrico) y se depositó en el matraz
4. Se aforó con agua destilada.

Procedimiento de preparación del estándar # 2:

1. Se calculó volumen de solución madre.

Concentración deseada (C₂): 2.5 ppm

Volumen deseado (V₂): 100 ml

Concentración de la Sol. Madre (C₁): 50.0 ppm

Volumen a tomar (V₁): ?

Con estos datos se aplicó la ley de la volumetría y se sustituyó de la siguiente manera:

$$V_1 = \frac{100 \text{ ml} * 2.5 \text{ ppm}}{50.0 \text{ ppm}} = 5.0 \text{ ml}$$

$$V_1 = 5.0 \text{ ml}$$

2. Se midió con una pipeta una alícuota de 5 ml solución madre y se depositó en un matraz aforado de 100 ml.
3. Se midió 25 ml de solución matriz y se depositó en el matraz.

4. Se aforó con agua destilada.

Procedimiento de preparación del estándar # 3:

1. Se calculó el volumen de solución madre.

Concentración deseada (C_2): 5.0 ppm

Volumen deseado (V_2): 100 ml

Concentración de la Sol. Madre (C_1): 50.0 ppm

Volumen a tomar (V_1): ?

Con estos datos se aplicó la ley de la volumetría y se sustituyó de la siguiente manera:

$$V_1 = \frac{100 \text{ ml} * 5.0 \text{ ppm}}{50.0 \text{ ppm}} = 10.0 \text{ ml}$$

$$V_1 = 10.0 \text{ ml}$$

2. Se midió con una pipeta una alícuota de 5 ml de solución madre y se depositó en un matraz aforado de 100 ml.

3. Se midió 25 ml de solución matriz.

4. Se aforó con agua destilada.

Con el juego de estándares preparados se procedió a la lectura de los valores en el espectrómetro de absorción atómica AAnalyst 100 (ver **imágenes 9.1.10 y 9.1.11**) para lo cual se calibró una recta. Para todo este proceso nos auxiliamos del software AAwinlab de Perkin Elmer.

Análisis de las soluciones lixiviadas con soluciones cianuradas por espectrometría de absorción atómica:

Para el análisis de las soluciones cianuradas el procedimiento fue el mismo pero la matriz empleada para la preparación del juego de estándares fue distinta.

Preparación de la solución matriz:

1. Se pesó 4.5 g de óxido de calcio al 45 % y se disolvió en 100 ml de agua destilada. Para disolver el óxido de calcio hubo que agitar vigorosamente. Posteriormente se filtró y lavó 3 veces el sólido con agua destilada y se trasegó a un matraz aforado de 1000 ml.
2. Se pesó 2 gramos de cianuro de sodio que se adicionaron en el matraz de 1000 ml, se agitó hasta disolver todo el cianuro y se enrazó con agua destilada.

Nota: Fue importante agregar primero el óxido de calcio para fijar el pH = 11 y evitar la formación de ácido cianhídrico y por ende la pérdida de cianuro libre.

5.1 Discusión y análisis de resultados

Análisis del contenido de oro en la muestra por el método de ensayo al fuego.

Se realizaron ocho análisis para determinar la media aritmética, la varianza, desviación estándar, y el error estándar auxiliándonos de las fórmulas estadísticas de Microsoft Excel.

La selección de las ocho muestras se realizó mediante el cuarteo, para esto se utilizó un cuarteador Jones Niffle Splitter.

Tabla 5.1.1 Resultados de análisis de Oro en sólidos antes de lixiviarse.

Nº	Muestra	Resultados
1	M1 ₁	8.460 g / T
2	M1 ₂	8.740 g / T
3	M1 ₃	8.540 g / T
4	M1 ₄	8.467 g / T
5	M1 ₅	8.480 g / T
6	M1 ₆	8.393 g / T
7	M1 ₇	8.291 g / T
8	M1 ₈	8.243 g / T
9	Media	8.452 g / T
10	Desviación estándar	0.124

La **desviación estándar** de estos resultados nos da una medida de centralización o sea nos dice cuánto están alejados del valor promedio.

Tabla 5.1.2: Resultados de los análisis de Oro en sólidos y soluciones producto de la lixiviación con sales Oxidantes, primera etapa.

Nº	Botella	NaCl g	NaNO ₃ g	L _{i sólidos} g/T	L _{f sólidos} g/T	L _{soluciones} g/T	Recup. %
1	A1	150	20	8.452	4.624	3.828	45.29
2	A2	250	20	8.452	4.314	4.138	48.96
3	A3	150	50	8.452	3.513	4.939	58.44
4	A4	250	50	8.452	3.743	4.709	55.71
5	A5	129.29	35	8.452	5.234	3.218	38.07
6	A6	270.71	35	8.452	3.716	4.736	56.03
7	A7	200	13.79	8.452	4.993	3.459	40.93
8	A8	200	56.21	8.452	3.207	5.245	62.06
9	A9	200	35	8.452	2.609	5.843	69.13
10	A10	200	35	8.452	2.759	5.693	67.36

Observación: El pH de las soluciones fue: pH < 1

De acuerdo a los resultados obtenidos en la tabla anterior, producto de los análisis realizados del contenido de oro en los sólidos, antes y después de ser lixiviados muestra que las sales oxidantes lixivian al Oro y el ensayo el cual presenta mejores resultados de transferencia de masa (Oro), es el nueve. Esto quiere decir que a altas concentraciones de Cloruro de sodio, presuntamente, la lixiviación es mejor.

Al introducir los porcentajes de recuperación al programa STATGRAPHICS Plus, este nos brindó la información para poder optimizar el proceso de lixiviación, la cual es la siguiente:

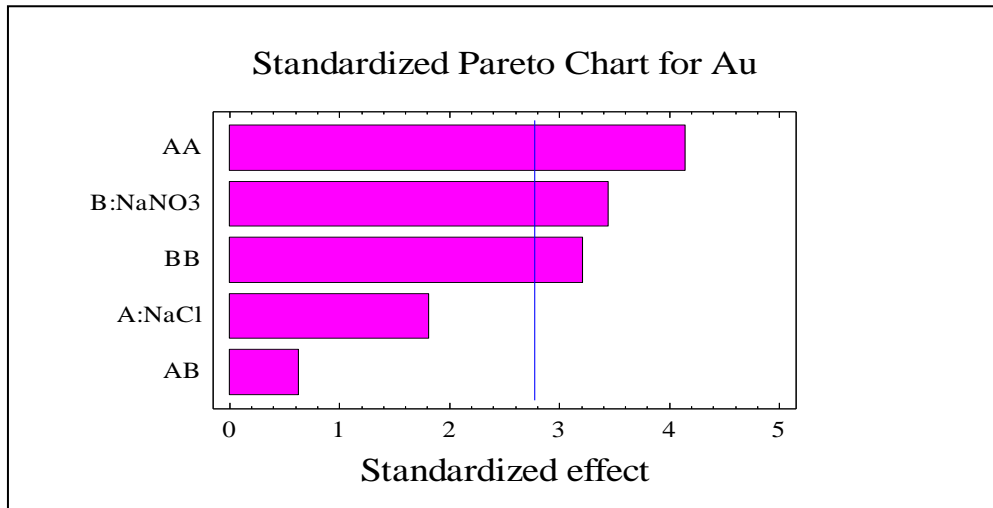
Tabla 5.1.3 Efectos Estimados para Oro

Average	= 5.79	+/- 0.305065
A:NaCl	= 0.553866	+/- 0.305064
B:NaNO3	= 1.05195	+/- 0.305065
AA	= -1.67449	+/- 0.40356
AB	= -0.27	+/- 0.431426
BB	= -1.2955	+/- 0.403563

En la tabla 5.1.3 de efectos estimados podemos notar que los signos de los efectos A y B, Cloruro de sodio y Nitrato de sodio respectivamente, son positivos. Esto quiere decir que ambos efectos están en su nivel mínimo, por lo cual deben de ser maximizados.

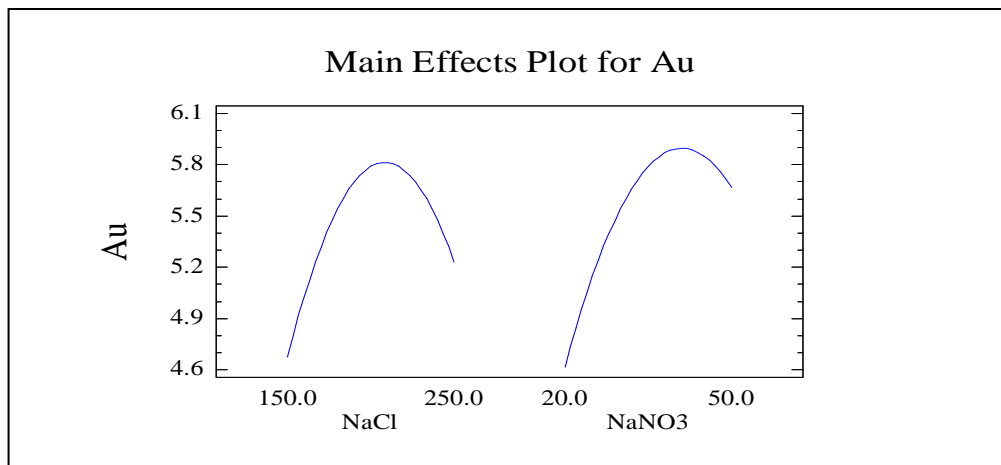
Para el caso de las interacciones AA, AB, y BB, los signos son negativos lo cual significa que no existe interacción entre ellos, por lo tanto no existe significancia entre los factores en estudio.

Diagrama 5.1.1 de Pareto



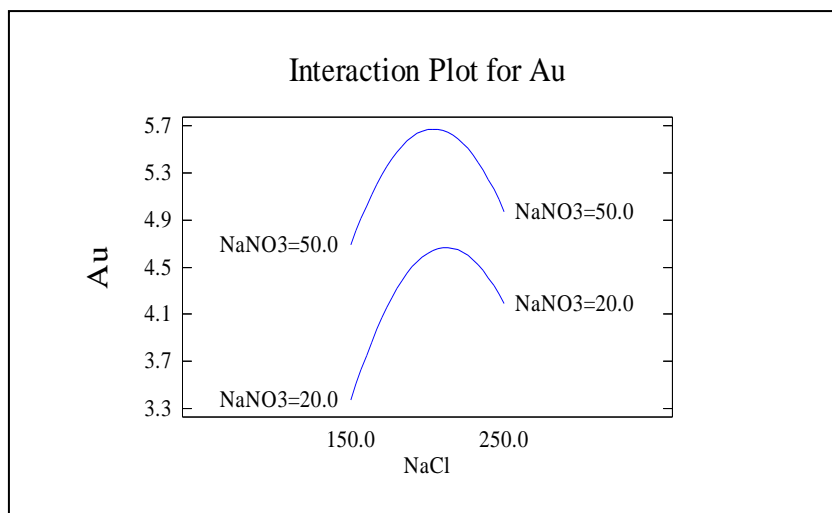
En diagrama 5.1.1 de Pareto estandarizado se puede apreciar el grado de importancia de los factores e interacciones, los factores que tienen más significancia son los que sobrepasan la línea vertical.

Diagrama 5.1.2 de los efectos principales



En el diagrama 5.1.2 de efectos principales para el Oro, el factor más determinante es el Nitrato de Sodio, el cual presenta un punto de inflexión mayor que el Cloruro de Sodio.

Diagrama 5.1.3 del plano de interacción



El diagrama 5.1.3 de plano de interacciones nos da la información de que no existe interacción entre los factores, lo cual nos demuestra gráficamente que son independientes uno del otro y no existe significancia entre ellos.

Diagramas 5.1.4 Superficie respuesta estimado tridimensional

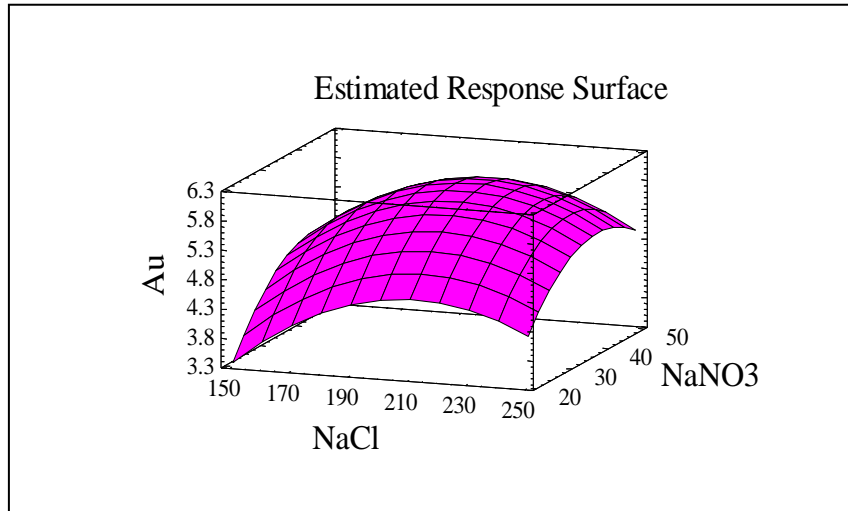
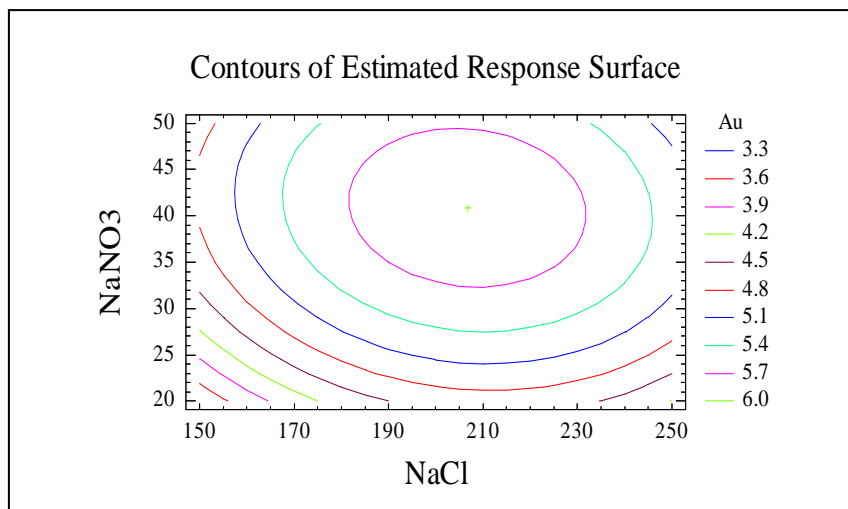


Diagrama 5.1.5 Superficie respuesta estimado bidimensional



En los diagramas 5.1.4 y 5.1.5 tanto en el espacio como en el plano nos da un punto óptimo de recuperación de oro, cuando tenemos 206.695 g / T de Cloruro de sodio y 40.882 g / T de Nitrato de sodio.

La **ecuación de regresión** que modela este experimento es la siguiente:

Ecuación 1

$$Au = -14.7276 + 0.145798*A + 0.272588*B - 0.000334898*(A)^2 - 0.00018*A*B - 0.0028789*(B)^2$$

Descripción:

A: NaCl

B: NaNO₃

Si en esta ecuación le damos el valor cero al cloruro de sodio (A) entonces tenemos la siguiente ecuación:

Ecuación 2

$$Au = -14.7276 + 0.272588*B - 0.0028789*(B)^2$$

Si ahora le damos el valor cero al nitrato de sodio (B) entonces nos da la siguiente ecuación:

Ecuación 3

$$Au = -14.7276 + 0.145798*A - 0.000334898*(A)^2$$

Al observar ambas ecuaciones se observa claramente la mayor significancia del nitrato de sodio por ser menos negativo con respecto al cloruro de sodio.

La ecuación de regresión obtenida por STATGRAPHICS Plus se formuló en Microsoft Excel, se le introdujeron valores de cloruro de sodio y nitrato de sodio para determinar teóricamente el valor óptimo. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Tabla 5.1.4 Resultados de los análisis de Oro en sólidos y soluciones producto de la lixiviación con sales Oxidantes, segunda etapa.

Nº	Botella	NaCl	NaNO ₃	L _{inicial}	L _{final}	L _{soluciones}	Recup.
		g	g	g/T	g/T	g/T	%
1	A11	250	50	8,452	1,446	7,006	82,89
2	A12	300	50	8,452	1,402	7,05	83,41
3	A13	250	65	8,452	2,569	5,883	69,60
4	A14	300	65	8,452	0,396	8,056	95,31

Observación: El pH de las soluciones fue: pH < 1

Es claro que el ensayo con mejores resultados o el óptimo, es el número cuatro. De acuerdo a la cinética de la ecuación esta alcanza la velocidad limite, cuando la razón de concentración de iones nitrato y cloruro en solución es igual a cuatro punto cinco y la relación obtenida fue de **1 : 4.61**, lo cual significa que hay correspondencia entre la teoría y la práctica.

Esto corrobora también que la estequiometría de la ecuación se corresponde con los resultados obtenidos, porque se requieren una relación de 1:4 de nitrato de sodio a cloruro de sodio. De esto podemos constatar la gran importancia de la relación de las dos concentraciones.

Tabla 5.1.5 Resultados producto de la lixiviación con soluciones de cianuro de sodio en condiciones óptimas de cianuro de sodio y pH:

N°	Botella	NaCN %	pH	L _{inicial} g/T	L _{final} g/T	L _{soluciones} g/T	Recup. %
1	A15	0,05	11	8,452	1,063	7,389	87,42
2	A16	0,05	11	8,452	1,087	7,365	87,14

De los dos ensayos corridos con soluciones cianuradas en condiciones óptimas se obtuvo una media de 87.31 % de recuperación, el cual es inferior al valor óptimo al ser lixiviado con sales.

6.1 Conclusiones

- ✓ Los resultados obtenidos de los diferentes ensayos, demuestra que la lixiviación con sales en medio ácido de broza aurífera, para la extracción de Oro es un procedimiento viable de lixiviación para el mineral procedente del yacimiento El Danto, dado que pueden obtenerse valores hasta del 95,31 % de recuperación de Oro y por tanto demuestra que la hipótesis es positiva.

- ✓ Las condiciones óptimas de lixiviación con sales oxidantes se logró cuando la relación de nitrato de sodio (NaNO_3) y cloruro de sodio (NaCl) fue de **1 : 4,61**, lo cual se corresponde a la estequiometría de la ecuación del proceso.

- ✓ Por otra parte se pudo demostrar que en la lixiviación con sales oxidantes se obtienen mejores resultados que con la lixiviación con cianuro de sodio para el beneficio de la broza del yacimiento El Danto. Esta diferencia fue de 7,89%. Este valor es significativo a lo que a onzas troy de Oro respecta en un proceso productivo y en la relación costo beneficio. Ver anexo Tabla 9.1.1 y 9.1.2

7.1 Recomendaciones

- ✓ Se debe seguir profundizando en el estudio de este método para evaluar su comportamiento metalúrgico con otros yacimientos ya que la mineralogía varía y esto puede provocar distintas reacciones al proceso.
- ✓ Debe comprobarse el método con otros sistemas que no sean por agitación como la lixiviación en columnas e inundación para ver el comportamiento de la velocidad de disolución del Oro.
- ✓ Comprobar el método con diferentes tamaños de roca para probar la capacidad de permeabilidad de la sustancia lixivante.
- ✓ Investigar la lixiviación con las sales oxidantes para estudiar el comportamiento de otros metales de alto valor económico como el Platino, el Rodio y Paladio.
- ✓ En Nicaragua contamos con grandes potenciales mineros. La gran minería abusa del cianuro, reactivo peligroso en su manipulación, pero mejor recurso para la lixiviación y obtener mejor rendimiento. La pequeña minería se ve limitada por la ley, a trabajar en condiciones paupérrimas para la extracción del oro con el uso de Mercurio y los índices de

recuperación no llegan ni al 50 %. Por ello, las sales oxidantes en medio ácido, como otros métodos, deben de investigarse para aplicarlos y mejorar las condiciones de trabajo de los pequeños mineros, sustituir el uso de reactivos como el cianuro porque siempre hay una mejor manera de hacer las cosas.

8.1 Bibliografía

1. Araminio O., Jacinto N, (1993). *Lixiviación de oro en medio clorurante-oxidante, Primera Conferencia sobre Metalúrgica del Oro y la Plata*, Oruro Bolivia.
2. Cummins Arthur B,(1973, Given Ivan A, (1973). *SME Mining Engineering Handbook, Vol II*, New York, Editorial Advisory Borrada, 1ª Edition.
3. Napoleón Maldonado Cruz, (1999). *Proyecto de Explotación Mineral*, IBEROMINAS, S.A., Managua.
4. Treybal Robert E., (1985). *Operaciones con Transferencia de Masa*, Cuba Edición Revolucionaria, 1ª Edición.
5. P. C. Severo, (2004). *Diseño Experimental Aplicado a la Ciencia y Tecnología*, Perú, Editorial CONCYTEC, Primera Edición.
6. Fleming, C., (1992). *Hidrometallurgy of Precious Metals Recovery*, *Hidrometallurgy* 30, 127-162.
7. P. C. Severo, (2005). *Ingeniería de Procesos*, Editorial CONCYTEC, Perú, 1ª Edición.
8. Szczygiel, S, (1984). *Metalurgia no ferrosa*, México, 1ª Edición. Ed. Limusa.

9. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica*, 2002; 5(10): 44-51

10. P. C. Severo, Gallego P Edwin, (2004). *Workshop Práctico del Oro*, (Perú), Editorial INEA, 1ª Edición.

11. Rosabal Vega Julio, Valle Matos Manuel, (1989). *Hidrodinámica y Separaciones Mecánicas*, Cuba, Editorial ENPES, Sobre La Presente Edición.

9.1 ANEXO



Alternativa medio ambiental al procesamiento de minerales

Lima - Perú, mayo 26, 2006

Quien suscribe Severo Palacios Calizaya en su calidad de CEO Proceso SEVERO®, oriundo del Perú, con DNI N° 00469027, autoriza a José Adán Rodríguez con Cédula de Identidad N° 161-261067-0003L, oriundo de la republica de Nicaragua – América Central, quien representará al Proceso SEVERO® ante las distintas compañías mineras de América Central (Costa Rica, Honduras, San Salvador, Guatemala, Santo Domingo y Nicaragua), que estén interesados en utilizar dicha tecnología ambiental para el procesamiento y recuperación de minerales auríferos.

El Proceso SEVERO®, tecnología 100% peruana, en estos momentos viene siendo implementada a nivel internacional por compañías minera que ven el futuro provisor del presente proceso como una de las mejores alternativas frente al uso convencional del cianuro y otros agentes lixiviantes, ya que la recuperación de los materiales valiosos y la posterior disposición de los desmontes no ocasionan ningún tipo de contaminantes al ecosistema.

Queda usted como representante del Proceso SEVERO® en América Central. Atentamente,

© Palacios C. Severo
CEO Proceso SEVERO®

espc02@yahoo.com

Celular: (511) 96696214 – Perú Celular:
(505) 4566216 – Nicaragua Lima – Perú

joseadan_rodriguez@yahoo.es

Teléfono: (505) 8825159

Celular: (505) 6694291

Villanueva, Chinandega – Nicaragua, Km.
193.5 Carretera al Guasaule

Imagen 9.1.1 **Ubicación geográfica del yacimiento El Danto**

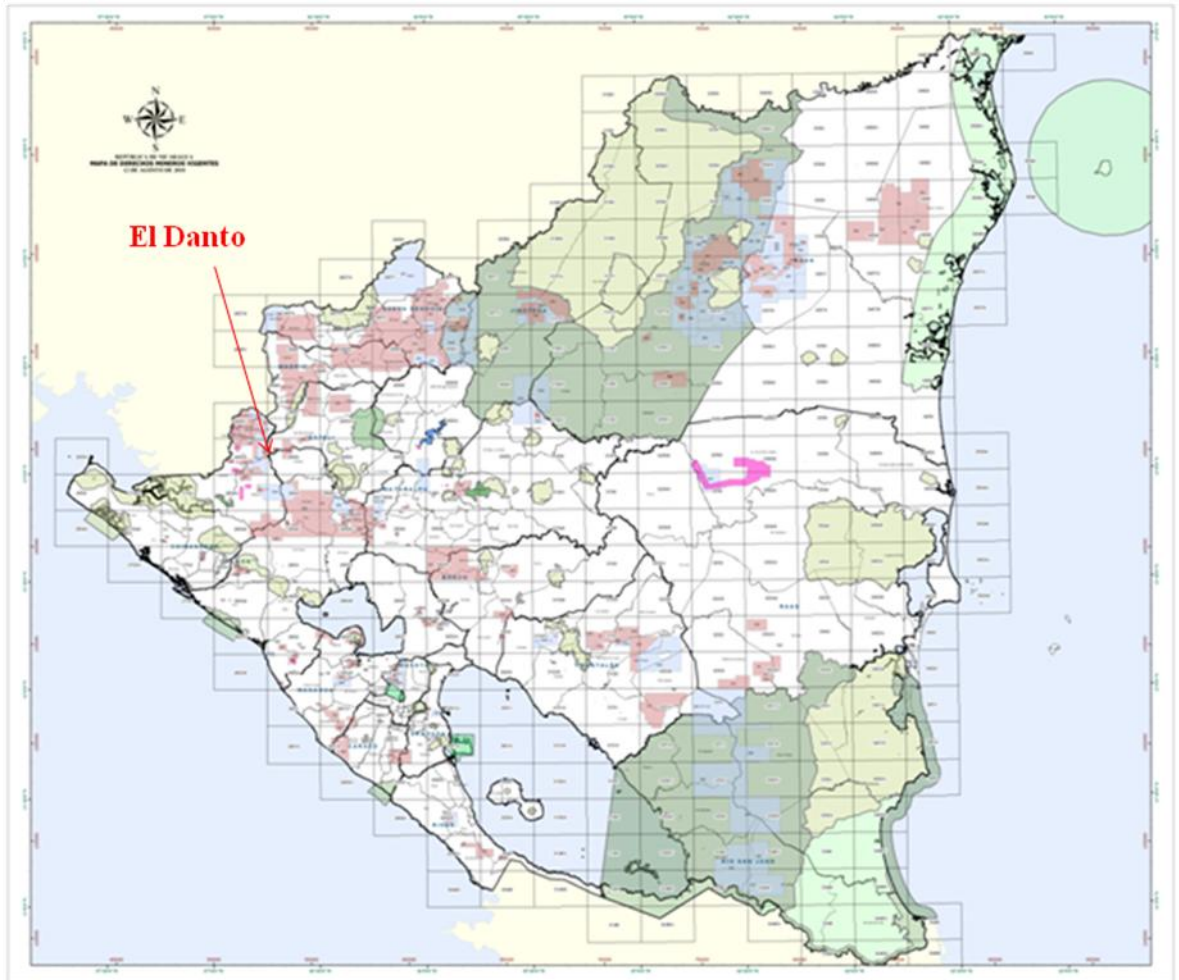


Imagen 9.1.2 Trituradora de mandíbula Bico-Braun.



Imagen 9.1.3 Pulverizadora de disco Bico-Braun.



Imagen 9.1.4

**Agitador de rodillos para la agitación de
De las muestras.**



Imagen 9.1.5

**Filtro a presión para la separación de la fase
Sólida y líquida**



Imagen 9.1.6 Soluciones producto de la lixiviación con sales.



Imagen 9.1.7 Crisoles refractarios conteniendo las muestras sólidas con fundente.



Imagen 9.1.8 Muflas para la fundición y copelación de las muestras.



Imagen 9.1.9 Introducción de las muestras en la mufla a 1200 °C



**Imagen 9.1.10 Espectrofotómetro de absorción atómica
AAAnalyst 100 de Perkin Elmer.**



**Imagen 9.1.11 Análisis de soluciones por espectrometría de
absorción atómica**



Tabla 9.1.1 Costos para el proceso de cianuración.

COSTOS TOTALES PROCESO POR CIANURACIÓN		
Volumen de producción: 100 T / día		
Nº	DESCRIPCIÓN	Costo
		\$/mes
1	Energía	28400,74
2	Salarios	13973,07
3	Insumos para la planta de beneficio	16887,62
4	Aditivos y correas	1273,40
5	Gastos administrativos	2975,00
6	Costo de combustible y otros en minas	30150,00
7	Análisis de muestras	6787,30
8	Amortización	16666,67
9	Costo total	100447,12
11	Costo por onza producida (\$/onzt)	188,57
12	Costo por tonelada procesada (\$/T)	35,87

Tabla 9.1.2 Costos para el proceso con sales.

COSTOS TOTALES, PROCESOS SALES		
Volumen de producción: 100 T / día		
Nº	DESCRIPCION	Costos
		\$/mes
1	Reactivos	27375,00
2	Geomembrana	1199,70
3	Energía	11414,81
4	Salarios	11500,00
5	Análisis de muestras	7027,06
6	Regalías a Severo, 0.50 \$/Ton	1500,00
7	Amortización	5035,03
8	Costo total	65051,60
9	Costo por onza producida (\$/onzt)	83,71
10	Costo por tonelada procesada (\$/T)	21,68

9.2 Glosario

Calcita:	es un mineral del grupo de los Carbonatos, grupo V/B de la clasificación de Strunz.
Chancado:	El chancado, es un proceso que permite disminuir el tamaño de las rocas mineralizadas, moliéndolas o triturándolas usando máquinas chancadoras o molinos especiales para este fin.
Cianuración:	Proceso de dosificación de cianuro de sodio en medio alcalino para disolver el Oro y la Plata.
Cuarteo:	Toma aleatoria y representativa de la muestra.
Deslamar:	Proceso de separación de la amalgama de Mercurio Oro y Plata de las arenas.
Filoniano:	<ol style="list-style-type: none">1 Relativo al filón mineral.2 En geología, se aplica a las rocas formadas en la grietas naturales del terreno al enfriarse el magma.
Flotación:	Es el aprovechamiento de las diferentes características fisico-químicas de la superficie de los minerales para el proceso de separación, algunos minerales en una pulpa de grano fino se vuelven hidrófobos añadiéndoles reactivos (colectores, activadores).
Ganga:	Mineral secundario de bajo valor que acompaña a los minerales valiosos.
Granítica:	De granito , también conocido como pedra berroqueña , ¹ es una roca ígnea plutónica constituida esencialmente por cuarzo, feldespato y mica. Es la roca más abundante de la corteza continental. Se produce al solidificarse lentamente y a muy alta presión magma con alto contenido en sílice producto de la fusión de las rocas que forman los continentes, sometidas al calor del manto terrestre en la parte inferior de éstos.
Gravimetría:	Proceso de concentración basado en la diferencia de pesos específicos entre el mineral valioso y la ganga (estériles).

Ley:	Contenido de Oro en el mineral expresado en g / T.
Lixiviación:	Es la solución preferencial de uno o más componentes de una mezcla sólida por medio del contacto de un solvente líquido.
Material refractario	es aquel capaz de resistir las condiciones del medio en el que está inmerso sin alteraciones importantes en sus propiedades físico-químicas, durante un determinado período.
Mena:	Es un mineral del que se puede extraer un elemento, un metal generalmente, por contenerlo en cantidad suficiente para ser aprovechado.
Metalurgia	Es la ciencia y técnica de la obtención y tratamiento de los metales desde minerales metálicos, hasta los no metálicos.
Molinete:	Molino de piedra muy rústico similar a un mortero en el cual se procesan hasta diez libras de mineral.
Oro electrum:	Es una aleación de Oro y Plata y trazas de cobre.
Paneo:	Procedimiento gravimétrico para separar metales de la ganga.
Periplutónicas:	Rocas magmáticas formadas por la lenta cristalización de un magma a cierta profundidad, y en general granudas, con textura equigranular y en grandes volúmenes, homogéneas. En <i>sesu lato</i> se incluyen las rocas filonianas, formadas en el borde de los plutones, llamadas también periplutónicas (antiguamente rocas de profundidad media).
Pirita:	Es un mineral del grupo de los sulfuros cuya fórmula química es FeS₂ . Tiene un 53,4% de azufre y un 46,4% de hierro.
Placeres:	Zona de aluviones donde están acumulados minerales explotables.
Precipitación:	Proceso de reducción de Oro a expensas de la oxidación del Zinc.

Pulpa:	Combinación de mineral molido con solución cianurada.
Rastra:	Planta artesanal para procesar mineral con el uso del Mercurio.
Relaves:	Son desechos tóxicos subproductos de procesos mineros y concentración de minerales, usualmente una mezcla de tierra, minerales, agua y rocas.
Riolita:	Es una roca ígnea volcánica que se produce por la violenta salida al exterior de la Tierra de magma.
Sopletear:	Suministrar calor mediante el empleo de un equipo soplete de oxígeno.
Veta:	Faja o lista de una materia que se distingue de la masa que se halla interpuesta.