

7. LIXIVIACIÓN DE MINERALES DE ORO Y PLATA

Aparte de la amalgamación usada en los minerales de oro y plata, los procesos de lixiviación utilizados para recuperar valores de oro y plata se empezaron a usar en la década que se inició en 1860. El proceso de Von Patera en el cual se disolvían los valores de oro y plata con hiposulfito de sodio y se precipitaba con sulfuro de calcio, este tratamiento no dio resultado porque la plata estaba en forma de sulfosales e incluida en sulfuros de plomo y cobre.

La disolución con hiposulfito se usó en varias minas de plata, entre ellas la de Lampazos, Sonora donde operó una planta con buenos resultados en 1890 y 1912. Este hiposulfito se utiliza también para beneficios de antiguos jaleros donde se usó con mercurio ya que éste último metal también puede recuperarse.

Se han hecho pruebas de disolver antiguos jaleros de cianuración con hiposulfito de amonio, pero no se ha pasado de plantas piloto. Se presentan algunos problemas de precipitación.

El proceso de cianuración inventado en la última década del siglo XIX, pronto adquirió mucha importancia en el beneficio de minerales auroargentíferos.

En México se instalaron gran número de plantas de cianuración en Pachuca, Guanajuato, Chihuahua, Sonora y otros lugares tradicionalmente mineros. En Sonora hubo un molino en La Colorada, en El Picacho De Bacoachí, en El Tigre y algunas otras pequeñas minas.

Para que el proceso de cianuración este correctamente aplicado, debe instalarse en minas auroargentíferos localizadas en la zona de oxidación, ya que en la zona de sulfuros ha demostrado la flotación ser más económica y eficiente. En minas de oro se ha visto que el sistema es efectivo, aún en el caso de encontrarse el oro en zona de sulfuros donde se le trata como mineral refractario.

La textura, el fracturamiento, el tamaño de los minerales solubles, la distribución de estos dentro de la roca mineralizante, son factores que determinan el tamaño a que debe ser quebrado o molido el mineral, con el fin de lograr un contacto óptimo entre la solución disolvente y los valores que se desean disolver.

El desarrollo en los últimos años del proceso de lixiviación en montones, hace que este se pueda dividir en dos grandes grupos, a saber:

- a) El proceso tradicional con molienda fina y
- b) El proceso de lixiviación en montones "heap leaching" aplicable principalmente a minerales de baja ley.

El proceso tradicional con molienda fina, ha seguido un desarrollo de acuerdo a los sistemas de separación de la solución preñada, que contiene los valores del mineral, que ya ha sido despojado de sus valores.

En un principio se usaba el sistema llamado de lamas y arenas en el cual el mineral más grueso (arenas), era lixiviado en tanques con doble fondo por el paso de las soluciones de cianuro entre las arenas que eran depositadas en dichos tanques. Las lamas o mineral fino eran agitadas en tanques especiales y después eran separadas las lamas estériles de las soluciones preñadas; esta separación se hacía en tanques asentadores o en filtros, que por medio de vacío separaban las soluciones, haciéndolas pasar a través de lonas que no permitían el paso de las lamas.

Posteriormente se desarrolló el proceso de contracorriente que se extendió casi a todos los molinos de cianuración convencional.

En años recientes y para minerales de oro con poca o ninguna plata, se ha desarrollado un proceso llamado Carbón en Pulpa que detallaremos más adelante.

En los últimos veinte años también se han desarrollado una variedad de procesos que se aplican a los minerales llamados refractarios, los cuales explicaremos posteriormente.

El proceso de lixiviación en montones, que se desarrolló en los años 70's del siglo XX y que ahora es ampliamente aplicado sobre todo para minerales auríferos, consiste principalmente en que el mineral no es molido sino solamente quebrado y depositado en patios especiales donde se riega con cianuro. Este proceso se aplica principalmente a minerales de baja ley, por tener un costo de inversión y de operación mucho menor que el tradicional, que permite operar económicamente con depósitos auríferos de baja ley, aunque las recuperaciones sean menores que en sistema tradicional.

La determinación del tamaño al que debe ser quebrado o molido un mineral, se hace por pruebas metalúrgicas y por consideraciones económicas, teniendo en cuenta lo siguiente:

1. El tamaño de los minerales por disolver y la liberación necesaria para exponer los valores al contacto del solvente.
2. Consideraciones económicas que incluyen el costo de diferentes grados de trituración y molienda, comparados contra el valor de los metales recuperados para cada caso.
3. Costos de capital e inversión necesaria para instalar las diferentes plantas de beneficio considerando el valor presente del dinero invertido en cada caso.

Independientemente de las instalaciones que se consideran más convenientes, es indispensable estudiar un mineral para que sea lixiviable, teniendo en cuenta las siguientes características:

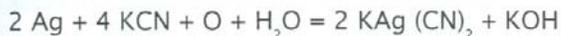
- a) Que el mineral por beneficiar no contenga sustancias que se disuelvan en el cianuro o que reaccionen con éste provocando un consumo excesivo de éste, haciendo la operación antieconómica.
- b) Que el mineral no contenga algunas sales que al reaccionar con el cianuro en alguna forma, interfiera con el proceso.
- c) Que los minerales por disolver, especialmente el oro, no tenga un tamaño tal que el tiempo necesario para disolverlo afecte el costo de la operación.
- d) Que el metal que se pretende disolver no esté en parte ligado químicamente, que lo haga resistente a la acción del solvente.
- e) Que el mineral no contenga sustancias que precipitan los valores ya disueltos en el cianuro.

7.7.1. Aspectos Químicos del Proceso:

La reacción de disolución de los valores de oro en las soluciones de cianuro, se puede representar por la siguiente fórmula:

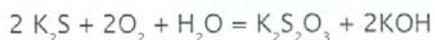
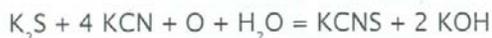


En relación a la plata, si ésta está como plata nativa es igual:

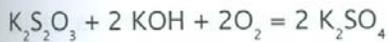


Pero si está como sulfuro:

$\text{Ag}_2\text{S} + 4 \text{ KCN} = 2 \text{ KAg (CN)}_2 + \text{K}_2\text{S}$, esta reacción es reversible pero el K_2S es fácilmente oxidable.



Y el tiosulfato tiende a transformarse en sulfato:



Si se trata de haloides de plata:

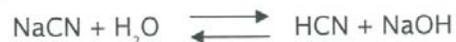


En todos los procesos de cianuración de oro y plata, el oxígeno es un factor indispensable con excepción cuando se trata de disolver halógenos de Ag. Debido a su menor costo y mayor concentración, se usa NaCN en vez de KCN.

Influencia de la concentración de las soluciones de cianuro: Experimentalmente se ha comprobado que la concentración de NaCN para minerales de oro, aumenta conforme la concentración lo hace, hasta llegar a un máximo con una concentración de 400 a 500 gramos de NaCN por tonelada de solución. Con diluciones menores a 100 gramos por tonelada, la dilución es muy baja. Las concentraciones más usadas varían de 150 a 350 gramos por tonelada. La determinación de la más conveniente concentración debe ser objeto de una cuidadosa experimentación.

Para el caso de minerales argentíferos, se ha comprobado que las concentraciones deben ser mayores, variando de 500 gramos a dos kilos por tonelada. Esta concentración debe fijarse por experimentación.

Descomposición de las soluciones de cianuro: Las soluciones de cianuro tienden a hidrolizarse como sigue:



Esta reacción es importantísima ya que el cianuro se convierte en gas cianógeno y se pierde. Depende básicamente de la existencia de álcali libre por lo que se agrega cal para mantener un pH alto. En general para evitar pérdidas de cianuro por hidrólisis, debe mantenerse un pH de 10.5 a 11.0.

Velocidad de disolución: Se ha comprobado que la rapidez de disolución de la plata es menor que la del oro, tratándose de metales nativos posiblemente sea el 50%. Los compuestos de plata son aún más lentos. La rapidez óptima de disolución del oro es de 3.25 mg/cm²/hora o sea una penetración de 1.68 micrones por hora. Así, una lámina de oro de 44 micrones de espesor, se disuelve en 13 horas y una partícula de 140 micrones (100 mallas) necesita 44 horas para disolverse.

Dada la velocidad de disolución, las partículas gruesas de oro deben separarse previamente a la Cianuración por métodos gravimétricos. Generalmente se usa un jig entre el molino y el ciclón clasificador. El concentrado obtenido recibe tratamiento separado.

Efecto del oxígeno en la disolución: Está comprobado que la presencia de oxígeno acelera la disolución. En pruebas de laboratorio, la rapidez de disolución cambia de 0.04 mg/cm²/hora sin oxígeno a 2.36 mg/cm²/hora teniendo un 99.5% de oxígeno requerido.

Efecto de la alcalinidad de las soluciones: El operar en un medio alcalino, no solo evita la hidrólisis del cianuro, sino también las pérdidas de éste por contacto con el CO₂ de la atmósfera, neutraliza los compuestos ácidos de las sales ferrosas y férricas, neutraliza así mismo la acción ácida de cualquier sal que se forme por descomposición de los minerales, ayuda al asentamiento de las partículas y mejora la extracción de los teluros, plata, rubí y otros componentes difíciles de disolver de los metales preciosos. El pH de las pulpas nunca debe ser menor de 10.5.

Efecto de la temperatura: La disolución del oro y la plata tiende a aumentar conforme aumenta la temperatura de la pulpa. Sin embargo, cuando se aumenta la temperatura, disminuye la cantidad de oxígeno disuelto en el agua y también la solubilidad de los metales preciosos, pero en pruebas que se han hecho, se ve que la máxima disolubilidad se alcanza a los 85° C y teniendo en cuenta el costo que significa, normalmente se opera a la temperatura ambiente y solo se calienta las

soluciones cuando se trata de despojar el oro del carbón activado o cuando se cianuran concentrados con muy altas leyes.

Condiciones para que un mineral sea cianurable: Para que un mineral sea cianurable, debe contener el oro y la plata en forma de minerales que pueden ser atacados por el cianuro. Generalmente solo se cianuran los minerales situados en la zona de oxidación donde la mayoría de los sulfuros ha sido convertidos en óxidos. Cuando los minerales auroargentíferos están ligados a sulfuros de plomo, cobre y zinc, la práctica general es flotarlos y posteriormente recuperar los metales preciosos en la afinación de los metales impuros obtenidos en la fundición donde se tratan los concentrados.

Cuando se trata de beneficiar minerales que contienen oro grueso, esto se hace por concentración gravimétrica y las colas, si aún tienen valores importantes de oro, se cianuran.

En el caso de minerales que están en la zona de transición, es decir que contienen sulfuros y óxidos, a menudo se tratan primero por flotación para recuperar los sulfuros y posteriormente se cianuran las colas de flotación.

Cuando se benefician minerales auríferos que están en la zona de sulfuros o el oro está encapsulado en piritas y arsenopiritas o que contienen carbón que obra como un precipitante, a todos estos minerales se les llama refractarios y son tratados previamente para destruir los cristales de pirita y arsenopirita y en alguna forma eliminan el carbón y después son beneficiados por Cianuración.

Además de las condiciones arriba escritas, el mineral no debe tener sustancias que consuman cianuro (llamadas cianicidas) en cantidades que hagan incosteable el proceso por el excesivo consumo de éste, o que se combinen con el cianuro formando sales que perjudiquen el proceso.

A continuación se presenta una lista y una explicación sobre estos minerales:

Minerales de zinc: Los minerales de zinc son algo solubles en soluciones de cianuro. Los más solubles con los carbonatos y óxidos y en menor proporción los sulfatos y silicatos. Aparte de consumir cianuro, los cianuros de zinc y sodio, en alguna forma afectan las reacciones de disolución del cianuro con los minerales de plata y oro. Sin embargo, parece ser que son reacciones reversibles que no tienen mucha influencia en el proceso. Cuando los contenidos de zinc son del orden de 1% o menores, no tienen impacto notable sobre el proceso. Cuando los contenidos son mayores, puede haber problemas de consumo de cianuro y de disolución, principalmente en los minerales de plata.

Minerales de cobre: El cobre contenido en los minerales es bastante soluble en soluciones de cianuro. Los minerales oxidados, incluyendo la calcocita son de los más solubles; los menos son la calcopirita y la crisocola. Los carbonatos generan complejos cianógenos y liberan cianuro que reacciona con el álcali (sosa) y cianato de sodio. La calcocita forma cuprocianatos quedando el cobre disuelto. La existencia de estos complejos de cianuro y cobre estorba bastante la disolución del oro. Al parecer, para tener buenas recuperaciones, hay que aumentar la concentración de las soluciones. La presencia de cobre siempre significa aumento en el consumo de cianuro. En algunas minas con mineral con altos contenidos de cobre, se usa agregar amonio disminuyendo sensiblemente el consumo de cianuro.

La pirrotita: Esta pirita o pirita magnética, es también perjudicial cuando se trata de cianurar un mineral porque reacciona con las sales de cianuro destruyéndolas de acuerdo a la siguiente reacción:

$\text{Fe}_5\text{S}_6 + \text{NaCN} = \text{NaCNS} + 5\text{FeS}$. Posteriormente se oxida el FeS, entonces

$\text{FeS} + 2\text{O}_2 = \text{FeSO}_4$ y el sulfato de hierro reacciona con el cianuro:

$\text{FeSO}_4 + 6 \text{NCN} = \text{Na}_4\text{Fe}(\text{CN}) + \text{Na}_2\text{SO}_4$.

Por consiguiente la pirrotita no solo consume cianuro, además consume oxígeno en solución retardando la Cianuración. La solución, cuando hay pirrotita, es una aeración en medio alcalino, para que la pirrotita reaccione con los alcalíes y forme hidróxido de hierro. Después se agrega el cianuro.

La presencia de minerales de antimonio y arsénico puede afectar la cianuración de minerales cuando existen los sulfuros de estos metales, oro pimientado y estibnita. Esto es importante cuando el pH de la operación sube a 12 o más. Para corregir el efecto negativo de estas reacciones hay que vigilar el pH y agregar nitrato de plomo. La cantidad de nitrato para el caso de la estibnita es de 0.30 lbs. /ton. En el caso de oro pimientado es mayor.

PROCESOS DE TRATAMIENTO DE MENAS DE ORO

TIPO DE MENA AURIFERA	PROCESOS
<p>1. ORO LIBRE</p> <p>-Aluviones, Eluviones, Fluviones. -Otras menas.</p>	<p>*Concentración gravimétrica-Aglomeración-cianuración residuos (oro fino).</p> <p>*idem.</p> <p>* Concentración gravimétrica- flotación-cianuración residuos (oro fino).</p>
<p>2. ORO COMBINADO</p> <p>-Teluros</p>	<p>*flotación-oxidación (tostación) concentrados-cianuración, Cianuración residuos.</p> <p>*cianuración directa</p> <p>Tratamiento residuos con SO₂</p> <p>Flotación- tostación concentrados-cianuración.</p> <p>*flotación-cianuración concentrados-tostación residuos cianuración.</p>
<p>3. ORO ASOCIADO</p> <p>-Pirita y marcasita</p>	<p>*concentración gravimétrica (del oro y/o sulfuros si están liberados).</p> <p>*flotación-fusión de concentrados (oro en sulfuros).</p> <p>*flotación-cianuración residuos (oro en ganga).</p> <p>*flotación-cianuración concentrados con o sin tostación, cianuración residuos (oro en sulfuros y ganga).</p> <p>*flotación-concentración auríferos (para venta)-cianuración residuos.</p> <p>*cianuración -flotación residuos-recianuración</p>

<p>-Pirrotina</p> <p>-Arsenopirita</p>	<p>concentrado con o sin tostación.</p> <p>*cianuración (pre aireación y baja alcalinidad).</p> <p>*cianuración-flotación residuos- recianuración concentrados con o sin tostación.</p> <p>*flotación-tostación concentrados-cianuración. Cianuración residuos flotación.</p> <p>*flotación-concentración auríferos (para venta) Cianuración. Cianuración residuos flotación.</p> <p>*tostación-cianuración.</p> <p>*cianuración directa.</p>
<p>-Minerales Complejos de Cobre (Principalmente con calcopirita).</p>	<p>*flotación-fusión concentrados de cobre (Oro en lodos electrolíticos).</p> <p>*flotación diferencial Cu-Mo-Cianuración concentrado Mo.</p> <p>*flotación-fusión de concentrados cobre (oro en sulfuros).</p> <p>*cianuración de residuos flotación (oro en ganga).</p>
<p>-Minerales Complejos Plomo-Zinc (igual a minerales complejos de cobre).</p>	<p>*gravimetría-amalgación (si el oro se libera por conminución).</p>
<p>-Óxidos de Hierro</p>	<p>*conminución-cianuración directa.</p>
<p>-Minerales de Uranio.</p>	<p>*flotación-lixiviación ácida, concentrado (extracción de uranio)-tostación del</p>

<p>-Minerales Carbonaceos y Grafíticos</p> <p>-Silicatos, Carbonatos (minerales sedimentarios con oro fino y pocos sulfuros).</p>	<p>concentrado-cianuración.</p> <p>*calcinación-cianuración.</p> <p>*oxidación química-cianuración.</p> <p>*pasivación superficie material carbonaceo (reactivos específicos)-cianuración.</p> <p>*pasivación superficie material carbonaceo (reactivos específicos)-cianuración.</p> <p>*flotación-oxidación concentrado-cianuración (si el oro está solo en material carbonaceo).</p> <p>*flotación carbón-cianuración residuo (si el oro no está en material carbonaceo).</p> <p>*conminución-cianuración.</p>
---	---

Tabla 3 Tratamiento de Menas de Oro.

7.7.2 Equipos que se usan en la Cianuración
PROCESOS DE TRATAMIENTO DE MENAS DE PLATA.

TIPO ASOCIACION PLATA	PROCESO DE TRATAMIENTO
I) y V) Sulfuros Complejos	*flotación-fusión de concentrados metálicos. *ídem-cianuración de residuos. *flotación-tostación de concentrados-cianuración.
II) Plata Nativa y combinaciones de Haluros.	*concentración gravimétrica-amalgación-cianuración (Ag). *cianuración (cloruros y sulfuros).
III) Minerales Semi- Óxidos.	*flotación-cianuración de residuos.
IV) Asociaciones con Óxidos.	*cianuración (óxidos de Fe). *reducción-cianuración (óxidos de Mn). Segregación (óxidos de Mn).

Tabla 4 Tratamiento de menas de plata.

7.7.2 *Equipos que se usan en la Cianuración*

En una planta convencional de cianuración, se usan los sistemas tradicionales de trituración y molienda para llevar la molienda a un tamaño que indiquen las pruebas metalúrgicas. Esta molienda generalmente es de 80% a menos 150 mallas, a 80% a menos 200 mallas, según las características del mineral. Debe advertirse que la disolución de los valores empieza en el circuito de la molienda agregándose solución de cianuro en vez de agua. Una buena parte de los valores queda disuelta en el circuito de molienda y posteriormente la pulpa ya molido que entregan los ciclones pasa a unos tanques agitadores donde se le da a la pulpa un tratamiento que varía de 24 a 72 horas. *Figura 1.*

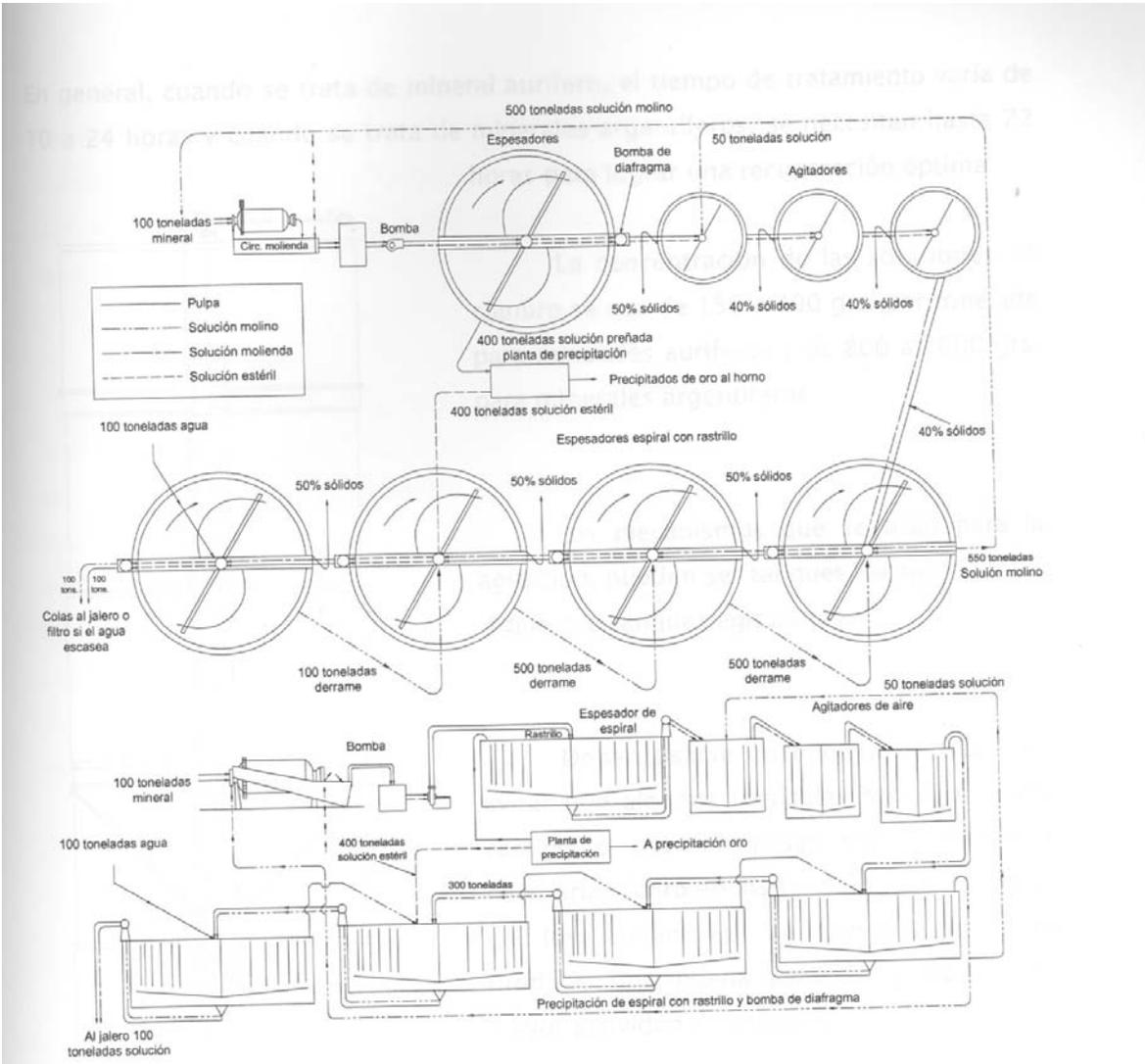
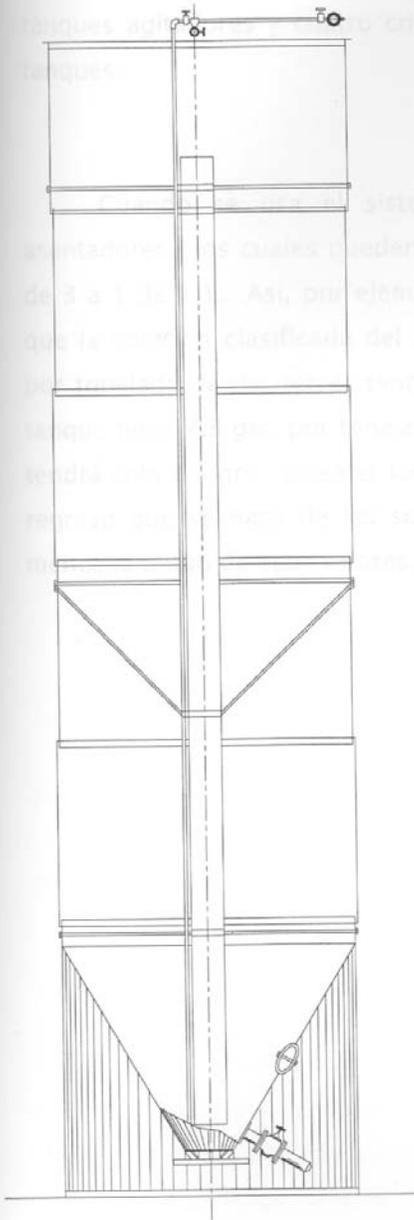


Figura 1.-Planta de Cianuración.

En general, cuando se trata de mineral aurífero, el tiempo de tratamiento varía de 10 a 24 horas y cuando se trata de minerales argentíferos, se necesitan hasta 72 horas para lograr una recuperación óptima.



La concentración de las soluciones de cianuro se usa de 150 a 400 grs. por tonelada para minerales auríferos y de 800 a 2000 grs. para minerales argentíferos.

Los mecanismos que se usan para la agitación, pueden ser tanques Pachuca, figura 2, o tanques agitadores.

Deben usarse un mínimo de tres para evitar que algunas partículas hagan un corto camino o sea sin pasar por la agitación necesaria. Tanto en los tanques Pachuca como en los agitadores, se inyecta aire para producir una buena aeración y lograr una mayor actividad del cianuro.

Los tanques Pachuca no tienen partes en movimiento y la agitación la produce el aire que se inyecta y trabaja como "air lift". Los tanques agitadores tienen un mecanismo que agita la pulpa y además dos "air lifts" que la inyectan con aire. (Figuras 3a y 3b).

Figura 2. Tanques agitadores

Generalmente, las pulpas que se manejan en los mecanismos de agitación, tienen 50% de mineral molido y 50% de solución de cianuro. Cuando se trata de plantas con el proceso de "carbón en pulpa" C.I.P., generalmente se usan cuatro tanques agitadores y cuatro cribas que recogen el carbón que descargan dichos tanques.

Cuando se usa el sistema de contracorriente se utilizan los tanques asentadores, los cuales pueden reducir la dilución de las pulpas de 4 a 1 a 1:1; o de 3 a 1 de 1:1. Así, por ejemplo, si se usa una dilución de 3 a 1 y suponemos que la solución clasificada del primer asentador tiene una ley de 200 grs. de Ag por tonelada, la del tercer tanque tiene solo 22 grs. por tonelada, la del cuarto tanque tiene 7.3 grs. por tonelada y la del último tanque que va a la presa de jales, tendrá solo 2.8 grs., o sea el 1.4% de los valores disueltos. De éstos, todavía en el regreso que se hace de las soluciones de la presa de jales, se recupera por lo menos la mitad de esos valores, quedando el resto en la presa.

7.7.3. Agitador de Lamas

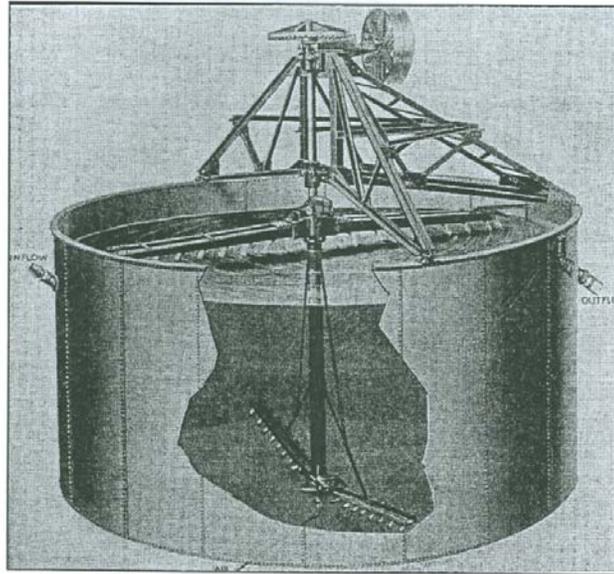


figura 3a.- Agitador de Lamas.

Para una mejor comprensión de este sistema de beneficio, se acompaña un "flow-sheet" de una planta de Cianuración para 100 toneladas diarias con contracorriente. Para capacidades mayores solo se usan equipos mayores. (Figura 5a y 5b).

Para las plantas de precipitación se han usado las cajas de zinc que trabajan con viruta de zinc. (Figura 2). En estas cajas el zinc está depositado sobre una tarima de madera y cada determinado tiempo se limpia la viruta con un chorro de solución y el precipitado se recoge en el fondo del tanque que tiene pendiente hacia un lado donde se colecta el precipitado; se seca y funde para obtener el Doré. Estas cajas solamente las usan algunos gambusinos que benefician terrenos y jaleros viejos o minas muy pequeñas. (Figura 6).

La precipitación por el sistema Merrill Crowe que ya describimos, consta del filtro de lamas, la bomba de vacío, el alimentador de zinc, la bomba que inyecta la solución al filtro y el filtro. Este se limpia cada determinado tiempo y los precipitados se secan y se funden.

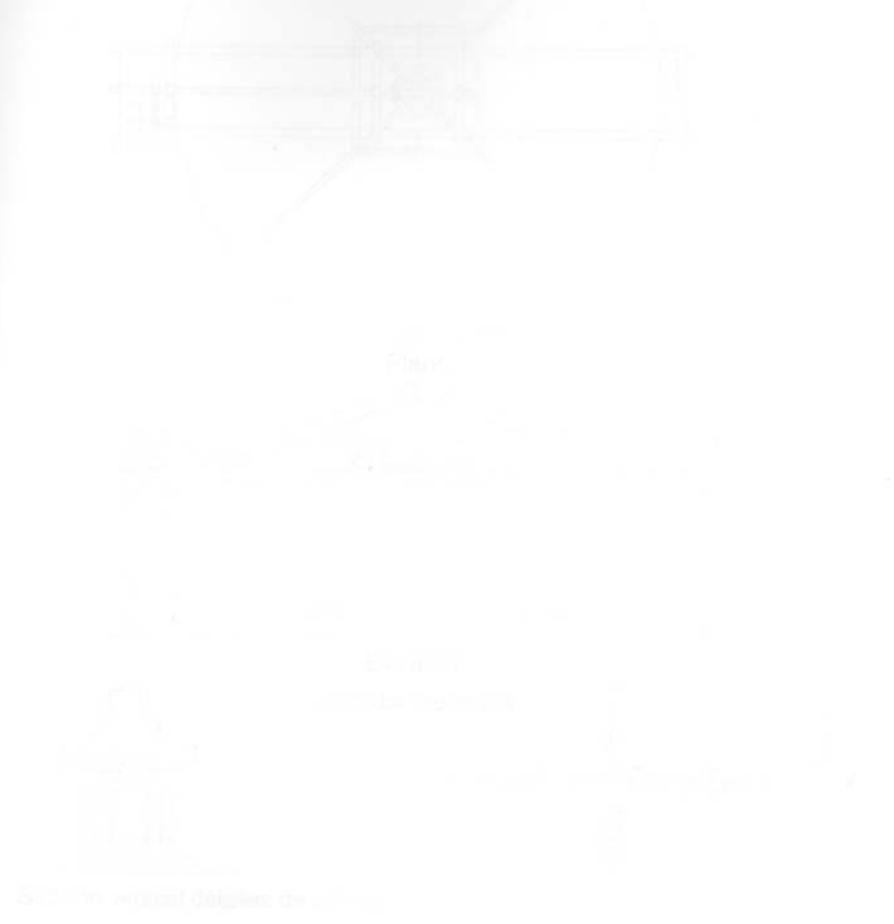


Figura N.º 10. Sistema Merrill Crowe.

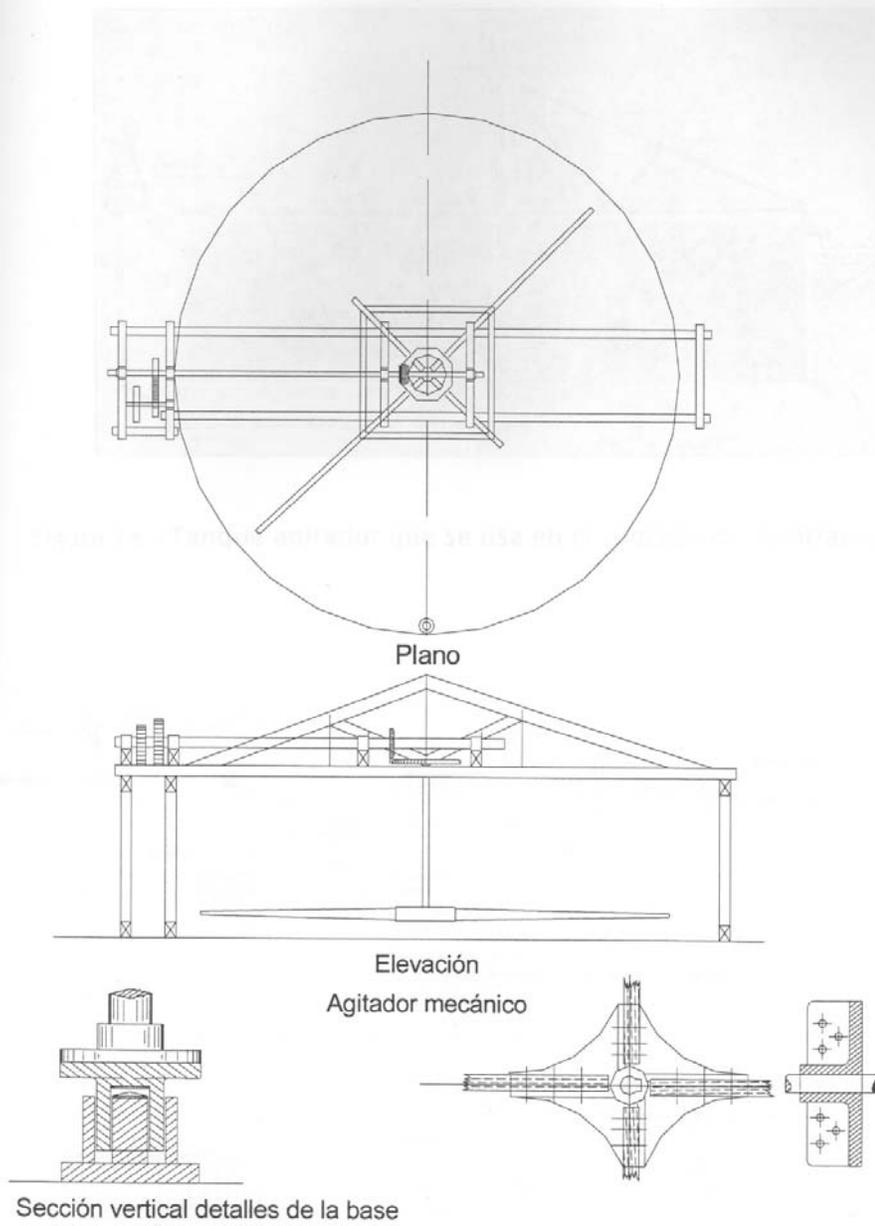


Figura 3b.- Agitador Mecánico.

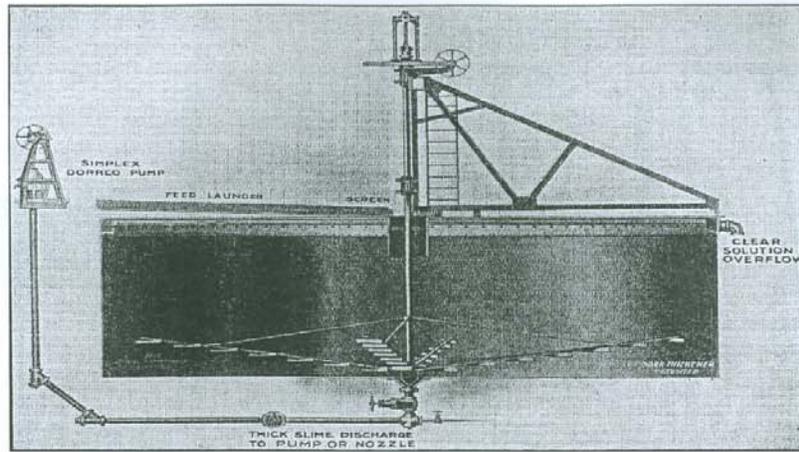


Figura 5 a.- Tanque agitador que se usa en el proceso de "contracorriente"

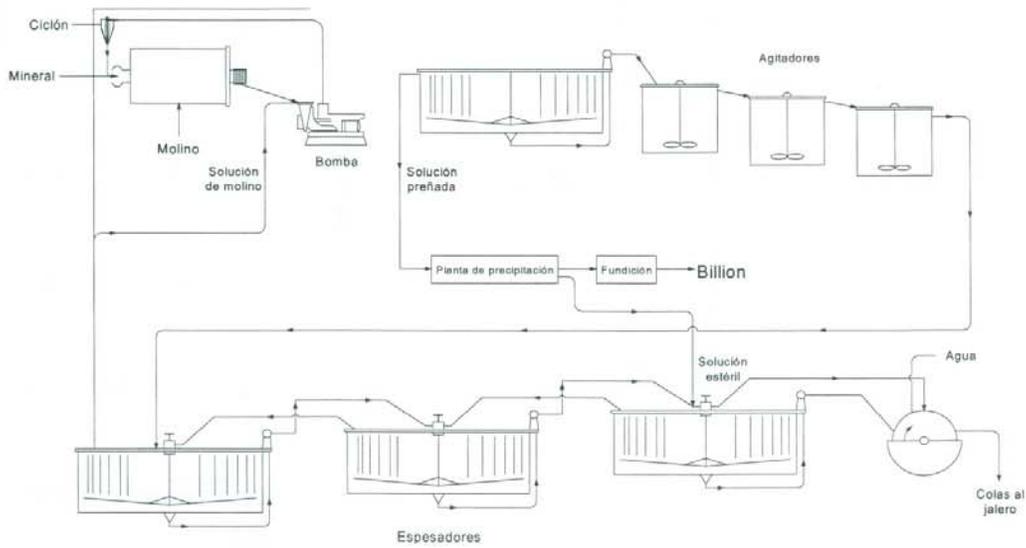


Figura 5b.- Diagrama de flujo de una planta de cianuración.

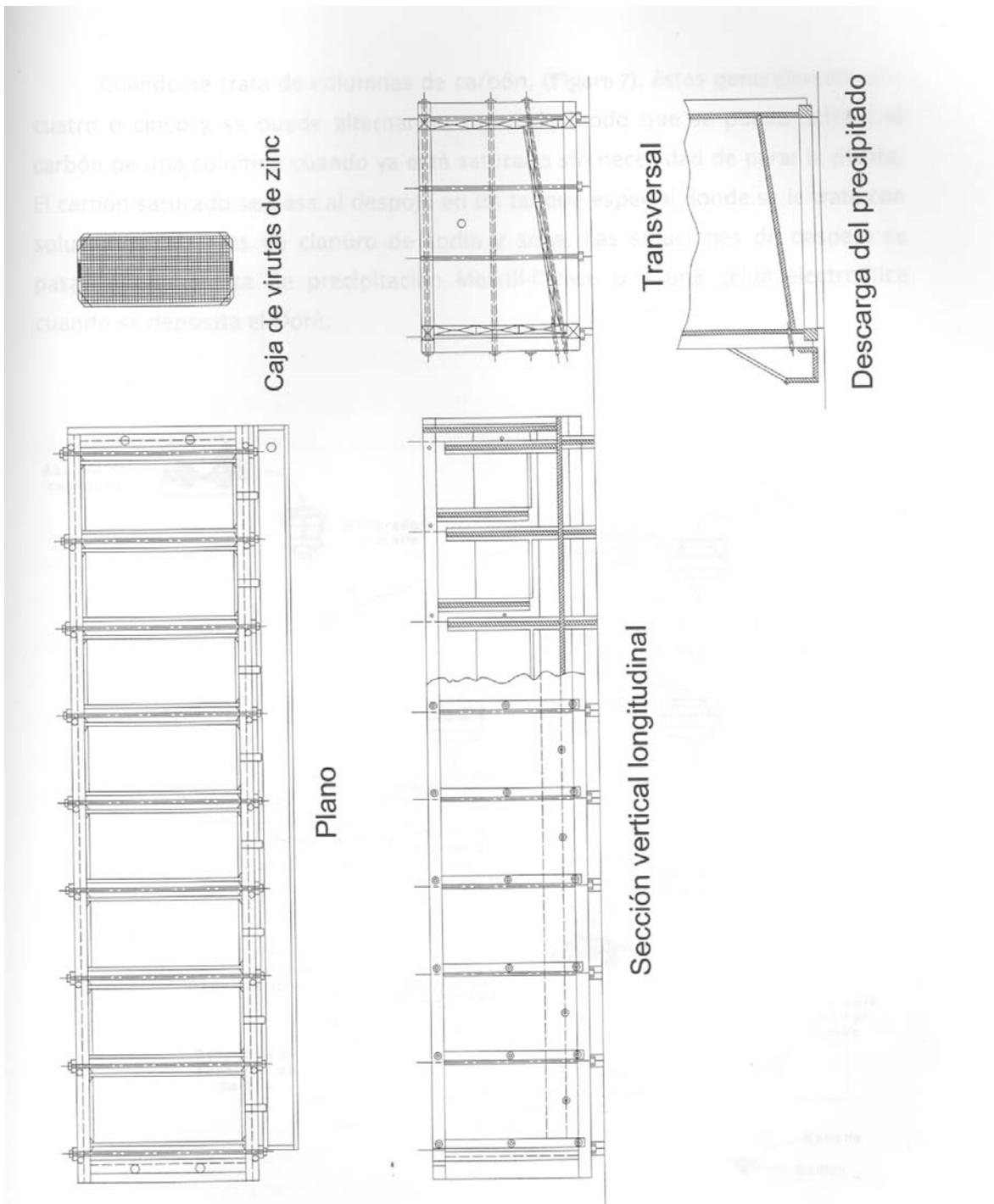


Figura 6.- Caja de Virutas de Zinc.

Cuando se trata de columnas de carbón, (Figura 7), éstas generalmente son cuatro o cinco y se puede alternar su turno de modo que se pueda extraer el carbón de una columna cuando ya está saturado sin necesidad de parar la planta. El carbón saturado se pasa al despojo en un tanque especial donde se le trata con soluciones calientes de cianuro de sodio y sosa. Las soluciones de despojo se pasan a una planta de precipitación Merrill-Crowe o a una celda electrolítica cuando se deposita el Doré.

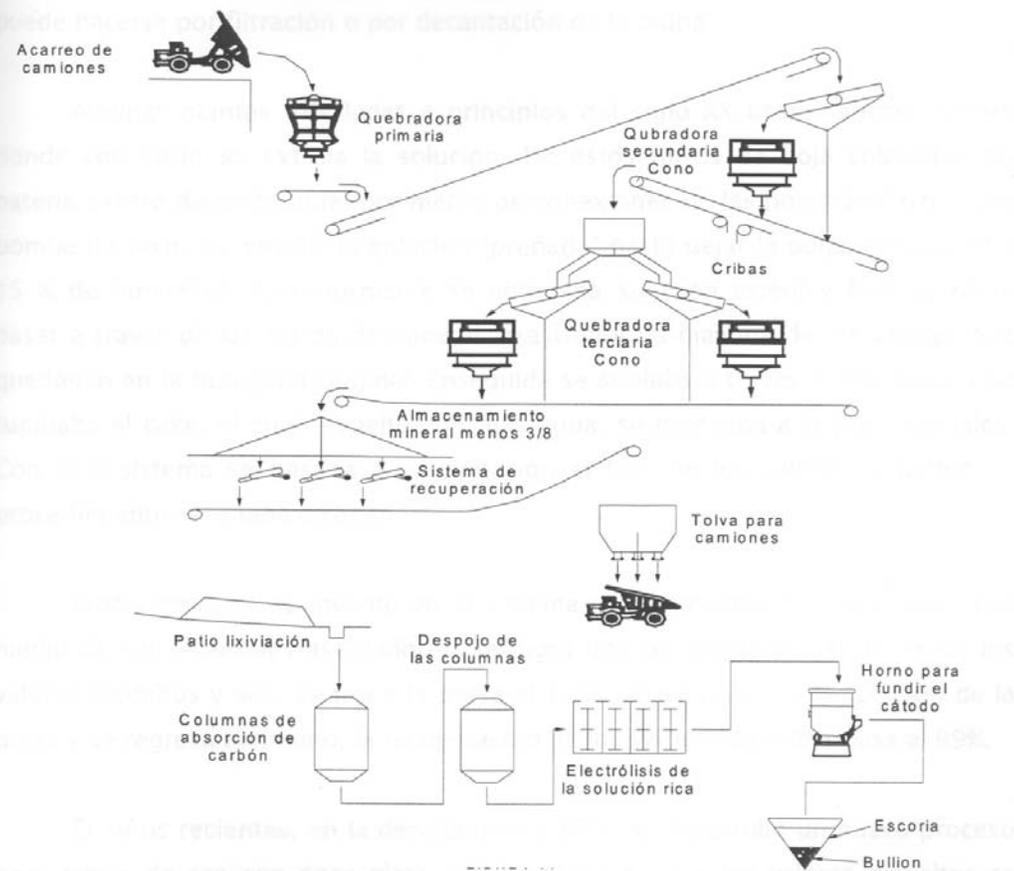


Figura 7.- Columnas de carbón.