

IMPACTO AMBIENTAL DE LA MINERÍA DEL ORO

Dr. Ing. Germán Cáceres
Arenas

Departamento de Ingeniería
Metalúrgica
Universidad de Atacama – Chile

RESUMEN

La minería del oro genera una gran variedad de residuos, los cuales deben ser manejados según la legislación ambiental vigente y en la forma más económica posible.

La creciente conciencia ambiental de nuestra sociedad se ve reflejada en regulaciones ambientales cada vez más fuertes, ha hecho necesario poner énfasis en el control y tratamiento de efluentes de la minería.

En algunos casos existen incentivos metalúrgicos para el tratamiento de efluentes, tales como beneficios económicos que se obtienen al reciclar reactivos químicos y/o la recuperación de metales valiosos, o la necesidad de remover componentes que tienen un efecto adverso en los procesos principales cuando se recircula una fracción del efluente.

Se puede decir entonces que se justifica o requiere tratamiento de efluentes tanto para la recuperación como para reciclaje, pudiendo representar una opción económica dentro de un proyecto de minería o también ser parte de una política ambiental para cumplir con las normativas ambientales vigentes. El tratamiento también puede manifestarse a través de la desintoxicación propiamente tal, que se hace necesaria cuando se está fuera de rango permitido por la ley o en casos que sea necesario para reciclar flujos al proceso.

Se presenta un esquema general de tratamiento de minerales de oro, identificando las corrientes de residuos, poniendo énfasis en las corrientes de residuos y en los aspectos ambientales del proceso de cianuración. Se analiza en primer término la química del cianuro y sus compuestos, su toxicidad, los mecanismos de degradación y sus aplicaciones en pozos de soluciones, tranques de relaves, pilas de lixiviación, suelos y aguas subterráneas.

1. PROCESOS PARA EL TRATAMIENTO DE MINERALES DE ORO

Para el tratamiento de minerales de oro se utilizan los siguientes procesos metalúrgicos: cianuración, flotación, concentración gravimétrica y amalgamación. El producto intermedio obtenido en cada uno de estos procesos se refina a metal doré mediante un proceso de fusión (figura 1).

1.2 IDENTIFICACIÓN DE ASPECTOS AMBIENTALES PRINCIPALES

Es posible identificar, para cada proceso metalúrgico, los siguientes aspectos ambientales relevantes:

PROCESO

Cianuración
Flotación
Concentración gravimétrica
Amalgamación
Fusión

ASPECTOS AMBIENTALES RELACIONADOS

Relaves, ripios, soluciones, aguas de proceso.
Relaves, aguas de proceso
Relaves, aguas de proceso
Relaves, mercurio, aguas de proceso
Gases de fundición, As, Hg, Cd

Considerando que aproximadamente el 75% de la producción mundial de oro se obtiene mediante el proceso de cianuración, y atendiendo además a la alta toxicidad del cianuro, el análisis del impacto ambiental de la minería del oro para este trabajo está centrada en los residuos conteniendo compuestos cianurados.

2. TIPOS DE RESIDUOS

Los residuos de la minería del oro pueden en general ser clasificados por su estado físico como gases, líquidos, sólidos y mezclas de éstos, tal como se grafica en la figura 2.

Algunos de estos productos pueden ser dispuestos sin necesidad de tratamiento químico, como por ejemplo el polvo generado en plantas de chancado o del movimiento de tierras. Sin embargo otros residuos requieren tratamientos terciarios, dependiendo de la mineralogía del mineral tratado, los métodos de extracción utilizados y el método de disposición del efluente a emplear.

2.1 RESIDUOS GASEOSOS

Los contaminantes gaseosos más importantes de la minería del oro (distintos del material particulado), están relacionados con los procesos pirometalúrgicos de tostación, calcinación, fusión y reactivación de carbón. Estos contaminantes incluyen SO_2 , As, Sb, Pb, Hg, óxidos de nitrógeno, hidrocarburos y otros metales pesados, que pueden afectar la calidad del aire del sitio mismo del proyecto y de las zonas circundantes, así como también pueden tener un efecto secundario sobre la calidad del agua.

Para este tipo de contaminantes puede aplicarse la tecnología estándar de limpieza de gases con bastante éxito en el cumplimiento de las normas relativas a este tipo de polución.

2.2 RESIDUOS SÓLIDOS

En esta categoría están considerados los productos sólidos de operaciones de extracción, ya sean secos o con bajo contenido de humedad, inferior a 10% de agua. Incluyen residuos de explotación de minas, residuos de procesos de concentración, rípios de lixiviación en pilas y antiguos relaves de operaciones de molienda cerradas.

El mayor problema químico que puede ser provocado por este tipo de residuos es la contaminación de aguas superficiales y subterráneas debido al contacto con la lluvia o de percolaciones desde el residuo sólido. Esto es:

- Drenaje ácido de minas, como resultado de la descomposición de minerales sulfurados.
- La liberación de cianuro residual y especies metálicas solubles a partir de lixiviación en pilas y otros procesos similares; ó
- Disolución de mineral, provocando la liberación de especies metálicas (cationes, aniones y aniones complejos), especialmente desde desechos de procesos que utilizan pretratamientos oxidantes.

Las soluciones producidas mediante estos fenómenos pueden o no presentar una amenaza ambiental, dependiendo del tipo del depósito y de la naturaleza y concentración de las especies en tales desechos. Aún así, debe considerarse el tiempo que demoran en efectuarse estos procesos de contaminación, ya que algunos pueden tardar sólo horas o días para llevarse a cabo, mientras que otros pueden tardar largos periodos para tener un efecto significativo.

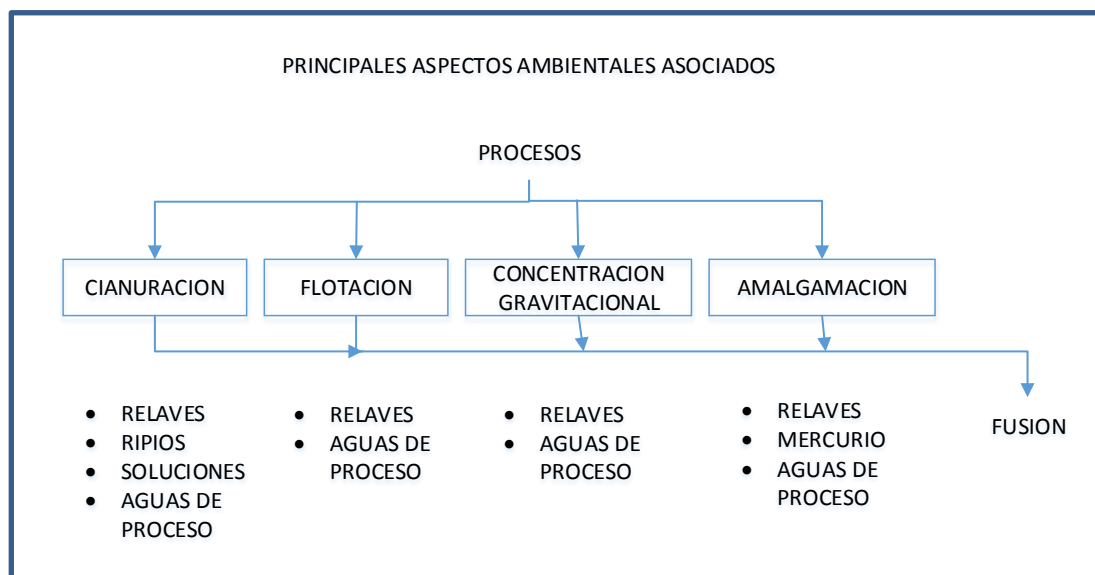


Figura 1. Principales aspectos ambientales asociados a la minería del oro.

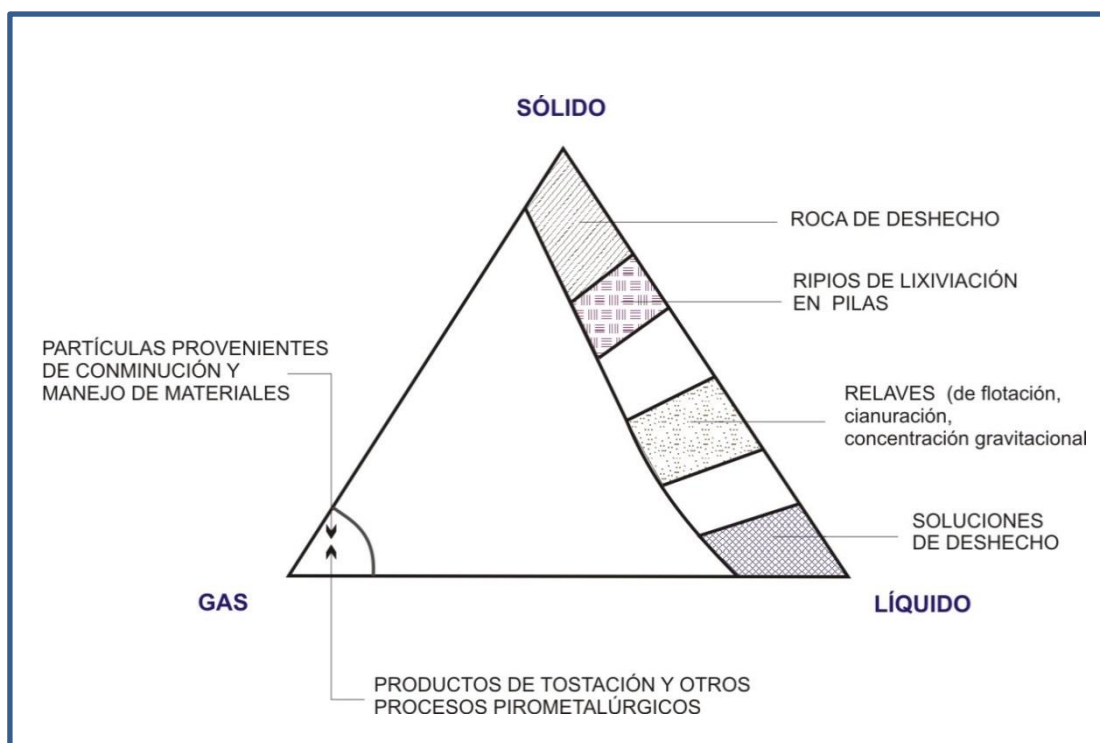


Figura 2. Residuos asociados a la minería del oro.

2.3 RESIDUOS LÍQUIDOS

Los efluentes líquidos son soluciones o pulpas generadas por los diversos procesos hidrometalúrgicos de extracción de oro (esto es, cianuración, flotación), así como los productos de la interacción entre líquidos y residuos sólidos o gaseosos asociados con la extracción de oro.

El efecto más inmediato es la amenaza ambiental que representan los constituyentes tóxicos de la fase acuosa, tales como especies cianuradas, iones metálicos tóxicos, así como soluciones fuertemente ácidas y alcalinas.

Los métodos de disposición de estos líquidos se dividen en dos categorías: efluentes contenidos y efluentes que requieren la descarga parcial o total del flujo.

Efluentes contenidos o combinados

Estos son los materiales que se colocan en sitios específicos, con muy poca o nula liberación hacia el ambiente. El factor clave de esta categoría es la existencia de barreras permeables o semipermeables entre el residuo y el suelo, para minimizar o prevenir cualquier degradación de las aguas superficiales y subterráneas.

Si es necesario, los efluentes contenidos mediante estos sistemas, pueden ser tratados para la recuperación de reactivos o metales valiosos, previo a su disposición final, pueden ser tratados in situ o bien puede retornarse una fracción del efluente para un tratamiento posterior.

Efluentes descargados

La necesidad de descargar efluentes al ambiente depende del balance total de agua del proceso, el cual está determinado por factores que incluyen el método de procesamiento, el clima (debido a la evaporación y precipitaciones), la cantidad de agua generada durante los procesos de disposición de efluentes. Las operaciones que incluyen balances de agua positivos, donde la cantidad de agua generada es mayor que la consumida, necesitan descargar efluentes al medio ambiente. En ocasiones de emergencia, las operaciones con déficit de agua también descargan efluentes, debido por ejemplo a lluvias o fallas en el proceso.

3. COMPUESTOS DE CIANURO EN LA MINERÍA DEL ORO

3.1 CLASIFICACIÓN DE COMPUESTOS

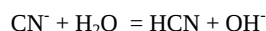
Los compuestos de cianuro presentes en la minería del oro y en las soluciones y efluentes de cianuración, comprenden el cianuro libre, sales de cianuro de metales alcalinos y alcalino térreos y complejos de cianuros metálicos formados con oro, mercurio, cadmio, zinc, plata, cobre, níquel, hierro y cobalto. Estos compuestos se pueden clasificar en cinco categorías generales, como se muestra en la tabla 1.

TABLA 1. Clasificación de los compuestos de cianuro en la minería del oro.

CLASIFICACIÓN	COMPUESTO
1. Cianuro libre	CN ⁻ , HCN
2. Compuestos simples - Fácilmente solubles - Sales neutras insolubles	NaCN, KCN, Ca(CN) ₂ , Hg(CN) ₂ Zn(CN) ₂ , Cd(CN) ₂ , CuCN, Ni(CN) ₂ , AgCN
3. Complejos débiles	Zn(CN) ₄ ⁻² , Cd(CN) ₃ ⁻ , Cd(CN) ₄ ⁻³
4. Complejos moderadamente fuertes	Fe(CN) ₆ ⁻⁴ , Co(CN) ₆ ⁻⁴ , Au(CN) ₂ ⁻ , Fe(CN) ₆ ⁻³

3.2 CIANURO LIBRE

Con el término “cianuro libre”, se hace referencia tanto al ión CN⁻ como al HCN. El HCN en solución acuosa forma un ácido débil. La relación entre cianuro de hidrógeno y el ión cianuro se representa por la reacción de hidrólisis:



La coexistencia de estas especies está íntimamente relacionada con el pH de la solución, como muestra la figura 3. Debido a que el HCN presenta un bajo punto de ebullición y una presión de vapor baja, puede perderse por volatilización, especialmente donde existen interfaces aire/agua. Para evitar esto, se debe trabajar en rangos de pH alcalinos (recomendable sobre 11).

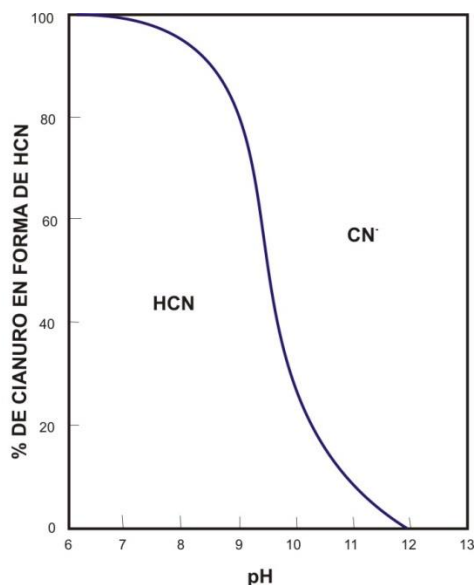
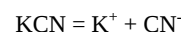
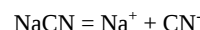


Figura 3. Relación HCN – CN⁻ y pH.

3.3 COMPUESTOS CIANURADOS SIMPLES

Los compuestos cianurados simples se disocian en solución acuosa para formar iones CN⁻, como ocurre con los siguientes ejemplos:



Donde la concentración real del cianuro que se puede alcanzar disolviendo cualquier compuesto cianurado simple, está dado por la constante de disociación, que depende entre otros factores, el pH y la temperatura.

3.4 COMPLEJOS CIANURADOS

En esta categoría se encuentran principalmente los complejos formados por cadmio, cobre, níquel, plata y zinc. Su formación se efectúa en etapas sucesivas con diferentes y crecientes concentraciones de cianuro.

La disociación en solución acuosa de estos complejos cianurados está relacionada con el metal al cual se encuentra asociado el cianuro. Así el zinc y el cadmio son relativamente inestables, disociándose en el catión metálico y el CN⁻ siendo estos los complejos más débiles. Por otra parte, complejos como los de hierro, oro y cobalto son muy estables, aunque con fuertes radiaciones UV (fotólisis) o en medios muy ácidos, se disociando liberando CN⁻.

Otros parámetros que determinan la estabilidad de estos complejos en solución acuosa son:

- Intensidad de luz
- Temperatura del agua
- pH
- Sólidos totales disueltos
- Concentración del complejo

Las constantes de disociación de estos complejos entregan información para calcular la concentración de cianuro libre en la solución. Así, cuanto menor es la concentración de cianuro libre en solución, más estable es el complejo.

Un aspecto muy utilizado en el tratamiento de efluentes cianurados es la capacidad de formar precipitados de doble metal insolubles, como el ferrocianato férrico Fe₄[Fe(CN)₆]₃.

En general, la relación del cianuro con su metal en el complejo formado depende de factores tales como el pH, el potencial redox y la concentración absoluta de cianuro en la solución reactante.

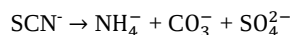
3.5 CIANUROS DE HIERRO (FERROCIANURO Y FERRICIANURO)

Desde un punto de vista ambiental, los cianuros de hierro (hexacianoferratos), requieren especial atención debido a su extrema estabilidad en ausencia de luz y a su tendencia a disociarse en presencia de luz. Forman sales estables con otros metales.

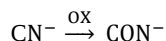
3.6 COMPUESTOS RELACIONADOS CON EL CIANURO

Se incluye en esta clasificación el tiocianato, el cianato y el amoníaco. Su importancia radica en la toxicidad que representan y los parámetros que deben manejarse para reducir su impacto.

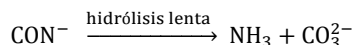
El tiocianato es biológicamente degradable, llegando en algunas circunstancias a ser más oxidable que el cianuro, su relevancia en el sentido ambiental está relacionada con los productos de su degradación, como por ejemplo el ión amonio.



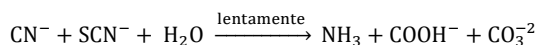
El mecanismo de disolución del oro involucre la formación de peróxido de hidrógeno como parte de la etapa inicial, es posible que la concentración de cianato presente en las soluciones de lixiviación aumente como resultado del ataque del peróxido sobre el cianuro.



En medio ácido:



A temperatura ambiente:



4. TOXICIDAD DEL CIANURO Y SUS COMPUESTOS

La toxicidad del cianuro en residuos mineros de oro depende de su forma y concentración. La química del cianuro es compleja, existen muchas formas de cianuro en las soluciones y residuos sólidos de la minería del oro.

4.1 PRINCIPALES COMPUESTOS TÓXICOS DEL CIANURO

Hay cuatro categorías principales de compuestos de cianuro que son importantes, desde el punto de vista de la toxicidad:

- Cianuro libre.
- Cianuros de hierro.
- Cianuros débiles disociables en ácido (WAD, weak acid dissociable).
- Compuestos relacionados con el cianuro.

4.2 MECANISMOS Y NIVELES DE TOXICIDAD DEL CIANURO

El cianuro libre se incorpora en un organismo por inhalación, ingestión o absorción a través de la piel. Su toxicidad puede ser aguda o crónica. La toxicidad aguda está asociada con los efectos letales inmediatos observados en organismos expuestos a concentraciones elevadas de un compuesto particular. El periodo de toxicidad aguda va desde unos pocos minutos a varios días. La toxicidad aguda se mide por el LC_{50} (lethal concentration), que corresponde a la concentración letal de un tóxico que causa la muerte del cincuenta por ciento de la población de organismos durante un periodo de tiempo determinado. El periodo de tiempo usual es de 96 horas a cuatro días.

Las exposiciones prolongadas a concentraciones subletales conducen a la toxicidad crónica, que se manifiesta por incapacidad motriz y anormalidades fisiológicas permanentes.

Aunque el cianuro no es un tóxico que se acumule en el organismo, los metales ligados al cianuro pueden bioconcentrarse o bioacumularse, provocando un daño fisiológico permanente o haciendo que un organismo sea inapropiado para el consumo por seres humanos o animales.

4.2 FACTORES QUE AFECTAN LA TOXICIDAD DEL CIANURO

Los factores que afectan la toxicidad del cianuro son:

- Concentración total de cianuro.
- Falta de oxígeno.
- Aumento de temperatura.
- pH
- Tipo de metal que forma el complejo.
- Presencia de tiocianato, cianato o amoníaco.
- Sólidos en suspensión.

5. RECUPERACIÓN DE CIANURO Y METALES

Existen varios métodos de recuperación del cianuro y metales, con un beneficio económico para el proyecto, además del cuidado del medio ambiente. Se pueden mencionar:

5.1 RECIRCULACIÓN DE SOLUCIONES

Este es el método más simple e involucra la recirculación directa del flujo de soluciones desde las colas hacia el proceso. Se utiliza en la mayor parte de los circuitos de cianuración. Por ejemplo, la solución pobre del circuito de cianuración en pilas se retorna directamente como refino para el riego de pilas; en circuitos de lixiviación por agitación o en flotación, se recircula solución desde espesadores para dilución.

Con este simple método se puede recuperar gran parte del cianuro, a pesar de su degradación; también aumenta la

recuperación (entre 0.1 y 0.5%) de metales valiosos que continúan lixiviándose después del circuito de lixiviación propiamente tal. También se utilizan soluciones de bajo grado para desplazar cianuro, alcalí y metales desde efluentes.

5.2 ACIDIFICACIÓN, VOLATILIZACIÓN Y RENEUTRALIZACIÓN (AVR)

Aunque este proceso originalmente se utilizaba para reducir el consumo de cianuro, es ahora un método eficiente para el control de efluentes conteniendo cianuro. Con este simple método, donde la solución cianurada se acidifica, removiéndose el HCN formado mediante volatilización con flujos de aire para luego recuperarlo en una solución alcalina, se tiene un bajo consumo de reactivos (0.6 kg H_2SO_4 /t solución y 0.45 kg NaOH/t), con una eficiencia de recuperación que varía entre un 50 y 80%, siendo aplicable en términos económicos para soluciones que contienen más de 150 ppm de cianuro total.

5.3 INTERCAMBIO IONICO

Para la recuperación de especies cianuradas, se usan resinas aniónicas de base fuerte para remover los complejos metálicos cianurados solubles como los de Fe, Zn, Cu, Ni, Co, Au y Ag. La solución de la resina produce HCN, que debe ser contenida en un sistema cerrado y puesto en contacto con soda caustica para llevarla a un pH alcalino y reabsorber cianuro.

La eficiencia de recuperación y elución de la resina depende de la química del efluente a tratar, lo que puede, en algunos casos, hacer prohibitivo el proceso en términos económicos.

5.4 TRATAMIENTO ELECTROLÍTICO

Puede obtenerse cianuro libre de soluciones que contienen complejos cianurados de metales como Au, Cu, Ag y Zn, efectuándose depósitos catódicos de estos metales al aplicar intensidad de corriente en un circuito cerrado. AL tiempo que se depositan los metales, se coloca cianuro libre en solución.

El problema de este método es que las soluciones tratadas contienen pocas concentraciones de estos metales, haciendo que la eficiencia de corriente sea baja, mientras que se requieren grandes áreas catódicas y agitadores para acelerar el transporte difusional en la capa límite. Por ello el sistema se hace caro y menos atractivo.

6. MECANISMOS DE DEGRADACIÓN DEL CIANURO

La degradación natural del cianuro tiene como factores determinantes ciertas condiciones y mecanismos que se dan en el medio donde se encuentra el cianuro. A continuación

se clasifica según el mecanismo involucrado en la degradación.

6.1 QUELACIÓN O ACOMPLEJAMIENTO

Existen 28 elementos capaces de formar complejos con cianuro, con 72 combinaciones posibles, siendo éstas tan diferentes como que existen especies totalmente insolubles y otras muy solubles. En muchos casos, los complejos formados son menos tóxicos que el cianuro libre pudiéndose pensar que descargar estos complejos es viable ambientalmente. Sin embargo, muchos de estos complejos no son muy estables y se descomponen liberando cianuro libre. De hecho, la toxicidad de muchos complejos esta dada por su disociación en cianuro libre.

Los complejos cianurados metálicos son también intermediarios hacia la formación de compuestos más estables que remueven el cianuro libre del ambiente (Ni).

La importancia de la quelación del cianuro con metales es su relativa rapidez y ocurrencia en presencia de las especies solubles de estos metales, tal como se encuentran en suelos o menas. A su vez, reduce la toxicidad del cianuro libre y actúa como intermediario para reducir la movilidad del cianuro, mediante la absorción en superficies orgánicas o inorgánicas o mediante la precipitación de sales ferrocianuradas de metales, debido a su alta concentración relativa en el suelo, se espera que la mayor parte del cianuro reaccione con el hierro.

6.2 PRECIPITACIÓN DE COMPLEJOS CIANURADOS

Los iones ferrrocianuro y ferricianuro forman sales insolubles con Fe, Cu, Ni, Mn, Zn, Cd y Ag, entre otros. Además, los complejos $Fe-CN$ pueden reaccionar con el tiocianato para formar un complejo aún más estable, siempre que se presente azufre en el suelo.

Se ha demostrado que en un amplio rango de pH y potenciales de oxidación, los complejos metálicos ferrocianurados precipitan si existen metales disponibles en solución.

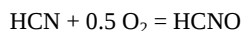
6.3 ADSORCIÓN

Este es otro mecanismo que atenúa la presencia de cianuro libre en los suelos. Se ha determinado que los suelos con alta capacidad de intercambio de aniones pueden atenuar la presencia de cianuro libre. Estos suelos son aquellos que contienen arcillas, cloritas y óxidos de Fe y Al.

6.4 OXIDACIÓN A CIANATO

El cianato de hidrógeno y los iones cianato son significativamente menos tóxicos que el HCN.

El cianuro puede ser convertido a cianato de acuerdo a la siguiente reacción simplificada:



Aunque termodinámicamente, según lo muestra la figura 4, el cianato debería ser predominante en condiciones naturales, es muy difícil de producirse esta reacción.

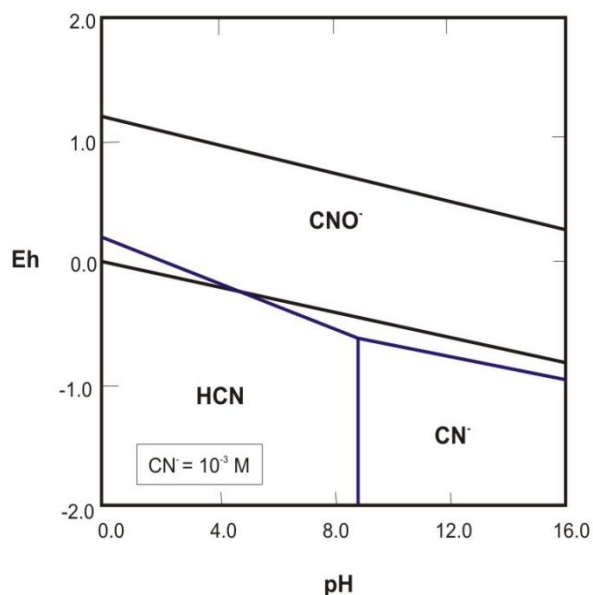
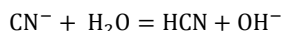


Figura 4. Diagrama Eh – pH para el sistema $\text{CN}^- - \text{H}_2$ a 25 °C.

Para ello se requiere de oxidantes fuertes como el ozono, el peróxido de hidrógeno o cloruro. También promueven la reacción la presencia de enzimas bacteriales y superficies catalizadas de dióxido de titanio, sulfuros de zinc y carbón.

6.5 VOLATILIZACIÓN

La reacción de hidrólisis en equilibrio entre el ion cianuro y el agua ocurre según la ecuación:



Según la figura 4, a pH neutro la mayor parte del CN^- existe en la forma de HCN. De aquí que en los diversos sistemas geoquímicos, donde el pH de las soluciones cianuradas se neutraliza, la concentración de HCN es alta.

En general, existen variables que afectan la volatilización del HCN, tales como:

- La velocidad de remoción de HCN, se incrementa cuando disminuye el pH hasta 5.
- Las soluciones aireadas y no aireadas presentan diferentes velocidades de remoción de HCN. La remoción de HCN, es directamente proporcional a la

velocidad de aireación e inversamente proporcional a la profundidad de la solución.

- Un incremento de 10 °C de temperatura es capaz de incrementar en un 40% la velocidad de remoción de HCN.

6.6 BIODEGRADACIÓN

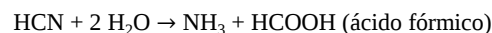
Se ha determinado que las sales cianuradas son rápidamente convertidas bajo condiciones aeróbicas a nitrato, en su mayoría debido a la biodegradación. Es tan cierto el hecho, que en los suelos fértiles las plantas reaccionan a la aplicación de cianuro de la misma manera que a la aplicación del nitrato de sodio o de amonio (fertilizantes). Esto ocurre en soluciones con concentraciones de cianuro de hasta 200 ppm, en condiciones aeróbicas, y 2 ppm en condiciones anaeróbicas. A concentraciones superiores, la solución resulta tóxica para los microorganismos.

6.7 FORMACIÓN DE TIOCIANATO

El cianuro libre reacciona con varias formas de azufre para formar tiocianato, compuesto menos tóxico que el cianuro libre. Las formas que más reaccionan con el cianuro son los polisulfuros y el tiosulfato, que pueden estar presentes en ambientes oxidantes, aunque depende de las condiciones Eh-pH del suelo. Resultados de laboratorio indican que la calcopirita, calcosina, pirrotita y el azufre contribuyen mayormente a la formación de tiocianato.

6.8 HIDRÓLISIS/SAPONIFICACIÓN DEL HCN

A medida que el pH desciende, el ácido cianhídrico puede hidrolizarse por diferentes mecanismos para producir ya sea el ácido fórmico o formato de amonio, según las siguientes reacciones:



El pH del sistema determina la magnitud de formación de cada compuesto. Así un pH ácido favorece la producción de ácido fórmico.

6.9 EL CICLO DEL CIANURO

El llamado “Ciclo del Cianuro”, se debe al trabajo de Mudder en 1984. Representa un sistema completo de disposición de desechos cianurados y muestra el gran número de reacciones químicas, bioquímicas y geoquímicas que involucran al cianuro.

En la figura se presenta un esquema simplificado del ciclo del cianuro mostrando las diversas especies que se forman a partir del cianuro libre en tranques de relaves.

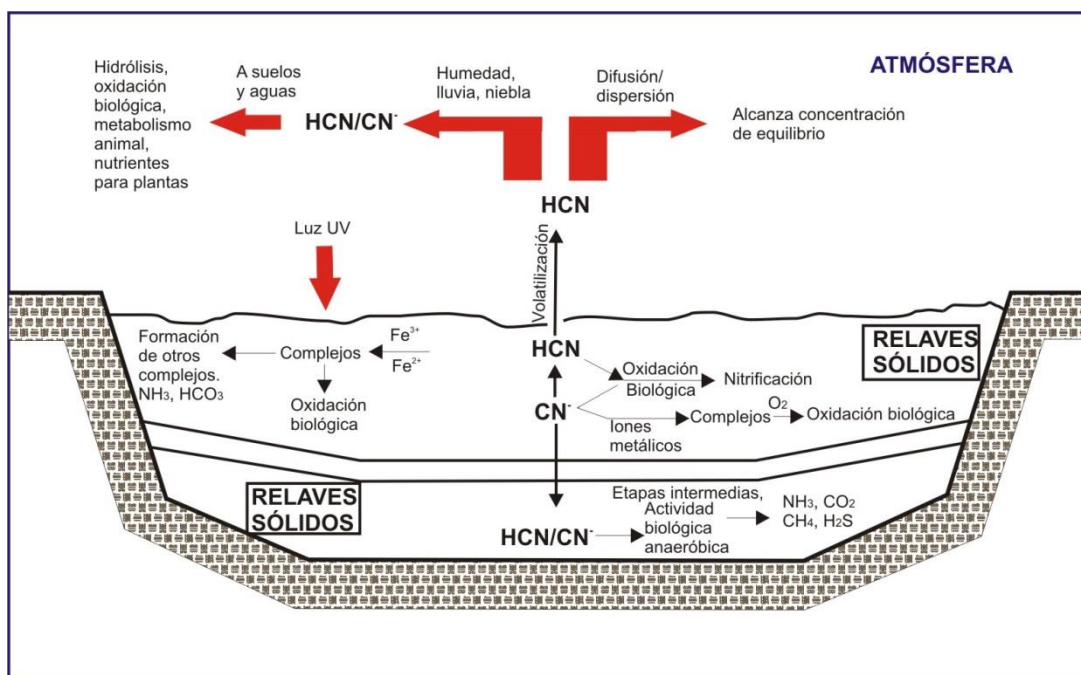


Figura 5. Ciclo del cianuro simplificado, para un tranque de relaves.

7. REACCIONES QUÍMICAS DEL CIANURO EN SISTEMAS ESPECÍFICOS

7.1 POZOS DE SOLUCIONES

En estanques, el mecanismo de degradación natural más frecuente es la volatilización del HCN, favorecida por la baja del PH que provoca el dióxido de carbono del aire y la adición de la lluvia ácida saturada de dióxido de carbono. En condiciones áridas se ha podido comprobar que:

- En un rango de tiempo entre tres y seis meses se limpia una solución desde 200 a 2,6 ppm.
- Los periodos de invierno favorecen la limpieza debido a la convección de corrientes conteniendo CO_2 hacia el fondo del estanque.
- Casi todo el cobre precipita como CuCN .
- La temperatura y la aireación son los factores más importantes en la volatilización del HCN.
- La radiación UV tiene un efecto sobre la estabilidad y degradación de complejos $\text{Fe} - \text{CN}$, en la superficie de los pozos.

7.2 TRANQUES DE RELAVES

Para evaluar el comportamiento del cianuro es este tipo de sistemas, es necesario subdividir según los cambios geoquímicos que pueden ocurrir. Según esto, se tiene que:

SUBSISTEMA	PROCESOS FACTIBLES
Molienda, espesadores	Dilución, concentración, precipitación
Planta de tratamiento químico	Adición de reactivos con reacciones de neutralización, oxidación, precipitación
Sistemas de bombeo de relaves	Reacciones de oxidación, precipitación, resolubilización
Descarga de estanques	Reacciones de oxidación, precipitación
Tranques de relave propiamente tales	Reacciones de dilución, concentración, oxidación
Zona oxidada de relaves	Reacciones de precipitación / coprecipitación o solución por acidificación debido a oxidación secundaria
Zona reducida de relaves	Resolución debido a la reducción hasta el estado de oxidación menor o precipitación de fase insoluble
Drenajes	Oxidación y precipitación
Retorno de agua	Procesos de dilución, concentración y precipitación

Los efectos superficiales de los tranques de relaves son los mismos que en el caso de estanques superficiales, esto es, la volatilización de HCN debido a la disminución del pH, debido al dióxido de carbono tomado desde el aire o aportado por la lluvia.

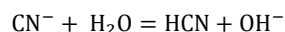
En el seno de la masa de relaves está la presencia de cianuro residual que en algunos casos puede alcanzar niveles riesgosos. Sin embargo, en la mayoría de los casos esto no ocurre debido a ciertos factores que ayudan a la degradación del cianuro:

- Formación del tiocianato.
- Precipitación de complejos cianurados de cobre y cobalto debido a su insolubilidad a pH alto.

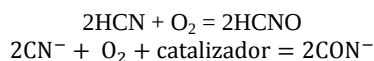
7.3 PILAS DE LIXIVIACIÓN

En la figura 6 se presentan potenciales reacciones en una pila abandonada de lixiviación con cianuro. Debe tenerse presente que la alta permeabilidad de la pila asegura un flujo de aire que permite tener un ambiente oxidado.

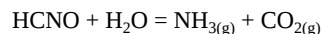
1. Hidrólisis



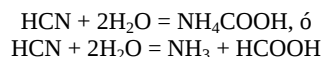
2. Oxidación de HCN/CN



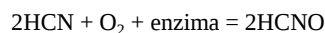
3. Hidrólisis del CNO^-



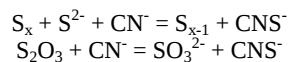
4. Hidrólisis/saponificación de HCN



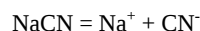
5. Biodegradación aeróbica



6. Formación de tiocianato



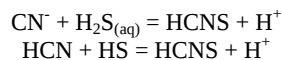
7. Disociación de compuestos cianurados simples



8. Acomplejamiento metal – cianuro



9. Biodegradación anaeróbica



7.4 SUELOS

Para explicar la geoquímica del cianuro en el suelo, se hace referencia a la figura 6, donde se aprecia que a mayor profundidad del suelo aumenta el contenido de humedad y disminuye el potencial de oxígeno, siendo estos dos

factores muy importantes en la degradación del cianuro, puesto que la volatilización y la biodegradación son muy susceptibles a los cambios de contenido de humedad y potencial de oxígeno.

En este sentido los procesos que ocurren son:

- Volatilización
- Degradación biológica
- Adsorción y precipitación
- Hidrólisis

7.5 AGUAS SUBTERRÁNEAS

Al descargar flujos cianurados sobre el suelo, debe considerarse el efecto contaminante sobre aguas subterráneas. En este sentido las legislaciones ponen especial énfasis, a veces sin considerar que los mismos suelos pueden degradar las especies tóxicas. Por ello, se seleccionan sitios de descarga con capacidad de degradación de estas especies para mantener los efluentes dentro de la normativa vigente.

Limitando la clasificación a la degradación producida sólo en las aguas subterráneas, se tiene:

- Adsorción
- Quelación
- Precipitación
- Degradación bacteriana
- Hidrólisis / saponificación
- Volatilización en algunos casos

Todos estos mecanismos son susceptibles a los factores de pH, contenidos de minerales en el agua como arcillas, feldespatos, carbón orgánico y metales libres u óxidos metálicos.

8. CONCLUSIONES

- La minería del oro genera una gran cantidad de residuos sólidos, líquidos y gaseosos.
- El proceso de mayor aplicación en la metalurgia del oro es la cianuración, y los principales elementos contaminantes son el cianuro, metales pesados y el arsénico.
- La química del cianuro es compleja y genera una gran cantidad de compuestos. Desde el punto de vista ambiental, en la minería del oro se debe poner especial énfasis en la protección de las personas, flora y fauna, aire, aguas y suelos, mediante la aplicación de un sistema de control y monitoreo permanente de residuos.
- Se debe portar especial atención a los efectos tóxicos del cianuro y mercurio provocados por exposiciones prolongadas de las personas en el ambiente.
- Un buen manejo ambiental del cianuro requiere optimizar su uso, mejorando las técnicas de

recuperación del cianuro y de los metales que lo acompañan.

- Con el tiempo, el problema ambiental del cianuro libre se disipa, por cuanto se degrada en forma natural hacia compuestos de menor o nula toxicidad. Sin embargo, el problema ambiental de los complejos metálicos del cianuro persiste, ya que generan la incorporación de metales pesados en los

suelos y recursos hídricos. En consecuencia, se debe minimizar la descarga al ambiente de residuos que contengan complejos metálicos de cianuros.

- En la minería del oro es absolutamente necesario incorporar la variable ambiental desde la concepción inicial del proyecto hasta el cierre de las faenas.

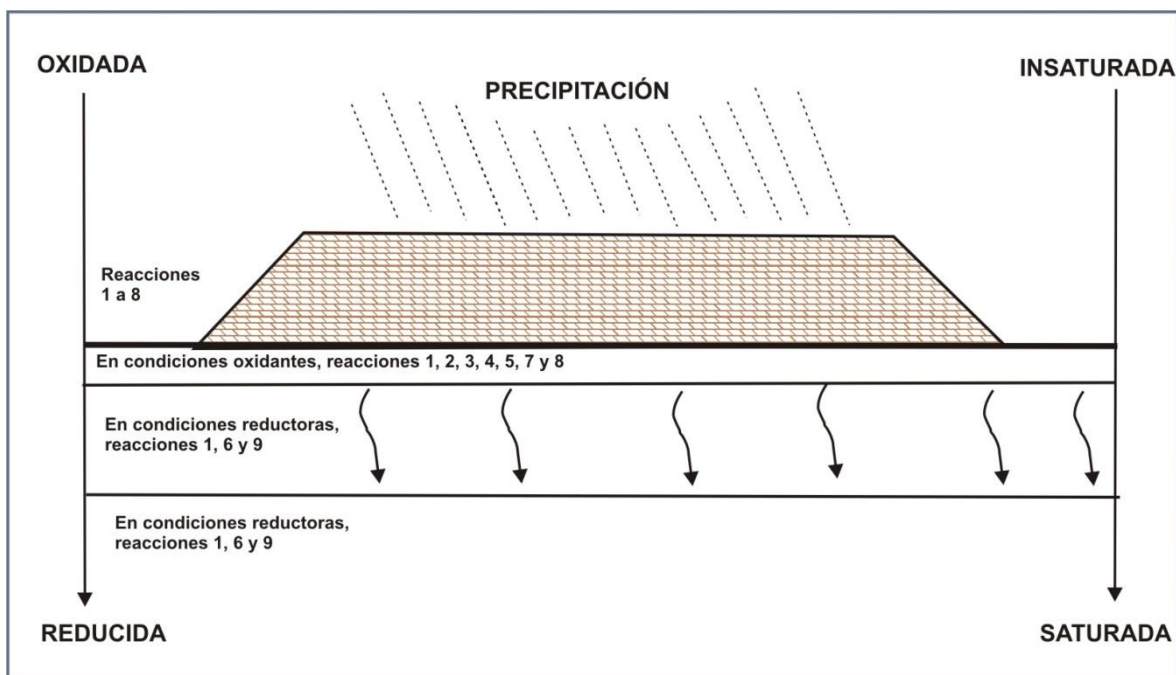


Figura 6. Reacciones que se producen en una pila de lixiviación abandonada.