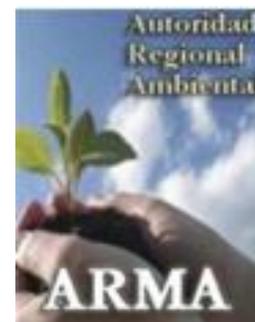




## Estándares Mínimos de Gestión Ambiental

### para Plantas Hidrometalúrgicas de la pequeña minería y minería artesanal que utilizan Cianuro



**Preparado para:**

**Autoridad Regional Ambiental de Arequipa**

**Elaboración del documento:**

**Dr. Oswald Eppers**

Asesor Internacional de la Agencia de Cooperación Alemana (GIZ)  
Programa ProAmbiente

**Equipo de Revisión y Corrección:**

**Dra. Gladys Márquez  
Chaname**

Jefa del Área de Fiscalización,  
ARMA

**Ing. Percy Ponce Medina**  
Consultor del Ministerio de  
Energía y Minas

**Ing. Jorge Antonio Delgado  
Pacheco**

Especialista en Evaluación  
Ambiental, ARMA

**Ing. Caterine E. Cardich Salazar**

Asesor técnico de la Agencia de la Cooperación  
Alemana (GIZ), Programa ProAmbiente

**Blgo. Rubén Hernán Apaza Toro**

Especialista en Evaluación Ambiental, ARMA

Arequipa, Mayo 2014

## Contenido

Lista de Abreviaturas .....	v
1. Introducción.....	1
1.1    Objetivos.....	2
1.2    Alcance.....	2
1.3    Marco Legal .....	3
1.3.1 Leyes, reglamentos y decretos importantes.....	3
1.3.2 Licencia Ambiental.....	3
1.3.3 Distribución de las Competencias .....	4
2. Estándares de calidad ambiental y Límites Máximos Permisibles de Cianuro.....	5
3. El Proceso de Lixiviación con Cianuro .....	7
4. Impactos del cianuro sobre la salud y el ambiente .....	9
4.1 Toxicidad en Seres Humanos .....	9
4.1.1 Cómo actúa el cianuro?.....	9
4.1.2 ¿Qué debe hacer si se expone al cianuro?.....	10
4.1.3 ¿Cómo se trata el envenenamiento por cianuro?.....	11
4.2 Ecotoxicidad de Cianuro .....	11
4.2.1 Los complejos metal-cianuro .....	12
4.2.2 Productos de descomposición gradual de cianuro.....	12
4.3 Degradación de Cianuro.....	13
4.3.1 Degradación natural mejorada.....	13
4.3.2 Tratamientos Químicos para la Descomposición de Cianuro .....	14
5. Típicos Impactos Ambientales causados por Cianuro.....	15
5.1 Generación de residuos.....	15
5.1.1 Desechos de la concentración y/o de la extracción del mineral con cianuro	16
5.1.2 Desechos líquidos.....	16
5.2 Contaminación ambiental por fugas en estanques y tanques de lixiviación .....	17
5.3 Inadecuada manipulación y almacenamiento de cianuro .....	17
5.4 Emisión de polvo durante la pulverización del mineral y por la erosión eólica de relaves.....	17
5.5 Liberación de sustancias tóxicas luego del cierre.....	17
6. Estándares Mínimos de Gestión Ambiental en el Uso y Manejo de Cianuro.....	18
6.1 Manipulación y Almacenamiento de Cianuro .....	19
6.1.1 Almacenamiento de Cianuro .....	19

6.1.2 Tanques de Almacenamiento y Mezclado de Cianuro .....	21
6.1.3 Manejo de derrames de Cianuros .....	23
6.2 Uso de Geomembranas .....	24
6.3 Criterios mínimos para el diseño de pozas de lixiviación .....	25
6.4 Descargas de efluentes.....	26
7. Bibliografía .....	28
ANEXO 1 – Normas de Calidad de Geomembranas.....	30

## Lista de Abreviaturas

ACGIH	American Conference of Industrial Hygienists (Conferencia Americana de Higienistas Industriales)
ANA	Autoridad Nacional del Agua
ARMA	Autoridad Regional Ambiental de Arequipa
CCME	Canadian Council of Ministers of the Environment (Consejo Ministerial de Medio Ambiente de Canadá)
DESA	Dirección Ejecutiva de Salud Ambiental
DFG	Deutsche Forschungsgesellschaft (Asociación Alemana de Investigación Científica)
ECA	Estándar de Control Ambiental
EMGA	Estándar mínimo de gestión ambiental
EPP	Equipo de Protección Personal
FDA	Federal Drug Administration (Administración de Alimentos y Medicamentos de Estados Unidos)
FDEP	Florida Department of Environmental Protection (Ministerio de Protección Ambiental de Florida)
GAMA	Proyecto “Gestión Ambiental en la Minería Artesanal”
GECO	Gestión de Conocimientos para la Minería Artesanal
GIZ	Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (Cooperación Alemana)
GREM	Gerencia Regional de Energía y Minas
HDPE	Polietileno de alta densidad
LLDPE	Polietileno lineal de baja densidad
LMP	Límite Máximo Permissible
MAK	Concentración máxima permisible en el lugar de trabajo (Alemania)
MEDMIN	Proyecto “Manejo Ambiental en la pequeña minería”
MEM	Ministerio de Energía y Minas
MINAM	Ministerio de Ambiente
MTC	Ministerio de Transporte y Comunicaciones
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration (Administración para el Estudio de los Océanos y la Atmósfera de los EEUU)
OEFA	Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental
OMS	Organización Mundial de Salud
OSHA	Occupational Safety and Health Administration (Administración de Seguridad y Salud Ocupacional)
PCM	Presidencia del Consejo de Ministros
PVC	Polivinil cloruro
PM y MA	Pequeña Minería y Minería Artesanal
PM	Material particulado
PP	Polipropileno
SEDAPAR	Servicio de agua potable y alcantarillado
STS	Sólidos Totales Suspendidos
TCLP	Toxicity characteristic leaching procedure (ensayo de lixiviación)
TLV	Threshold Limit Value (Límite máximo admisible)
TWA	Time weighted average (promedio sobre el tiempo)
US EPA	Agencia de Protección Ambiental de los EEUU
UNEP	United Nations Environment Program (Programa ambiental de las Naciones Unidas)

## 1. Introducción

La lixiviación de minerales auríferos con cianuro para la extracción de oro es una técnica tradicionalmente aplicada por la minería mediana y grande por su complejidad. De hecho, la lixiviación con cianuro, no puede considerarse un procedimiento minero típico, sino más bien un proceso hidrometalúrgico, propio de la industria química. En los últimos años, sin embargo, se notó que en el departamento de Arequipa pequeñas empresas también empezaron de utilizar el cianuro para la extracción de oro. Muchas de estas empresas procesan minerales de la minería pequeña y artesanal, minerales que frecuentemente contienen restos de mercurio que no fueron recuperados en el proceso de amalgamación.

En comparación con el mercurio, el cianuro tiene ventajas para la extracción de oro, particularmente si el oro se encuentra disperso en forma de partículas finas y muy finas (microscópicas). Además, en contraste al mercurio, el cianuro no es bioacumulable y se atenúa gradualmente en la naturaleza por biodegradación, evaporación, formación de complejos químicos y otros procesos físicos como la dispersión y dilución.

Actualmente, la única alternativa económicamente viable para reemplazar el mercurio en la pequeña minería de oro es la lixiviación con cianuro. Sin embargo, dado la alta toxicidad aguda de cianuro (con letalidades casi instantáneas), esta alternativa solamente es recomendable si se aplican las medidas necesarias de seguridad, tanto en el marco de salud y seguridad como de la protección de medio ambiente. Y es la responsabilidad del estado Peruano asegurar que la actividad de lixiviación con cianuro no se convierta en un riesgo incalculable para la salud pública y para el medio ambiente.

Durante las últimas décadas, una larga lista de accidentes con consecuencias dramáticas en diferentes partes del mundo ha demostrado la peligrosidad de cianuro. Se conocen más de treinta accidentes graves con cianuro en diversas partes del mundo y la contaminación de las aguas con impacto transfronterizo hasta distancias de más de 2000 km del sitio del accidente (Dzombak et al. 2006). Estos accidentes fueron el motivo del Parlamento Europeo a aprobar en el año 2010 con una aplastante mayoría una resolución en contra del uso de cianuro en la minería de oro. Sin embargo, bajo la presión de la industria minera y el temor de la pérdida de muchos puestos de empleo en la minería de oro en Europa, la Comisión Europea, que es una instancia superior al Parlamento, no aprobó la solicitud<sup>1</sup>. A pesar del fracaso de esta iniciativa a nivel Europeo, el uso de cianuro en minería fue prohibido en países como Alemania, Turquía, la República Checa o Hungría debido a la desfavorable relación beneficio-riesgo de esta actividad.

Los impactos ambientales y a la salud de la industria hidrometalúrgica usando cianuro en gran magnitud dependen del tipo de proceso aplicado, del tamaño de la producción, la ubicación de la planta de extracción además de la experiencia y consciencia de los operadores.

Por lo tanto, es muy importante para la autoridad competente no solamente exigir a la industria grande el cumplimiento con estándares mínimos de gestión ambiental, sino también a las empresas pequeñas aplicando este método de lixiviación por cianuro.

---

<sup>1</sup> Directiva 2006/21/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 15 de marzo de 2006 sobre la gestión de los residuos de industrias extractivas

## 1.1 Objetivos

El objetivo del presente trabajo es el desarrollo de estándares de prevención y mitigación ambiental para pequeñas empresas usando cianuro en la lixiviación de minerales auríferos. La práctica demostró que el solo monitoreo de parámetros físico-químicos de emisiones no asegura un manejo adecuado y seguro de las instalaciones; además muchas veces son difíciles de controlar y fiscalizar.

### Objetivos específicos

- Ayudar en la definición de una política y una estrategia a mediano plazo para la minimización del impacto ambiental de la PM y MA en el departamento de Arequipa, poniendo énfasis en la responsabilidad que cada minero tiene en el cumplimiento de prácticas ambientales que apoyen la sustentabilidad del sector con una protección máxima del ambiente y de la salud de los trabajadores, sus familias y de la población en general;
- Identificar los impactos ambientales más importantes y a la salud por el uso de cianuro en la PM y MA;
- Definición de estándares mínimos de mitigación, prevención y monitoreo ambiental para la PM y MA con enfoque al uso de cianuro;
- Facilitar la supervisión y fiscalización de la PM y MA por las Autoridades Locales (municipios) y la Autoridad Ambiental Regional (ARMA) en cooperación con otros entes fiscalizadores como la Autoridad Nacional del Agua (ANA), Dirección Ejecutiva de Salud Ambiental (DESA) u Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA), etc.;

## 1.2 Alcance

Los estándares mínimos de gestión ambiental definidos en el presente documento para instalaciones mineras de la PM y MA que trabajan con cianuro serán utilizados por la ARMA como referencia, tanto para la evaluación ambiental como en la supervisión y fiscalización de actividades relacionados con el beneficio del mineral. Según la Ley N° 27651 (modificada por el Decreto Legislativo N° 1040 y los Decretos Legislativos N° 1100 y N° 1101), para ser considerado una pequeña planta de beneficio, la capacidad no debe exceder las 350 toneladas métricas (Tm) por día (aproximadamente 130 m<sup>3</sup>, considerando una densidad promedio de 2,7 Tm/m<sup>3</sup>).

Los estándares definidos en el presente documento no son universales, exhaustivos o excluyentes. Cada industria minera de la PM y PM que genere impactos no previstos en el presente documento, deberá definir medidas para prevenir y mitigar estos impactos y aplicarlas a su proyecto. Como punto de partida para la identificación de riesgos y la definición de medidas de prevención y mitigación existe una variedad de guías y manuales del Ministerio de Energía y Minas (MEM) y de otras instituciones nacionales e internacionales, incluyendo:

- Ministerio de Energía y Minas (1996), *Guía Ambiental para el Manejo de Cianuro*, Subsector Minería, Volumen XIII, Referencia de aprobación: R.D. No. 025-96-EM/DGAA.
- Ministerio de Energía y Minas (1996), *Guía Ambiental para el Proyecto de Lixiviación en Pilas*, Referencia de aprobación: R.D. No. 002-96-EM/DGAA.
- Ministerio de Energía y Minas (sin año), *Uso y Manejo de Cianuro en la Pequeña Minería, Orientaciones para hacer minería*, Tomo 4.
- Ministerio de Energía y Minas (1994), *Protocolo de Monitoreo de Calidad de Agua*, Referencia de aprobación: R.D. No. 044-94-EM/DGAA.

- Rivas, MS, Martínez C (2003), *Guía de Buenas Prácticas Ambientales para la Pequeña Minería*, SERNAGEOMIN, Chile, [http://www.sernageomin.cl/pdf/mineria/ambiente/manejo\\_mercurio.pdf](http://www.sernageomin.cl/pdf/mineria/ambiente/manejo_mercurio.pdf)
- Logsdon Marc J., Hagelstein Karen y Mudder Terry (2001), *El Manejo de Cianuro en la Extracción de Oro*, The International Council on Metals and the Environment, ISBN 1-895720-35-4 ([http://www.caem.com.ar/wp-content/uploads/EI%20Manejo%20del%20cianuro%20\(ICMM\).pdf](http://www.caem.com.ar/wp-content/uploads/EI%20Manejo%20del%20cianuro%20(ICMM).pdf))
- Código Internacional para el Manejo del Cianuro para la Fabricación, el Transporte y el Uso del Cianuro en la Producción de Oro" - <http://www.cyanidecode.org/bienvenido-al-icmi>

El presente documento no pretende reemplazar estas guías y manuales, más bien está usando la información disponible en estos documentos y complementándola con la propia experiencia profesional e información actualizada de las áreas de fiscalización y evaluación de la ARMA.

### **1.3 Marco Legal**

Una presentación del marco legal para la PM y MA se encuentra en el documento *Estándares mínimos de Gestión Ambiental para la pequeña minería y minería artesanal*.

#### **1.3.1 Leyes, reglamentos y decretos importantes**

En adelante, se presenta una lista no exhaustiva de leyes, reglamentos y decretos importantes relacionados al uso de cianuro en la minería:

- Ley N° 29023 (2007): Ley que regula la comercialización y uso de cianuro,
- Ley N° 28551 (2005): Ley sobre la obligación de elaborar y presentar Planes de Contingencia.
- Ley No 29783, Ley de Seguridad y Salud en el Trabajo.
- R.M. 596-2002-EM/DM (2002): Reglamento de Consulta y Participación Ciudadana en el procedimiento de aprobación de los Estudios de Impacto Ambiental en el sector de energía y Minas
- D.S. N° 002-2013-MINAM: Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo
- D.S. N° 002-2008-MINAM: Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua
- D.S. N° 010-2010-MINAM: Límites Máximos Permisibles para la descarga de Efluentes Líquidos de Actividades Minero-Metalúrgicas
- D.S. N° 046-2001-EM: Reglamento de Seguridad e Higiene Minera
- D.S. N° 055-2010-EM: Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional y otras medidas complementarias en minería.
- D.S. N° 021-2008-MTC: Transporte Terrestre de Materiales y Residuos Peligrosos.
- D.S. N° 045-2013-EM: Reglamento sobre la comercialización y uso de cianuro.
- D.L. 1103-2013 Poder Ejecutivo: Decreto Legislativo que establece medidas de control y fiscalización en la distribución, transporte e comercialización de insumos químicos que puedan ser utilizados en la minería informal.

#### **1.3.2 Licencia Ambiental**

Para cada actividad hidrometalúrgica, el titular de la PM y MA deberá presentar un EIA semidetallado, que será revisado y aprobado por la ARMA. Dentro de sus competencias, la GREM debe aprobar además el diseño final de cada instalación utilizando cianuro en la PM y MA. En los

instrumentos de evaluación (particularmente EIAs), se verificará para la gestión ambiental el cumplimiento con los siguientes reglamentos y estándares:

- Los estándares mínimos de prevención y mitigación establecidos en el presente documento;
- D.S. N° 016-93-EM sobre Protección del Medio Ambiente en la Actividad Minero – Metalúrgica;
- Ministerio de Energía y Minas (1996), *Guía Ambiental para el Manejo de Cianuro*, Subsector Minería, Volumen XIII, Referencia de aprobación: R.D. No. 025-96-EM/DGAA;
- Ministerio de Energía y Minas (1996), *Guía Ambiental para el Proyecto de Lixiviación en Pilas*, Referencia de aprobación: R.D. No. 002-96-EM/DGAA;
- Ministerio de Energía y Minas (sin año), *Uso y Manejo de Cianuro en la Pequeña Minería, Orientaciones para hacer minería*, Tomo 4;
- D.S. N° 004-2012-MINAM - Disposiciones Complementarias para el Instrumento de Gestión Ambiental Correctivo (IGAC), para la Formalización de Actividades de Pequeña Minería y Minería Artesanal en curso
- D.S. N° 046-2001-EM (2001): Reglamento de Seguridad e Higiene Minera;
- D.S. N° 055-2010-EM (2010): Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional y otras medidas complementarias en minería;
- D.S. N° 021-2008-MTC (2008): Transporte Terrestre de Materiales y Residuos Peligrosos;
- Otros si sea necesario.

### **1.3.3 Distribución de las Competencias**

- Según la ley N° 29023, para la PM y MA, la ARMA es la autoridad competente para dictar las normas específicas para asegurar el uso, manipulación y manejo adecuado del cianuro en las actividades de la PM y MA, así como para imponer sanciones – o sea realizar la fiscalización.
- Todas las acciones relacionados con el “control, fiscalización e investigación de la comercialización del cianuro” (i.e. inclusive el transporte), es la competencia de la Policía Nacional del Perú que en el ámbito de sus competencias brindarán el apoyo y colaborarán con la SUNAT.
- El Ministerio de Energía y Minas (MEM) es la autoridad competente para autorizar el uso de cianuro, de acuerdo a la ley N° 29023 y el D.S. 045-2013 EM. La ARMA en ejercicio de sus competencias ejecutará la supervisión y fiscalización en la PM y MA de acuerdo a los compromisos definidos en los EIAs.
- En la PM y MA, la GREM es la autoridad competente para la supervisión y fiscalización y/o sanción en asuntos relacionados a Seguridad y Salud Ocupacional.

## 2. Estándares de calidad ambiental y Límites Máximos Permisibles de Cianuro

En el Perú, hasta la fecha existen Límites Máximos Permisibles (LMP) y Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para cianuro en efluentes, suelos, aguas superficiales y agua potable.

Aún no se ha definido criterios para determinar si un residuo contaminado con cianuro debe ser considerado como residuo peligroso para su disposición final (importante particularmente para la evaluación del riesgo de desechos mineros). La Tabla 2.1 resume LMP y ECA nacionales e internacionales para facilitar la caracterización de una contaminación ambiental por cianuro.

**Tabla 2.1: LMP y ECA nacionales e internacionales para cianuro**

Valor	Organismo o País	Fuente	Comentario
<b>Efluentes</b>			
1 mg/L	Perú	D.S. 010-2010-MINAM (LMP para actividades Minero-Metalúrgicas)	LMP como cianuro total, valor en cualquier momento
<b>Suelos</b>			
0.9 mg/kg	Perú	D.S. N° 002-2008-MINAM (ECA como cianuro libre)	Suelo agrícola
0.9 mg/kg			Suelo Residencial/Parques
8 mg/kg			Suelo Comercial/Industrial/Extractivos
20 mg/kg	Países Bajos	Ministerio de Medio Ambiente de Holanda	Valor de Intervención (remediación) como CN libre
650 mg/kg			Valor de Intervención (remediación) como CN total (pH del suelo <5)
50 mg/kg			Valor de Intervención (remediación) como CN total (pH del suelo ≥5)
1250 mg/kg	Australia	NEPM guideline, Schedule B (1)	Nivel de investigación de cianuro libre para sitios industriales/comerciales, basándose en el riesgo de salud humana
250 mg/kg			Nivel de investigación de cianuro libre para sitios residenciales, basándose en el riesgo de salud humana
<b>Agua Subterránea</b>			
1.5 mg/L	Países Bajos	Ministerio de Medio Ambiente de Holanda	Valor de Intervención (remediación) como CN libre o total
0.2 mg/L	EEUU	US EPA	LMP en agua subterránea (como CN libre)
<b>Aguas superficiales</b>			
0.1 mg/L c. CN WAD	Peru	DS N° 002-2008-MINAM	ECA para riego de vegetales y bebida de animales
0.022 mg/L c. CN libre			ECA como Hg, aguas superficiales destinadas para recreación, contacto secundario (como deportes acuáticos con botes, etc.)
0.022 mg/L c. CN libre			ECA como Hg, aguas superficiales destinadas para recreación, contacto primario
0.8 mg/L c. CN WAD			
0.022 mg/L c. CN libre			Agua superficial tipo A2 y A3 (aguas que pueden ser potabilizadas previo tratamiento)
0.8 mg/L c. CN WAD			
0.005 mg/L c. CN libre			Agua superficial tipo A1 (aguas que pueden ser potabilizadas con desinfección)
0.08 mg/L c. CN WAD			
<b>Agua potable</b>			
0.07 mg/L	Perú	Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano. DS N° 031-	LMP como CN libre

2010-SA			
0.2 mg/L	EEUU	US EPA	LMP como CN libre
<b>Aire</b>			
10 ppm HCN (11 mg/m <sup>3</sup> )	Perú	Guía Ambiental para el Manejo de Cianuro, MEM 1996	Concentración máxima permitida en el lugar de trabajo (el valor umbral de olor para HCN es aprox. 2 a 5 ppm)
<b>Residuos</b>			
a) Concentr. CN libre <70 mg/kg, o CN total <320 mg/kg	Australia	NSW EPA (2009) <sup>2</sup>	Residuo no peligroso. Límite permisible de CN en un residuo que permite la deposición en un relleno sanitario
b) CN libre: concentr. <300 mg/kg y TCLP <3.5 mg/L			
c) CN total: concentr. <5,900 mg/kg y TCLP <16 mg/L			
a) CN libre: TCLP >14 mg/L			Residuo peligroso. El material debe ser lavado o estabilizado químicamente antes de la disposición final en un relleno de sustancias peligrosas
b) CN total: TCLP >64 mg/L			
c) CN libre: concentr. >1,200 mg/kg			
d) CN total: concentr. >23,600 mg/kg			

LMP: Límite Máximo Permisible, ECA: Estándar de Calidad Ambiental, TCLP: Toxicity characteristic leaching procedure (ensayo de lixiviación), US EPA: Ministerio de Medio Ambiente de los EEUU

<sup>2</sup> los criterios indicados son una selección de los criterios definidos en este estándar

### 3. El Proceso de Lixiviación con Cianuro

En el presente capítulo se describe brevemente el proceso de la lixiviación con cianuro. Una descripción más detallada con los diferentes procesos aplicados y las características químicas y toxicológicas de cianuro se encuentra en la *Guía Ambiental para el Manejo de Cianuro*, publicado por el Ministerio de Energía y Minas (MEM 1996).

La extracción de oro (inclusive otros metales preciosos como plata, platino, etc.) por lixiviación con cianuro utiliza soluciones diluidas de cianuro de sodio, potasio o calcio, típicamente en una concentración entre 0.01% y 0.05% de cianuro (100 a 500 partes por millón). Las soluciones deben ser ajustadas con soda caustica o lechada de cal a un pH por encima de 10 para evitar la formación del peligroso gas ácido cianhídrico. El cianuro, en condiciones ligeramente oxidantes, disuelve el oro contenido en el mineral, formando un complejo soluble en agua. La solución resultante conteniendo oro, la denominada “solución cargada”, es generalmente filtrada en columnas de carbón activado donde el complejo de oro y cianuro se adsorbe. En vez de la adsorción con carbón activado también se aplica en algunas instalaciones un proceso llamado “cementación”, donde se agrega zinc para la reducción del oro que precipita y puede ser aislado por sedimentación y filtración. La solución residual o “estéril” (es decir, carente de oro) aún contiene cianuro libre y puede ser recirculada luego del ajuste de la concentración de cianuro en el proceso de la extracción para extraer más oro.

Entre los diferentes enfoques para la lixiviación del oro de un mineral aurífero mediante el cianuro se puede destacar principalmente dos procesos: la lixiviación en tanques (“lixiviación por agitación”) y la lixiviación en pila (por percolación).

El sistema de lixiviación en tanques es el método preferido para el procesamiento de los relaves de quimbaletes. Estas plantas tienen una alimentación manual y aplican un proceso discontinuo de lotes. Para poder lixiviar un mineral en tanques, el mineral aurífero se tritura y se muele hasta reducirlo a menos de un milímetro de diámetro. Luego, el mineral finamente molido se lixivia directamente en tanques con la solución de cianuro para disolver el oro. Los residuos sólidos del material extraído (relaves) en forma de lodo deben ser guardados en canchas de relave impermeabilizadas en la base para evitar una contaminación del subsuelo y del agua subterránea y/o superficial. La impermeabilización generalmente se realiza utilizando una geomembrana, concreto o una impermeabilización utilizando alquitrán. La solución estéril del lodo puede ser separada, recargada con cianuro y reutilizada en el proceso de lixiviación. Sin embargo, debido a la gradual acumulación de metales solubles como hierro, cobre o zinc en el lixiviado, la solución estéril pierde su actividad y debe ser bombeada a un sistema de tratamiento para su respectiva descontaminación. En la *Guía Ambiental para el Manejo de Cianuro* del MEM<sup>3</sup> se encuentra las alternativas para la descontaminación de soluciones conteniendo cianuro residual.

La cianuración por percolación directa no es común en la pequeña minería por ser un proceso más exigente con respecto a la infraestructura requerida. Depende de la granulometría del material aurífero y de la forma de oro presente, el mineral puede ser triturado y molido para lograr una granulometría por debajo de unos pocos centímetros. Luego se deposita el mineral en una cancha de lixiviación, grandes pilas o montones. Una solución de cianuro se hace pasar lentamente a través de estas pilas (típicamente usando un sistema de regaderas con una velocidad de 0.2 litros por metro cuadrado o 0.05 a 0.08 m<sup>3</sup>/ton, aproximadamente), colocadas en áreas impermeabilizadas, para disolver el oro y recuperar la solución de cianuro. La solución con el oro disuelto pasa por columnas de carbón activado para la separación del oro y la solución estéril se

recoge en una poza de decantación dentro de la cancha de relaves, se recarga con cianuro en una poza o tanque de solución barren y se recicla de regreso al sistema de lixiviación.

## 4. Impactos del cianuro sobre la salud y el ambiente

### 4.1 Toxicidad en Seres Humanos

- El cianuro es una sustancia química, potencialmente letal, que actúa rápidamente en cuestión de minutos y puede existir de varias formas.
- Los seres humanos pueden estar expuestos al cianuro mediante inhalación, ingestión o absorción a través de la piel.
- El cianuro puede ser un gas incoloro como el cianuro de hidrógeno (HCN), o estar en forma de cristales como el cianuro de sodio (NaCN), calcio (Ca(CN)<sub>2</sub>) o de potasio (KCN).
- El cianuro se describe con un olor a “almendras amargas”, pero no siempre emana un olor y no todas las personas pueden detectarlo.

#### 4.1.1 *Cómo actúa el cianuro?*

Dentro del cuerpo, el cianuro impide a las células utilizar el oxígeno del aire, lo cual causa hipoxia de los tejidos y la “cianosis”, caracterizada por la decoloración azulada de la piel. El colapso del sistema respiratorio deja de nutrir a las células con oxígeno, resultando en una respiración rápida y profunda, seguida por convulsiones, pérdida del conocimiento y asfixia (CDC 2006). La forma más tóxica del cianuro es el ácido cianhídrico (HCN) gaseoso. El límite de umbral tope de HCN en el lugar de trabajo fue establecido por La Conferencia Norteamericana de Higienistas Industriales Gubernamentales (ACGIH) en 4.7 ppm (ACGIH 1998). En concentraciones de 20 a 40 ppm de HCN en el aire, se puede observar cierto malestar respiratorio después de varias horas. La muerte ocurre en pocos minutos con concentraciones de HCN por encima de aproximadamente 250 ppm en el aire.

Para el cianuro de potasio o de sodio, la dosis letal en humanos por ingestión o inhalación varía entre 0,050 y 0,2 gramos de cianuro (correspondiendo a unos 2 a 5 granos de arroz).

En resumen, se puede concluir que:

- El envenenamiento causado por cianuro depende de la cantidad de cianuro al que ha estado expuesta la persona, la forma de exposición y la duración de la misma.
- Respirar el gas de cianuro es lo que causa mayor daño.
- El gas de cianuro es más peligroso en lugares cerrados porque el gas queda atrapado al interior de los mismos.
- El gas de cianuro se evapora y dispersa rápidamente en espacios abiertos haciendo que sea menos dañino al aire libre.
- El gas de cianuro es menos denso que el aire y por esta razón tiende a elevarse.
- El cianuro evita que las células del cuerpo reciban oxígeno. Cuando esto ocurre, las células mueren.
- El cianuro es más dañino al corazón y al cerebro que a otros órganos, porque el corazón y el cerebro utilizan bastante oxígeno.

La exposición por cualquier medio a una cantidad peligrosa de cianuro puede causar lo siguientes efectos en la salud:

- Convulsiones
- Presión sanguínea baja
- Ritmo cardíaco lento

- Pérdida de la conciencia
- Lesión en el pulmón
- Falla respiratoria que lleva a la muerte

Las personas expuestas a pequeñas cantidades de cianuro por la respiración, la absorción por la piel o el consumo de alimentos contaminados con cianuro pueden presentar algunos o todos los síntomas siguientes en cuestión de minutos (CDC 2006):

- Respiración rápida
- Agitación
- Mareo
- Debilidad
- Dolor de cabeza
- Náusea y vómito
- Ritmo cardíaco rápido

Los sobrevivientes del envenenamiento severo por cianuro pueden desarrollar daño en el corazón y daño cerebral.

Una exposición crónica (o sea de pequeñas cantidades durante largos periodos) tiene también efectos considerables sobre la salud, incluyendo pérdida de apetito, migrañas, náuseas o irritación de los ojos. Además, puede atacar las fibras musculares del corazón o afectar al funcionamiento de la tiroides.

El hecho de que la persona presente estos signos y síntomas no significa necesariamente que haya estado expuesta al cianuro, ya que existen otras enfermedades que presentan signos parecidos.

#### **4.1.2 ¿Qué debe hacer si se expone al cianuro?**

Trabajadores en instalaciones de extracción de minerales por cianuración como también el personal de instituciones que realizan visitas de supervisión y fiscalización pueden tener contacto directo con cianuro y por lo tanto deben ser capacitados en el manejo de estas sustancias y de medidas de protección personal (ver D.S. 055-2010 EM). Cualquier persona que visita una planta donde manejan cianuro debe ser preparada para situaciones de contingencia. En lo siguiente se resume algunos aspectos importantes de protección en estas situaciones:

- Si existe la evidencia o sospecha de una liberación de cianuro, hay que salir del área donde el cianuro fue liberado para respirar aire fresco. Se debe desplazarse hacia un área con aire fresco es una buena forma de reducir la posibilidad de muerte por la exposición al gas de cianuro.
  - Si la liberación del cianuro se produjo al aire libre, debe retirarse del área donde éste fue liberado.
  - Si el cianuro fue liberado al interior de una edificación, debe salir de ese lugar.
  - Si no puede salir del área expuesta al cianuro, debe mantenerse lo más cerca posible al piso.
- Debe quitarse cualquier prenda de vestir contaminada con cianuro líquido. En lo posible, debe guardar la ropa en una bolsa plástica, sellarla y luego guardar esa bolsa en una segunda bolsa plástica y sellarla a su vez. Quitarse la ropa y guardarla, siguiendo estas

instrucciones, le ayudará a protegerse contra cualquier sustancia química que pueda estar en sus prendas de vestir.

- La ropa contaminada guardada en bolsas plásticas debe ser descontaminado por personal especializado en descontaminación de cianuro. No manipule por propia cuenta las bolsas de plástico.
- Si siente quemazón o si tiene la visión borrosa, debe enjuagarse los ojos con abundante agua durante unos 10 a 15 minutos.
- Debe lavarse cuidadosamente con agua y jabón para retirar cualquier cantidad de cianuro líquido que tenga en la piel.
- Si sabe que alguien ha ingerido (tragado) cianuro, no lo debe hacer vomitar o darle líquidos para beber.
- Busque atención médica de inmediato.

#### **4.1.3 ¿Cómo se trata el envenenamiento por cianuro?**

El envenenamiento por cianuro se trata con antidotos específicos y atención médica de apoyo en una instalación hospitalaria. El antidoto más común es el nitrito de amilo, que puede administrarse en forma oral o por inyección. Lo más importante es que las víctimas busquen tratamiento médico lo más pronto posible.

#### **4.2 Ecotoxicidad de Cianuro**

El impacto más importante del cianuro en el medio ambiente es la contaminación de aguas superficiales y subterráneas. Debido a su gran solubilidad en agua, la migración de cianuro en medios como el subsuelo y agua subterránea es muy rápida en comparación con muchos otros contaminantes. Entonces no es una sorpresa que la fauna acuática y otros animales como aves, mamíferos o reptiles que tengan contacto con agua contaminada por cianuro son los más afectados. De hecho, los peces son mucho más sensibles al cianuro que los seres humanos (Eisler 1991). Peces jóvenes de agua fría, como las truchas, parecen ser una de las especies acuáticas más sensibles al cianuro (Logsdon et al. 2001). Los insectos acuáticos generalmente son menos sensibles a la sustancia (Eisler 1991).

Entre los animales no acuáticos más afectados están las aves migratorias que pasan a través de regiones áridas y toman el agua de estanques abiertos con agua conteniendo cianuro.

Particularmente para pozos pequeños de lixiviación, la cobertura con redes de plástico es una buena opción para evitar la muerte de aves y otros animales (Eisler 1991). La colocación de redes en depósitos de relaves de gran escala está limitada por el peso de las redes, especialmente cuando se acumula nieve o hielo en climas fríos y debidos a que los animales silvestres quedan atrapados accidentalmente en ellas. Otra opción son por ejemplo pelotas plásticas u otros dispositivos flotantes para cubrir toda la superficie de los pequeños estanques de procesamiento. Este último método también ayuda a reducir la pérdida de cianuro libre debido a la volatilización.

El acceso de otros animales que pueden llegar al agua tóxica en estanques abiertos puede ser controlado usando bermas y vallas, paredes, plataformas de concreto, etc.

##### *Toxicidad para los vegetales*

El impacto de cianuro al crecimiento de plantas generalmente es mínimo. Sin embargo, existen estudios donde se mostró que concentraciones elevadas pueden impedir la respiración de plantas grandes, y llevarlas a la muerte. Además, varias plantas pueden acumular cianuro en diferentes formas químicas durante largos periodos (Eisler 1991).

#### **4.2.1 Los complejos metal-cianuro**

La toxicidad del cianuro depende mucho de la forma química en que se encuentra. Después de su uso en el proceso hidrometalúrgico de extracción, químicamente se diferencia entre los siguientes tres tipos principales: cianuro libre, cianuro débilmente complejado y cianuro fuertemente complejado. Todas estas fracciones de cianuro en conjunto representan en la química analítica el "cianuro total". El conocimiento de la química y del comportamiento en la naturaleza de estos tres tipos de cianuro es importante para comprender su ecotoxicidad y toxicidad humana.

El cianuro es un compuesto muy reactivo y no solamente reacciona con metales preciosos como el oro y la plata formando complejos metal-cianuro, sino también con metales como el hierro, el zinc, el cobre, el níquel, el arsénico e inclusive con el mercurio. Debido a que la concentración de hierro en aguas mineras generalmente es alta, el complejo cianoferrato (un complejo de cianuro con hierro) está presente masivamente en las aguas de desecho de la minería de oro.

Es la potencial reacción entre mercurio y el cianuro la que genera un riesgo particular para el ambiente como para la salud humana, debido a que muchos relaves procesados contienen restos de mercurio que no fue recuperado en la amalgamación. El hecho de que el compuesto entre mercurio y cianuro es soluble en agua, aumenta significativamente la migración, biodiversidad y toxicidad del mercurio en comparación con el mercurio elemental (Miller et al. 1996, Coles y Cochrane 2006, MSHA 1997). Pero no solamente el mercurio se moviliza con cianuro, también otros metales tóxicos inmovilizados en el mineral se solubilizan y pueden contaminar acuíferos.

La toxicidad de complejos cianuro-metal depende de diferentes factores, pero principalmente de la estabilidad del complejo. Mientras complejos de cianuro con oro, mercurio, hierro y cobalto son muy estables y por lo tanto tienen una baja toxicidad, otros compuestos formados con metales como sodio, potasio, calcio, magnesio e inclusive mercurio son muy solubles y por lo tanto muy tóxicos. La formación de complejos estables entre cianuro y hierro es una suerte para la naturaleza y por lo tanto apoyan a la atenuación natural de la contaminación por cianuro. A pesar de que también estos complejos cianuro-metal estables pueden liberar de nuevo el cianuro si el medio se vuelve ácido o si son expuestos directamente a la luz solar, la concentración de cianuro libre se mantiene relativamente baja debido a que la degradación de los complejos es gradual y no de golpe.

#### **4.2.2 Productos de descomposición gradual de cianuro**

Por sus bajos costos, la degradación biológica del cianuro para la detoxificación de desechos y/o efluentes contaminados es la forma de mayor interés, tanto en empresas grandes como en pequeñas. Muchos estudios de investigación han sido realizados, demostrando que la concentración de este compuesto disminuye con el tiempo, debido a fenómenos de volatilización, precipitación, complejación, adsorción y biodegradación mediante microorganismos nativos (ver por ejemplo bibliografía en Villavicencio Velasco 2011). Sin embargo, la degradación de cianuro en efluentes y en relaves es un proceso complejo y depende de varios parámetros. El cianuro no se degrada directamente por completo, sino existe una gran variedad de productos intermediarios de la degradación del cianuro con distintos grados de toxicidad humana y ecológica. Los cuatro productos más comunes y conocidos son el cianato, el tiocianato, sulfuro, nitrato y el amonio.

Los cianatos son el directo resultado de la oxidación del cianuro libre y son sustancias bastante estables que pueden permanecer mucho tiempo en el agua y suelo en sitios mineros. A pesar de que su toxicidad oral aguda es aproximadamente un factor de 50 a 200 inferior en comparación con el cianuro libre (Birch y Schütz 1946), existen daños crónicos, tanto de la fauna acuática

(Dauchy et al. 1980), como también a la salud humana (incluyendo efectos de somnolencia, convulsiones, disnea, nerviosismo y excitación o híper reactividad). No existen en Perú, EEUU, Canadá o Europa ECA para cianato o tiocianato en agua o suelo.

El cianuro forma tiocianatos típicamente en geologías con presencia de minerales sulfurosos. La toxicidad aguda de tiocianato es comparable con la toxicidad del cianato, ya que es aproximadamente 50 veces menos tóxico que el cianuro libre (PAN, US EPA). Mientras la toxicidad aguda del tiocianato al ecosistema acuático es reportada como baja, existe el peligro de un daño crónico para la vida acuática. En este aspecto, de importancia para los ecosistemas típicos acuáticos de Arequipa, es la observación de un incremento de la mortalidad en crustáceos como el camarón y también a peces sensibles como la trucha en presencia de tiocianato (Dauchy et al. 1980). Existe evidencia de una biodegradación de tiocianato bastante rápida en amonio y sulfato, y es potencialmente la formación de amonio durante la metabolización que es la causa de la ecotoxicidad de esta sustancia.

La descomposición de cianuros genera nitratos y amoniaco como resultado de la hidrólisis del cianuro. Particularmente el amoniaco es altamente tóxico en el ecosistema acuático, con una toxicidad para peces aún por encima del cianuro libre.

En la práctica del monitoreo ambiental, los únicos productos tóxicos de la descomposición natural del cianuro que se monitorea con frecuencia es el amonio y el nitrato. Debido a que el cianato y tiocianato no están considerados en la legislación ambiental (o sea de los LMP de efluentes o ECA de cuerpos de agua), se puede concluir que el cumplimiento con la legislación actual no asegura que un efluente o agua superficial no tenga un impacto negativo al ecosistema o para la salud humana.

En resumen, los procesos de degradación natural generalmente toman varios meses, o inclusive varios años y muchos productos de degradación biológica también son tóxicos. En la mayoría de los casos, una biodegradación solamente es capaz de reducir la carga de sustancias tóxicas (como el cianuro, cianato, tiocianato y metales pesados), pero no permite que los niveles de cianuro ni de metales pesados se reduzcan de manera aceptable a niveles por debajo de los LMP de efluentes. Además, el almacenamiento durante largo tiempo, de “soluciones cansadas”, aumenta considerablemente el riesgo de pérdidas por fugas e impactos negativos para el medio ambiente por la intoxicación de animales silvestres y de ganado.

### **4.3 Degradación de Cianuro**

#### ***4.3.1 Degradación natural mejorada***

Existe una variedad de opciones para mejorar el proceso de la degradación de cianuro para cumplir con los LMP legalmente establecidos en los efluentes. Una medida simple y eficaz es el aprovechamiento del dióxido de carbono de la atmósfera para la acidificación del agua. Este gas, más conocido como el principal culpable del efecto de calentamiento global, reacciona como un ácido débil y baja el pH de la solución con cianuro. El resultado es la formación gradual de ácido cianhídrico que evapora a la atmósfera y de esta manera reduce la carga de cianuro en el agua. Si bien el resultado de esta mitigación no es la destrucción del cianuro sino la dispersión lenta de este compuesto a la atmósfera, la concentración generalmente encontrada en el aire no sobrepasa el nivel crítico para los trabajadores de 10 ppm como HCN (ver Tabla 2.1). Esta situación es diferente si se utilizan otros ácidos más fuertes para la reducción del pH que puede resultar en una emisión instantánea de ácido cianhídrico con el peligro de una intoxicación aguda de los trabajadores en el área.

Para acelerar la descomposición y evaporación de cianuro, se recomienda diseñar los pozos de almacenamiento lo más ancho posible para optimizar el contacto con el aire y con ello la velocidad de la acidificación y evaporación de cianuro. También se recomienda la instalación de agitadores mecánicos y/o de una aireación con una turbina, proporcionando oxígeno a las aguas residuales para ayudar a evaporizar y descomponer el cianuro en forma natural.

En zonas áridas con poca precipitación y altos grados de evaporación, también se puede usar pozos de evaporación donde se mantiene el agua hasta su evaporación completa.

En cuanto a la disminución de cianuro en las pilas de lixiviación, se pueden enjuagar repetitivamente con agua para lograr niveles aceptables de acidez. Sin embargo, grandes volúmenes de agua son necesarios para proceder con este tratamiento, lo que incrementa el consumo de agua (Sacher 2010).

#### **4.3.2 Tratamientos Químicos para la Descomposición de Cianuro**

Como se indicó en el párrafo anterior, la degradación natural muchas veces no es suficiente para reducir los niveles de cianuro y otras sustancias tóxicas a niveles por debajo de los LMP y/o por debajo de valores que ya no son dañinos para el ecosistema o la salud humana.

Existe una variedad de técnicas desarrolladas para la descomposición de cianuros y una discusión detallada excede el alcance del presente documento (ver por ejemplo la *Guía Ambiental para el Manejo de Cianuro*, publicado por el Subsector Minería del Ministerio de Energía y Minas (MEM 1996).

La gran mayoría de los métodos de descomposición de cianuro consiste en la oxidación química del cianuro y/o la acidificación de las soluciones conteniendo cianuro.

## 5. Típicos Impactos Ambientales causados por Cianuro

Una planta hidrometalúrgica, independiente de su tamaño, tiene un gran potencial de contaminar el medio ambiente por la emisión no controlada de cianuro, metales pesados, arsénico, sulfuros y otros contaminantes resultantes de la degradación gradual del cianuro.

En síntesis, el cianuro descargado al medio ambiente proviene de:

- Purgas periódicas para mantener la calidad de la solución de lixiviación
- Filtraciones desde las canchas de relaves y estanques de almacenamiento de soluciones con cianuro (pozas de solución gastada, pozas de solución rica, etc.)
- Purgas en el rebose de la cancha de relaves para controlar el balance total del agua del sistema
- Rebalse y colapso de pozos con soluciones de cianuro.

Entre los impactos ambientales más importantes causados por el uso de la cianuración en la pequeña minería se encuentran los siguientes:

- Contaminación de suelos, aguas subterráneas y aguas superficiales por el almacenamiento inadecuado de las colas de lixiviación, contaminadas con cianuro, sulfuros y metales pesados con arsénico.
- Contaminación de suelos, aguas subterráneas y aguas superficiales por la descarga de efluentes contaminados con cianuro y metales pesados sin control (por ejemplo de soluciones cansadas de cianuro).
- Contaminación ambiental por el inadecuado transporte, almacenamiento, manejo y disposición final de material impactado con cianuro y otras sustancias peligrosas.
- Intoxicaciones de la fauna silvestre y de ganado por falta de control de acceso a estanques con solución de cianuro.
- Contaminación del aire por la emisión de ácido cianhídrico y de polvo.
- Liberación de sustancias tóxicas luego del cierre.

Otros impactos ambientales típicos de la PM y MA, incluyendo la devastación del paisaje, contaminación de aguas superficiales por efluentes domésticos y mal manejo de residuos sólidos son discutidos en forma genérica en el documento *Estándares mínimos de Gestión Ambiental para la pequeña minería y minería artesanal*.

Debido al potencial impacto de una planta hidrometalúrgica, la selección adecuada del lugar para la instalación de las pozas de extracción, embalse de relaves, etc. no puede estar garantizada sin un estudio que considere los factores geológicos, geotécnicos, hidrológicos y geoquímicos por medio de un especialista en el campo. El diseño final debe estar presentado a la ARMA como parte de un instrumento ambiental (como es el EIA semi-detallado en el caso de plantas nuevas). La ARMA revisará el diseño y las medidas de prevención y mitigación, en coordinación con la GREM.

### 5.1 Generación de residuos

En forma general, los desechos de la minería de oro se pueden clasificar en las siguientes categorías:

1. Los desmontes (o estériles)
2. Desechos de la concentración y/o de la extracción del mineral con cianuro
3. Desechos líquidos

Cada tipo de desecho debe ser manejado de una manera adecuada ya que tiene el potencial de tener un impacto irreversible sobre el medio ambiente.

### **5.1.1 Desechos de la concentración y/o de la extracción del mineral con cianuro**

Existen diferentes tipos de desechos de la concentración y/o de la extracción del mineral con cianuro, dependiendo del proceso aplicado. Los desechos resultantes de una concentración de mineral por gravimetría o flotación no necesariamente son tóxicos, pero muchas veces pueden causar problemas de erosión hídrica y eólica. Sin embargo, en algunos procesos de la hidrometalurgia se aplican aditivos químicos para facilitar la separación (incluyendo detergentes, ácidos y hasta solventes orgánicos) que generan efluentes de proceso contaminantes que deben ser tratados antes de la descarga.

Independiente del proceso de lixiviación, el mineral lixiviado queda con una parte de la solución alcalina de cianuro, convirtiéndolo en un residuo peligroso si las concentraciones exceden niveles críticos. Dependiendo de la granulometría del mineral lixiviado, el desecho puede ser sólido o en forma de una pulpa o lodo. Para evitar una contaminación ambiental del suelo y de cuerpos de agua, se debe evitar tanto una infiltración de lixiviado al subsuelo como también cualquier contacto con cuerpos de aguas superficiales.

De facto, la estadística de accidentes ambientales de gravedad demuestra que el peligro más grande en el proceso de la lixiviación con cianuro es la rotura de un dique de colas o relaves con la liberación incontrolada de grandes cantidades de lodos contaminados con cianuro, metales pesados, amonio y sulfuros. Por lo tanto, es de suma importancia que cada instalación que acumula relaves contaminados debe cumplir con las exigencias de construcción de diques establecidas en la *Guía Ambiental para el Manejo de Relaves Mineros* y la *Guía Ambiental para el Proyecto de Lixiviación en Pilas* del MEM.

Otro problema ambiental con respecto a la disposición de relaves con concentraciones de cianuro es su frecuentemente granulometría fina, que hace que el material sea susceptible a la erosión eólica e hídrica. El resultado es una distribución de materiales contaminados por medio del aire y del agua.

### **5.1.2 Desechos líquidos**

En un proceso de lixiviación controlado, no se permite una fuga de la solución de lixiviación y se recircula la solución para su reúso. Sin embargo, en las aguas de lixiviación se forman diferentes complejos de cianuro y se concentran otros componentes no deseados, incluyendo tiocianatos, cianatos, metales pesados, metaloides, amonio o sulfuros. Estas sustancias inhiben una buena extracción del mineral y las aguas se convierten en un desecho que debe ser tratado antes de su descarga o recirculación al proceso. El hecho de que en muchos sitios estas “soluciones cansadas” no son almacenadas en diques sino son descargadas sin tratamiento a cuerpos de agua o al suelo para su infiltración, resulta una fuente importante de contaminación ambiental de esta industria. Las concentraciones de cianuro típicas de las soluciones cansadas oscilan entre los 40 miligramos y los 2000 miligramos por litro de cianuro (Logsdon et al. 1999). Considerando el LMP de 1 mg/L de cianuro total en efluentes, se requiere de un tratamiento intensivo de los desechos líquidos antes de descargarlos al ambiente. En la mayoría de los casos, un tratamiento solamente biológico no es suficiente para lograr las metas de calidad de los efluentes y se debe aplicar un tratamiento físico-químico adicionalmente para eliminar el cianuro y reducir la concentración de los metales pesados y metaloides.

## **5.2 Contaminación ambiental por fugas en estanques y tanques de lixiviación**

Un impacto importante también es la contaminación ambiental por fugas en tanques de lixiviación y más importante aún, fugas en la impermeabilización de las instalaciones de lixiviación.

En muchos sitios aplicando la lixiviación en tanques, no existe una base impermeable ni una contención secundaria que pueda retirar la solución en caso de una fuga o derrame accidental, evitando que la solución se infiltre en el suelo y contamine acuíferos.

Por otro lado, en muchas pozas de lixiviación de instalaciones pequeñas o artesanales, se utiliza para la impermeabilización láminas muy delgadas y frágiles de plástico de baja calidad. El resultado es una frecuente infiltración de soluciones de cianuro en el subsuelo con una contaminación de aguas subterráneas.

## **5.3 Inadecuada manipulación y almacenamiento de cianuro**

La inadecuada manipulación y almacenamiento de cianuro (y otras sustancias peligrosas usadas en la PM y MA) puede causar derrames de este material tóxico causando contaminación del medio ambiente e intoxicación de personas que trabajan en el área. Por esta razón, es importante establecer normas mínimas para prevenir los accidentes con cianuro y para la mitigación de los efectos en caso de una emergencia.

## **5.4 Emisión de polvo durante la pulverización del mineral y por la erosión eólica de relaves**

Los principales objetivos de la preparación del mineral para la lixiviación radican en producir un mineral suficientemente fino que permita el contacto de la solución con los metales y lograr un mineral suficientemente permeable y estable que permita una adecuada velocidad de percolación a través de la pila<sup>3</sup>. Este proceso incluye el uso de chancadoras y molinos, tanto durante el proceso de preparación del mineral como durante el manejo y almacenamiento del mineral pulverizado.

Una fuente importante de la dispersión de polvo fino es la erosión eólica de los relaves, en particular si no se toma precauciones para protegerlos del viento, como también durante el tráfico en caminos no empedrados o asfaltados.

## **5.5 Liberación de sustancias tóxicas luego del cierre**

Aún después de la conclusión de las operaciones permanecen contaminantes en los relaves y otros desechos contaminados, incluyendo cianuro no degradado, sulfuros y metales pesados como también productos de descomposición de cianuro con un potencial de dañar al ecosistema o la salud humana. Una amenaza particular es la formación de un drenaje ácido con la movilización de metales pesados, metaloides como el arsénico y sulfuro que causan la contaminación de suelos y cuerpos de agua a gran escala y por un largo tiempo.

---

<sup>3</sup> Ministerio de Energía y Minas (1996), *Guía Ambiental para el Proyecto de Lixiviación en Pilas*, Referencia de aprobación: R.D. No. 002-96-EM/DGAA.

## 6. Estándares Mínimos de Gestión Ambiental en el Uso y Manejo de Cianuro

Considerando la alta peligrosidad de las actividades hidrometalúrgicas utilizando cianuro, cada instalación debe contar con los siguientes EMGA:

1. Cada instalación hidrometalúrgica debe contar con un permiso de funcionamiento, emitido por la GREM.
2. Cada planta hidrometalúrgica trabajando con cianuro debe tener un Sistema de Gestión Ambiental y de Salud Ocupacional implementada, incluyendo como mínimo:
  - i. Procedimientos para la protección de los trabajadores (procedimientos para el manejo adecuado de cianuro y otras sustancias peligrosas, etc.).
  - ii. Inspecciones y procedimientos de mantenimiento preventivo y correctivo en el área de producción.
  - iii. Un monitoreo continuo de las medidas de prevención, mitigación y parámetros ambientales.
  - iv. Mejoramiento continuo. La implementación de una gestión ambiental y de seguridad y salud ocupacional es un proceso continuo y no termina con la obtención de la licencia de funcionamiento. En el instrumento ambiental (EIASd, IGAC, etc.) se debe definir la base para el buen funcionamiento y el mejoramiento continuo de la gestión.

Para el diseño del sistema de gestión ambiental existen diversos programas y pautas que pueden ser usados como modelos. La gran mayoría de las normas se basan en la norma ISO 14001 de la Organización Internacional para la Normalización, el Sistema de Ecogestión y Auditoría de la Comunidad Europea (EMAS) y las Directrices para Empresas Multinacionales de la Organización para la Cooperación Económica y el Desarrollo (OCED). Se recomienda en particular el documento "Manual de gestión ambiental para pequeñas y medianas empresas" de la Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUDI 2012), que presenta una estructura para la gestión ambiental adaptada a las necesidades de pequeñas empresas.

3. Cada diseño de relavera para residuos conteniendo cianuro debe ser aprobado por la GREM, la cual puede exigir un estudio geotécnico previa aprobación del diseño final. La construcción de la relavera debe estar de acuerdo con el diseño final desarrollado en este estudio.
4. Dependiendo de la ubicación y tamaño de la relavera, la GREM definirá las exigencias del estudio Geotécnico requerido. Generalmente, requerirá como mínimo los siguientes elementos:
  - i. Descripción de la geología e hidrogeología del sitio
  - ii. Análisis del riesgo sísmico y de deslizamientos/derrumbes
  - iii. Análisis del Balance de Materiales
  - iv. Análisis de la Infiltración en la Presa
  - v. Análisis de la estabilidad estática y dinámica del talud
  - vi. Análisis del Balance Hídrico
  - vii. Diseño de factibilidad de la presa de relaves
5. Para la respuesta a accidentes ocupacionales y ambientales, debe contener un Plan de Contingencias.

Para la prevención de intoxicaciones y en casos de contingencias, se debe aplicar los lineamientos establecidos por el Ministerio de Energía y Minas para Seguridad y Salud Ocupacional en la minería en el D.S. N° 055-2010-EM.

En adelante se presenta estándares mínimos específicos para la mitigación y prevención ambiental que cada empresa utilizando cianuro debe implementarse como parte de su gestión ambiental.

### **6.1 Manipulación y Almacenamiento de Cianuro**

La manipulación y almacenamiento adecuado de cianuro es punto clave para proteger a los trabajadores y al medio ambiente. Cualquier operador que trabaja con esta sustancia tóxica debe proceder teniendo en cuenta cuatro aspectos claves:

1. Las instalaciones para la descarga, almacenamiento y mezclado de cianuro deben ser diseñadas y construidas de acuerdo a prácticas de ingeniería sólida y aceptadas, además de las especificaciones técnicas del fabricante.
2. Cada operación debe tener implementado las medidas de prevención necesarias para evitar accidentes y derrames y proporcionar medios de respuesta a situaciones de emergencia.
3. Los operadores deben realizar inspecciones rutinarias y un mantenimiento preventivo de sus instalaciones de descarga, almacenamiento y mezclado. Se debe mantener registros de las inspecciones internas y del mantenimiento preventivo con la descripción de las medidas correctivas realizadas.
4. Se debe contar un Plan de Contingencias con los siguientes requerimientos mínimos (Pymex 2013, UNEP 2009):
  - i. Identificación de los riesgos principales y eventos que pueden generar emergencias en las distintas áreas de producción y entorno.
  - ii. Designación de personal de planta capacitado con una clara definición de responsabilidades en situaciones de emergencia.
  - iii. Comprometer el equipamiento y recursos para la respuesta ante emergencias.
  - iv. Definición de medidas de primeros auxilios y capacitación de personal en primeros auxilios.
  - v. Definición de procedimientos de comunicación de peligro en situaciones de emergencia en las diferentes áreas del sitio.
  - vi. Definición de actividades de mitigación y remediación en caso de una contaminación de suelos o aguas.
  - vii. Planificación de capacitaciones y simulacros.
  - viii. Procedimientos para la revisión y actualización del plan.

#### **6.1.1 Almacenamiento de Cianuro**

El diseño y construcción del lugar de almacenamiento y manejo de cianuro sólido y de soluciones de cianuro debe cumplir con las especificaciones básicas definidas en protocolos y guías nacionales o internacionales, incluyendo el D.S. 045-2013 EM, la *Guía Ambiental para el Manejo de Cianuro* y la guía *Uso y Manejo de Cianuro en la pequeña minería, Orientaciones para hacer minería*, Tomo 4 del Ministerio de Energía y Minas.

A continuación se presentan estándares mínimos para el almacenamiento de cianuro:

1. El almacenamiento debe tener un control de acceso protegido con cerco y puerta asegurada con candado, tener una debida señalización (letreros, carteles, etc.), indicando la peligrosidad del lugar y las medidas de precaución que deben seguirse;
2. El almacén debe estar ubicado en un área seca, ventilada y segura de acuerdo al instrumento de gestión ambiental aprobado.
3. Los contenedores o recipientes de cianuro y de otras sustancias peligrosas deben ser debidamente identificados, respecto al etiquetado u otro medio normalizado con el nombre comercial, científico y/o fórmula.
4. Se debe contar con “Hojas de Seguridad” de cianuro y otras sustancias almacenadas, incluyendo información sobre la peligrosidad, adecuada manipulación, medidas a tomar en contingencias y su adecuada disposición final.
5. Los recipientes que contienen cianuro no deben ser almacenados o transportados junto con alimentos, bebidas, tabaco o cualquier otro material utilizado para consumo humano. Cualquier contacto con ácidos u oxidantes (como agua oxigenada, hipoclorito de sodio, etc.), debe ser evitado al máximo, debido a que en cualquier momento pueden generar ácido cianhídrico el cual es gaseoso y altamente venenoso.
6. No se permite el uso de los tanques de almacenamiento y/o mezclado de cianuro para agua, combustible u otro material distinto.
7. El cianuro debe ser físicamente separado de sustancias peligrosas como combustibles y lubricantes. La separación debe ser realizada con bermas, muros de contención o paredes entre los contenedores que son capaces de evitar el daño de los envases en caso de un derrame o incendio.
8. Sustancias como el cianuro sólido de sodio, calcio o potasio deben ser almacenados en contenedores herméticamente cerrados. Los materiales de los contenedores deben ser de metal u otro material permitido específicamente por el fabricante.
9. Los recipientes que contienen cianuro deben ser almacenados en un lugar seco y los cilindros metálicos deben ser protegidos contra la corrosión (ej. encima de paletas de madera o parihuelas).
10. Está prohibido apilar más de 3 cilindros o contenedores, uno sobre otro, en forma vertical.
11. Debe existir un “Plan de Respuesta ante Emergencias”, y la provisión de materiales para combatir derrames, incendios y emergencias de primeros auxilios.
12. El lugar de almacenamiento y manejo de cianuro sólido y de soluciones de cianuro debe cumplir con los siguientes requisitos:
  - i. Las zonas de descarga y almacenamiento de cianuro sólido y líquido deben tener una distancia mínima de 100 metros de asentamientos humanos, áreas protegidas, bofedales o cuerpos de aguas superficiales. Debe tener una distancia mínima de 200 metros de pozos de agua potable. No se permite la construcción de un almacén en un área con peligro de ser inundado en la época de lluvias.
  - ii. El área de almacenamiento debe tener un piso de concreto u otro material resistente a álcalis, diseñado de tal manera que si se produce un derrame accidental del producto, éste puede ser contenido y eliminado con seguridad.
  - iii. Los ambientes en las que se almacena y procesa el cianuro deben contar con una buena ventilación para prevenir la acumulación de gas de ácido cianhídrico.
  - iv. En almacenes con significantes cantidades de cianuro, solamente debe entrar personal con equipo adecuado de protección personal, incluyendo una máscara de gas conteniendo un filtro para cianuro. El personal debe ser debidamente entrenado en la manipulación de cianuro y siempre acompañado de otra persona, de manera que uno pueda responder de inmediato en caso de una intoxicación.
  - v. Debe contar con una ducha para lavar los ojos en caso de una emergencia.

- vi. En el caso del almacenamiento de cianuro junto con materiales inflamables, el almacenamiento debe contar con un extintor tipo ABC con certificado vigente de inspección u otro equipo equivalente para la lucha contra incendios.
  - vii. Debe tener un techo para proteger el contenido del sol y de las lluvias.
13. En lugares donde se almacena durante más de 24 horas una cantidad mayor a 50 kg de cianuro sólido o 100 litros de solución de cianuro, se debe considerar además las siguientes medidas de seguridad:
- i. El almacén debe contar con un sistema activo de ventilación con extracción de aire. También deben tener un sistema de sensores y alarmas con una identificación de presencia de gas de cianuro de hidrógeno.
  - ii. Se debe facilitar fácil acceso a equipos de primeros auxilios y de respuesta ante emergencias, específicamente para el cianuro. Como mínimo debe contar con una ducha de emergencia e instalaciones para el lavado de ojos dentro o muy próximo al almacén.
  - iii. La planta hidrometalúrgica en donde se encuentra el almacén, debe contar con una vigilancia durante 24 horas y estar iluminado adecuadamente en caso de realizar actividades en horarios nocturnos.

### **6.1.2 Tanques de Almacenamiento y Mezclado de Cianuro**

#### Descarga, preparación o traslado de soluciones de cianuro

1. El área para la descarga, preparación o el traslado de soluciones de cianuro, debe estar emplazada sobre una superficie de concreto para impedir que las filtraciones salgan al medio ambiente.
2. La planta debe tener implementado procedimientos y sistemas para la prevención y mitigación de derrames de soluciones conteniendo cianuro. También deben existir procedimientos para la recuperación de solución escapada y la remediación de suelos contaminados.
3. Los procedimientos de preparación de soluciones de cianuro deben incluir precauciones para minimizar la generación y/o escape de gas de ácido cianhídrico, la pérdida de cianuro sólido y la limpieza de recipientes vacíos.
4. Debe existir una señalización usando etiquetas, señales u otras marcas claramente legibles, indicando la dirección del flujo en las tuberías de traslado de solución de cianuro.
5. El personal debe ser capacitado en la aplicación de los procedimientos de prevención, mitigación y emergencia y el operador debe mantener registros de esta capacitación.
6. Los procedimientos de operación de la planta y respuesta a emergencias deben permanecer accesibles para el personal en el área de trabajo.

#### Tanques de Almacenamiento y Mezclado de Cianuro

7. Cada instalación debe tener medidas de ingeniería y procedimientos que eviten la contaminación de suelos o aguas por soluciones conteniendo cianuro u otros contaminantes.
8. Todos los tanques de almacenamiento y mezclado, sistemas de contención secundario, instalaciones de manipulación de soluciones conteniendo cianuro, etc. deben ser construidos o revestidos de materiales resistentes a álcalis y con la calidad estructural necesaria para las operaciones de lixiviación, asegurando que los recipientes no se rompan ni perforen.

9. No se permite tanques de lixiviación con volúmenes por encima de 1000 litros construidos por materiales como plástico u otro material no resistente. De acuerdo a las especificaciones establecidas en la Guía Ambiental para el Manejo de Cianuro, MEM (capítulo 3.6), los tanques de almacenamiento para soluciones de cianuro con volúmenes más grandes deberían ser construidos de planchas de acero al carbón de 8 mm. En forma general, en los lugares en los que la velocidad de las soluciones no exceda el rango 1.2 a 1.5 m/s, los equipos y tanques pueden ser construidos de este material. Si la velocidad es mayor (por ejemplo durante la agitación de las soluciones), el acero al carbono se encuentra expuesta a un efecto de erosión-corrosión, por lo que se recomienda el uso de acero inoxidable 304. La GREM como autoridad competente regional debe aprobar el diseño final de cada instalación.
10. Deben existir procedimientos asegurando que la solución diluida de cianuro siempre tenga un pH por encima de 10.
11. Los tanques de almacenamiento y mezclado de cianuro deben estar ubicados encima de una superficie de concreto para prevenir la filtración al subsuelo.
12. Debe existir una contención secundaria construida por concreto, bitumen o una geomembrana con un volumen mínimo de 110% del contenedor de mayor capacidad del sistema. Cualquier geomembrana usada debe cumplir con las especificaciones mínimas establecidas en la Sección 6.2.
13. Cada instalación debe tener una señalización clara y visible, indicando el contenido de los tanques.
14. La Gestión Ambiental debe considerar inspecciones frecuentes de los tanques y otras instalaciones críticas para:
  - i. Garantizar su integridad estructural e identificar señales de corrosión y fugas (incluyendo tuberías, bombas y válvulas).
  - ii. Verificar los sistemas de contención secundaria con respecto a su integridad, presencia de fluidos, capacidad disponible, funcionamiento de sistemas de drenaje, etc.
  - iii. Verificar la integridad de pozas y diques e identificar fisuras, fugas y señales de deterioro.

El operador de la instalación debe mantener un registro de las inspecciones en el sitio de acuerdo al cronograma establecido en el instrumento ambiental (por lo menos un control trimestral), incluyendo la documentación de las inspecciones técnicas y la naturaleza de problemas y de medidas correctivas tomadas.

15. Los tanques que ya no serán utilizados para almacenar soluciones de cianuro deben ser limpiados cuidadosamente antes de su desmantelamiento o re-uso para otra actividad. Generalmente, lavándolos unas tres veces con una solución álcali con pH por encima de 10 suele ser suficiente. El agua de limpieza puede ser reutilizada para la preparación de solución de cianuro o alternativamente debe ser tratado con un oxidante o equivalente para la destrucción del cianuro.
16. Queda prohibido el re-úso de bolsas de plástico u otro material contaminado con cianuro. Antes de la disposición final de estos materiales debe realizarse una descontaminación adecuada. No se permite la descarga de agua contaminada - utilizada para la descontaminación - sin previo tratamiento para la destrucción del cianuro o su re-úso en el proceso.

### 6.1.3 Manejo de derrames de Cianuros

Se debe informar a la ARMA sobre todos los derrames de cianuro que sobrepasan 1 kg de cianuro sólido derramado y que han causado una contaminación de suelos o aguas. No es necesario informar sobre los derrames que ocurren dentro de la planta que son controlados por procesos de emergencia y son vueltos a usar durante el proceso. ARMA informará a la GREM como autoridad competente en casos de derrames por deficiencias infraestructurales.

1. Cada instalación trabajando con cianuro debe tener un procedimiento para la respuesta ante derrames de cianuro como parte de su Plan de Contingencias.
2. En caso que el cianuro sólido haya sido derramado durante su manipuleo, debe ser retirado inmediatamente con ayuda de una lampa, escoba y recogedor para devolverlo al contenedor. Si se ha ensuciado y no puede ser reutilizado, debe ser destruido mediante un proceso químico utilizando la oxidación, hidrólisis o precipitación como está descrito en detalle en la Guía Ambiental para el Manejo de Cianuro del MEM. El área debe ser limpiada con solución alcalina y el agua capturada por su respectivo tratamiento o re-uso en el proceso.
3. En lo posible, los suelos y aguas contaminados con cianuro deberían ser re-utilizados en el mismo proceso de lixiviación. En casos donde esto no es posible, se debe contratar una empresa prestadora de servicios (EPS), autorizada para la disposición final de los residuos.
4. Para la caracterización de residuos conteniendo cianuro y las alternativas para su disposición final se debe aplicar los criterios como los establecidos en la Tabla 6.1. La caracterización se basa tanto en la concentración de cianuro libre y total como en la concentración de cianuro en el lixiviado, indicando la fracción que es biodisponible y por tanto puede dañar al ecosistema.

**Tabla 6.1 Clasificación de un residuo conteniendo cianuro**

Análisis	Conc. promedia en el residuo [mg/kg]	Conc. de cianuro en el lixiviado TCLP [mg/L]	Clasificación del residuo y requerimientos para la disposición final
<b>CN libre</b>	< 70 <sup>4</sup>	nr	RNP
<b>CN total</b>	< 320	nr	
<b>CN libre</b>	70 - <300	< 3.5	RP
<b>CN total</b>	320 - <5900	< 16	
<b>CN libre</b>	70 - <300	> 3.5	
<b>CN total</b>	320 - <5900	> 16	
<b>CN libre</b>	300 – 1200	< 14	RMP
<b>CN total</b>	5900–23,600	< 64	
<b>CN libre</b>	300 – 1200	> 14	
<b>CN total</b>	5900–23,600	> 64	
<b>CN libre</b>	> 1200	nr	
<b>CN total</b>	> 23,600	nr	

nr = no requerido; RNP=residuo no peligroso (puede ser depositado en relleno sanitario común); RP=residuo peligroso (requiere disposición en relleno especial con control de lixiviados); RMP=residuo muy peligroso (requiere disposición en relleno especial con control de lixiviados, luego de una estabilización química o física)

<sup>4</sup> Según D.S. 002-2008 MINAM, el ECA para suelos agrícolas, residenciales y parques es 0.9 mg/kg y para suelos en zonas comerciales, industriales y extractivos 8 mg/kg. Debe considerarse estos ECAs para la disposición en áreas no asignados como relleno sanitario con control de lixiviados.

Debe aclararse que un suelo contaminado se convierte en un residuo una vez que ha sido retirado. Debe ser clasificado de acuerdo a las concentraciones establecidas en la Tabla 6.1, considerando tanto las concentraciones de CN libre como de CN total. Cualquier material excediendo concentraciones críticas de cianuro libre y/o total en el residuo o lixiviado causa un potencial peligro para el ecosistema y la salud humana y se recomienda depositarlo en un área donde el lixiviado esté controlado, como es por ejemplo la pila de lixiviación.

## **6.2 Uso de Geomembranas**

En los procesos de lixiviación con cianuro utilizados por la pequeña minería, existen diferentes métodos de la impermeabilización de las pilas de lixiviación, los diques o pilas de contención y los depósitos de solución. Aparte del uso de concreto y bitumen, laminados de plástico y geomembranas son el material más usado para el revestimiento de suelos, depósito de sólidos, captación, contención y conducción de líquidos. En la práctica, lamentablemente, las pequeñas empresas, muchas veces tienen una deficiencia en la impermeabilización. El resultado es una contaminación del suelo y aguas subterráneas con sustancias tóxicas por fugas incontroladas.

La capa impermeable primaria en una pila de lixiviación cumple diversos propósitos: confina los lixiviados para su recolección y protege al subsuelo y a los mantos freáticos de ser contaminados. En las pilas o depósitos de la minería grande y mediana, usualmente se utilizan las geomembranas en capas dobles junto con un geotextil en forma de una malla de polietileno de HDPE, con orificios en forma de diamante (geonet o geodren). Estos son utilizados para dar más estabilidad a la geomembrana.

Las geomembranas son productos Geosintéticos en forma laminar, continua y flexible. Son utilizadas como barrera impermeable de líquidos conteniendo sustancias tóxicas o corrosivas en proyectos ambientales o de ingeniería civil. Las geomembranas son fabricadas a base de diversos polímeros, incluyendo los resistentes contra soluciones muy básicas y conteniendo cianuro como el polietileno (HDPE - LLDPE), polivinil cloruro (PVC) y polipropileno (PP). Las geomembranas más comunes son hechas de PVC y HDPE, las cuales poseen propiedades mecánicas apropiadas, alta resistencia física, resistencia contra temperaturas bajas, gran inercia química, aislamiento eléctrico alto y estabilidad a agentes biológicos (como hongos y bacterias).

La selección de una geomembrana adecuada requiere la consideración de factores como el tamaño, topografía y geología del área que se requiere cubrir, las condiciones climáticas, costo de la membrana (incluyendo la instalación), entre otras. Lamentablemente, por falta de conocimientos y también por los costos de una inversión en una impermeabilización adecuada, en la práctica pequeñas empresas utilizan frecuentemente láminas plásticas muy delgadas y frágiles, con muy baja resistencia a la rotura, radiación UV o temperaturas extremas. El resultado es un alto riesgo de una contaminación de suelos y aguas por cianuro derramado.

Es por esta razón que la autoridad ambiental ve la necesidad de regular las características mínimas de las geomembranas utilizadas en procesos hidrometalúrgicos. Tanto en nuevas instalaciones como en antiguas, las geomembranas deben tener las siguientes características mínimas:

1. Todas las pozas de proceso conteniendo agua contaminada, lodos o relaves formando lixiviado, deben tener un revestimiento como mínimo una geomembrana sintética u otro material adecuado permitido explícitamente por la GREM como autoridad competente.
2. La geomembrana debe ser instalada encima de un relleno de tierra compactada con las siguientes características:

- i. Debe estar libre de objetos cortantes que puedan perforar la geomembrana cuando hay presión de agua (por ej. piedras, rocas, espinas, pedazos de metal, etc).
  - ii. Cuando el subsuelo es arenoso o rocoso con una permeabilidad por encima de aproximadamente  $10^{-6} \text{ cm}^2$ , se debe preparar una base compactada de unos 15 a 30 cm de espesor, usando material tipo arcillas, arcillas limosas, arcillas migajosas, migajon-limosos o suelos con semejantes características. La inadecuada preparación de los cimientos traerá como resultado un asentamiento diferencial, comprometiendo la integridad de los revestimientos.
  - iii. En áreas con una precipitación promedio anual por encima de unos 200 mm<sup>5</sup> y/o en pendientes con peligro de escorrentías en época de lluvias, debe tener un sistema de drenaje pluvial para el control y colección de aguas superficiales.
3. El material de la geomembrana elegida debe ser resistente a soluciones altamente alcalinas conteniendo cianuro, amonio y sulfuros. No se recomienda utilizar membranas muy reforzadas por su baja flexibilidad ni polímeros como policarbonatos, poliamidas (nylon) o poliéster por su baja resistencia química.
4. La geomembrana debe cumplir con los siguientes estándares mínimos de calidad, de acuerdo a normas internacionalmente aceptadas (ver Anexo 1):
  - i. El espesor de la membrana no debe ser menor a 1 mm ("40 mil"), medido según Norma Peruana NTP 339.512 – 2000 o norma equivalente.
  - ii. Para el uso en alturas por encima de 4000 msnm, la geomembrana debe soportar temperaturas de 25 grados bajo cero sin volverse frágil ("low temperature brittleness").
  - iii. La geomembrana debe ser protegida contra la radiación UV, conteniendo por ejemplo carbón microdisperso en una concentración entre 2 y 4%. La calidad de la dispersión debe tener la categoría 1-2, según la norma ASTM D5596 (o equivalente).
  - iv. Dependiendo del material usado, flexibilidad, resistencia al desgarramiento, punzonamiento y rotura de la geomembrana, debe cumplir con las características mínimas de estabilidad, de acuerdo a lo establecido en el Anexo 1.
5. El despliegue y en particular la soldadura de las uniones debe ser realizada por personal capacitado, de acuerdo a las características del material usado.

### **6.3 Criterios mínimos para el diseño de pozas de lixiviación**

1. Cada poza o estanque de proceso debe tener una impermeabilización con geomembrana u otro método adecuado (ver Sección 6.2 para las características mínimas de geomembranas).
2. En áreas donde el agua subterránea se encuentra a menos de 5 metros en cualquier momento del año, se debe instalar un sistema de drenaje por debajo de la geomembrana para recuperar infiltraciones de lixiviados.
3. Debe realizarse un balance hídrico de la planta, quiere decir el balance del agua que entra y que sale mediante decantación/recuperación, descarga, evaporación o infiltración. Debe considerarse en el equilibrio hídrico de la planta la cantidad de precipitación que puede ingresar a un estanque o dique, proveniente de una escorrentía desde una cuenca gradiente arriba.

---

<sup>5</sup> Como ejemplo, en promedio la precipitación total acumulada anual en la ciudad de Arequipa es de 194 mm.

4. Para la preparación del balance hídrico, se debe considerar eventos atípicos con precipitaciones muy altas que fueron medidas en la zona. Si hay datos meteorológicos disponibles, se recomienda usar la cantidad de precipitaciones durante 24 horas en el peor evento de tormenta en los últimos 50 a 100 años<sup>6,7</sup>.
5. En zonas con peligro de escorrentías en la época de lluvias (especialmente en estanques instalados en pendientes), debe instalarse un sistema de drenaje alrededor de los estanques para evitar el desbordamiento con una liberación del contenido tóxico. Para definir si el sitio necesita un sistema de drenajes, se debe considerar aspectos como datos meteorológicos (cantidad de precipitaciones), porosidad del suelo, inclinación del terreno, etc. Una discusión detallada sobre el diseño de sistemas de drenaje se encuentra en el Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC). En lugares donde existe nevada debe considerarse en los cálculos el posible descongelamiento abrupto del depósito de nieve con el resultado de un flujo intenso durante el deshielo. En forma genérica, se puede decir que en cada zona con una precipitación promedio anual mayor a unos 200 mm y/o ubicada en un área de riesgo de ingreso de escorrentías de aguas superficiales a la poza se requiere un sistema de drenaje para aguas pluviales.
6. Cada poza debe tener un francobordo diseñado en base de las condiciones climáticas de la zona y al balance hídrico, considerando eventos atípicos con precipitaciones extremas observadas en la zona. Si se encuentra datos meteorológicos disponibles, se recomienda usar la cantidad de precipitaciones durante 24 horas en el peor evento de tormenta en los últimos 100 años. Si no se cuenta con datos meteorológicos, debe considerarse supuestos o ajustes conservadores, basándose en observaciones de la población y de zonas con condiciones climáticas parecidas donde se cuenta con información más detallada. Por razones de seguridad y para considerar posibles variaciones en almacenamiento de relaves, en ninguna circunstancia (tampoco en zonas desérticas), el francobordo debe tener menos de 50 cm de altura.
7. Se debe implementar medidas para proteger la fauna y el ganado de la zona de intoxicaciones por las soluciones del proceso de cianuración. Como concentración crítica con consecuencias fatales para aves y otros animales se consideran unos 50 mg/L de cianuro WAD.

#### **6.4 Descargas de efluentes**

Cada instalación debe implementar un programa de monitoreo de la calidad de los efluentes, descargados al suelo o a cuerpos de aguas superficiales o subterráneas.

Según el D.S. 010-2010-MINAM y el DS N° 002-2008-MINAM, la concentración de cianuro no debe exceder 1 mg/L como cianuro total en efluentes y 0.022 mg/L como cianuro libre en el cuerpo receptor. Además del cianuro total (LMP) y libre (ECA), se debe considerar el cumplimiento con otros contaminantes potencialmente presentes, incluyendo metales pesados (cadmio, cobre, hierro, plomo, mercurio, zinc), arsénico, Sólidos Totales en Suspensión y el pH. Debe tenerse en cuenta la potencial presencia de productos tóxicos de descomposición de cianuro como son el cianato, tiocianato, sulfuro, amoníaco, nitrato, entre otros.

---

<sup>6</sup> Como ejemplo, el francobordo de una poza instalada en la cercanía a la ciudad de Arequipa debería tener una altura suficiente para aguantar una lluvia de 123 Litros por metro cuadrado, evento histórico observado el Sábado 09 de Febrero del año 2013.

<sup>7</sup> Arequipa soportó ayer lluvia histórica, Peru 21, Sábado 09 de febrero del 2013, <http://peru21.pe/actualidad/arequipa-soporto-ayer-lluvia-historica-2116581>

Para nitrógeno amoniacal y sulfuros se han establecido LMP de efluentes para alcantarillado y para aguas superficiales de las actividades de cemento, cerveza, papel y curtiembre y para emisiones de los hornos de la industria cementera (D.S. N° 003-2002-PRODUCE). Para cianato y tiocianato no existen LMP ni ECA en el Perú. Los LMP para nitrógeno amoniacal y sulfuros son resumidos en la Tabla 6.2:

**Tabla 6.2: LMP de nitrógeno amoniacal y sulfuros en efluentes**

<b>LMP [mg/L]</b>	
<b>Nitrógeno amoniacal</b>	30
<b>Sulfuros</b>	3

Si bien el control de estas sustancias no está regido por el D.S. 010-2010-MINAM, la ARMA puede exigir la inclusión de nitrógeno amoniacal y sulfuros en el programa de control de efluentes de instalaciones usando cianuro en el punto de descarga, debido a que estas sustancias son producto de la descomposición natural de cianuro y son nocivas para la vida acuática y la fauna silvestre. El monitoreo de cianato y tiocianato no es obligatorio por no ser parámetros implementados por la mayoría de los laboratorios ambientales y de la ausencia de LMP legalmente establecidos.

La potencial formación de complejos solubles entre el mercurio y el cianuro genera un problema particular durante el uso de relaves contaminados con mercurio. Por lo tanto, el operador de la planta de lixiviación debe asegurar que los efluentes de la planta no excedan el valor de 0.002 mg/L de mercurio total, establecido como LMP en el D.S. 010-2010-MINAM. Debido a las dificultades de remover mercurio de efluentes hasta niveles legalmente aceptables, se recomienda no procesar relaves que tengan concentraciones de mercurio por encima de 50 mg/kg para evitar este problema.

## 7. Bibliografía

- [1] ACGIH (1998). *Valores Límite de Umbral e Índices de Exposición Biológica - Valores límite de Umbral para las sustancias químicas y los agentes físicos*; <http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp8-c8.pdf>
- [2] Birch K.M. y Schütz F. (1946). *Actions of Cyanate*, Brit. J. Pharmacol.1, pp. 186-193.
- [3] CDC (2006). Departamento de Salud y Servicios Humanos, EEUU, *Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades*; <http://emergency.cdc.gov/agent/cyanide/basics/espanol/facts.asp>
- [4] Coles, C.A., Cochrane, K. (2006). *Mercury Cyanide Contamination of Groundwater from Gold Mining and Prospects for Removal*, Sea to Sky Geotechnique; <http://www.engr.mun.ca/~ccoles/Publications/0227-231.pdf>
- [5] Dauchy, J.W., Waller, W.T. y Piwoni M.D. (1980). *Acute Toxicity of Cyanate to Daphnia magna*, Bull. Environm. Contam. Toxicol. 25, pp. 194-196.
- [6] Dzombak, D.A., Ghosh, R.S., and Wong-Chong, G.M. (2006). *Cyanide in Water and Soil: Chemistry, Risk, and Management*, Taylor & Francis/CRC Press, Boca Raton, FL., p. 8.
- [7] Eisler, Ronald (1991). *Cyanide Hazards to Fish, Wildlife, and Invertebrates: A Synoptic Review-U.S.*, Fish Wildl. Serv., Biol. Rep. 85(1.23).
- [8] Logsdon, M.J., Hagelstein, K. y Mudder T.I. (1999). *The Management of Cyanide in Gold Extraction: International Council on Metals and the Environment*, Ottawa, Canada, pp. 40.
- [9] Logsdon, M. J., Hagelstein, K. y Mudder, T. (2001). *El Manejo de Cianuro en la Extracción de Oro*, The International Council on Metals and the Environment, ISBN 1-895720-35-4; [http://www.caem.com.ar/wp-content/uploads/EI%20Manejo%20del%20cianuro%20\(ICMM\).pdf](http://www.caem.com.ar/wp-content/uploads/EI%20Manejo%20del%20cianuro%20(ICMM).pdf)
- [10] Miller, J. D., Alfaro E., Misra, M. y Lorengo, J. (1996). *Mercury Control in the Cyanidation of Gold Ores*, Pollution Prevention for Process Engineering: Proceedings of Technical Solutions for Pollution Prevention, Engineering Foundation, New York, NY, USA.
- [11] Ministerio de Energía y Minas (1996). *Guía Ambiental para el Manejo de Cianuro*, Subsector Minería, Volumen XIII, Referencia de aprobación: R.D. No. 025-96-EM/DGAA; (<http://intranet2.minem.gob.pe/web/archivos/dgaam/publicaciones/normastecnicas/GUIA%20DGAA M%2013.pdf>).
- [12] MSHA (1997). *Controlling Mercury Hazards in Gold Mining, A Best Practices Toolbox*, U.S. Department of Labor Mine Safety and Health Administration; [www.msha.gov/](http://www.msha.gov/)
- [13] MTC, Ministerio de Transportes y Comunicaciones, *Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje*; [http://transparencia.mtc.gob.pe/idm\\_docs/normas\\_legales/1\\_0\\_2950.pdf](http://transparencia.mtc.gob.pe/idm_docs/normas_legales/1_0_2950.pdf)
- [14] NSW EPA (2009). *Waste Classification Guidelines Part 1: Classifying Waste*, ISBN 978 1 74232 507 1.
- [15] ONUDI (2012). Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial, *Manual de gestión ambiental para pequeñas y medianas empresas*. Centro Nacional de Producción más

limpia; [http://www.digeca.go.cr/documentos/prodmaslimpia/Manual%20de% 20Gestion%20 Ambiental%20pymes2.pdf](http://www.digeca.go.cr/documentos/prodmaslimpia/Manual%20de%20Gestion%20Ambiental%20pymes2.pdf)

[16] PAN Pesticides Database (2010). *Chemicals, Sodium Thiocyanate*; Kegley, S.E., Hill, B.R., Orme S., Choi A.H., Pesticide Action Network, North America (San Francisco, CA); [http://www.pesticideinfo.org/Detail\\_Chemical.jsp?Rec\\_Id=PC34438](http://www.pesticideinfo.org/Detail_Chemical.jsp?Rec_Id=PC34438)

[17] Pymex (2013). *Cómo crear un plan de contingencia y emergencias para tu empresa, Pequeños y Medianos Empresarios (Pymex)*; <http://pymex.pe/liderazgo/capacitacion/como-crear-un-plan-de-contingencia-y-emergencias-para-tu-empresa-parte-1>

[18] Sacher, W. (2010). *Cianuro, la cara tóxica del oro, Una introducción al uso del cianuro en la explotación del oro*, Observatorio de Conflictos Mineros de America Latina, OCMAL; <http://www.conflictosmineros.net/>

[19] UNEP (2009). *Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente Medio Ambiente por el desarrollo*; <http://www.pnuma.org/eficienciarecursos/APELLIntroduccion.php>

[20] Villavicencio Velasco, C. (2011). *Evaluación de la Capacidad degradatoria de cepas bacterianas nativos de efluentes cianurados*, Tesis de Pre-grado, Universidad Nacional de San Agustín (Arequipa).

## ANEXO 1 – Normas de Calidad de Geomembranas

Especificaciones Mínimas de Geomembranas<sup>8</sup>

Propiedad	Norma <sup>1)</sup>	Material de la Geomembrana			
		HDPE	LLDPE	PVC	PP
Alargamiento a la rotura [%]	ASTM D6693	100	350	400	600
Resistencia al desgarramiento [lb]	ASTM D1004	28	22	10.5	11
Resistencia al punzonamiento [lb]	ASTM D4833	60	44	<sup>2)</sup>	35
Resistencia a la rotura [lb/in]	ASTM D6392	80	53	77	45
Espesor nominal mínimo [mm]	NTP 339.512 – 2000	1	1	1	1

1) o norma equivalente

2) no especificado

### Normas Nacionales e Internacionales para la Caracterización de Geomembranas

1. Norma Peruana NTP 339.512 – 2000, GEOSINTETICOS: Método de ensayo estándar para medir el espesor nominal de geotextiles y geomembranas.
2. Natural Resources Conservation Service, Conservation Practice Standard: Pond Sealing or Lining – Flexible Membrane, Code No. 521<sup>a</sup>, [http://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE\\_DOCUMENTS/stelprdb1046899.pdf](http://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb1046899.pdf)
3. Natural Resources Conservation Service, Material Specification 594 – Flexible Membrane Liner, National Standard Material Specifications, Part 642, National Engineering Handbook, [http://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE\\_DOCUMENTS/nrcs143\\_026254.pdf](http://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs143_026254.pdf)
4. GRI Test Method GM13, Standard Specification for “Test Methods, Test Properties and Testing Frequency for High Density Polyethylene (HDPE) Smooth and Textured Geomembranes” (<http://www.geosynthetic-institute.org/grispecs/gm13.pdf>)
5. ASTM D7238 – 06 (2012), Standard Test Method for Effect of Exposure of Unreinforced Polyolefin Geomembrane Using Fluorescent UV Condensation Apparatus
6. ASTM D4355 – 07 (2007), Standard Test Method for Deterioration of Geotextiles by Exposure to Light, Moisture and Heat in a Xenon Arc Type Apparatus
7. ASTM D4491-99a (2009), Standard Test Methods for Water Permeability of Geotextiles by Permittivity
8. ASTM D3786-13 (2013), Standard Test Method for Bursting Strength of Textile Fabrics— Diaphragm Bursting Strength Tester Method
9. ASTM D4632-08 (2008) Standard Test Method for Grab Breaking Load and Elongation of Geotextiles
10. ASTM D4533-11 (2011), Standard Test Method for Trapezoid Tearing Strength of Geotextiles
11. ASTM D4833 -07 (2007), Standard Test Method for Index Puncture Resistance of Geomembranes and Related Products

<sup>8</sup> Adaptados de: Natural Resources Conservation Service, Material Specification 594 – Flexible Membrane Liner, National Standard Material Specifications, Part 642, National Engineering Handbook, [http://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE\\_DOCUMENTS/nrcs143\\_026254.pdf](http://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs143_026254.pdf)

12. ASTM D4751-12 (2012), Standard Test Method for Determining Apparent Opening Size of a Geotextile
13. ASTM D6693 – 04 (2010), Standard Test Method for Determining Tensile Properties of Nonreinforced Polyethylene and Nonreinforced Flexible Polypropylene Geomembrane.