



Facultad de Ingeniería y Computación

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

“ANÁLISIS DE LOS MÉTODOS DE DEGRADACIÓN DE CIANURO

EN LOS RELAVES GENERADOS POR LAS MINERAS AURÍFERAS”

Trabajo de investigación presentado por los

alumnos de la Escuela Profesional de

Ingeniería Industrial:

Fiorella Angela Capatinta Hachire

Alfredo Eduardo Cardenas Medina

Para optar el grado académico de Bachiller

en Ingeniería Industrial

Asesor: Mg. Gozzali Bolena Delgado Rojas

AREQUIPA, 2020

**Análisis de los métodos de degradación de cianuro en los relaves
generados por las mineras auríferas**

**Analysis of cyanide degradation methods in tailings generated by
gold miners.**

Dedicatoria

Dedicado a nuestros padres quienes cultivaron nuestros valores y nos brindaron su apoyo incondicional a lo largo de este camino.

Agradecimientos

A Dios por ser nuestro guía, a nuestros docentes quienes, con su experiencia, conocimiento y motivación nos orientaron en la investigación.

Resumen

La minería es considerada uno de los sectores más importantes para la economía peruana; sin embargo, también es una de las fuentes más contaminantes para el medio ambiente, ocasionando una creciente preocupación por la disposición final de estos efluentes, en especial el cianuro, el cual es considerado como uno de los más perjudiciales. En la actualidad existen estudios sobre la tratabilidad del cianuro en los relaves, no obstante, no se ha extendido su aplicación, ni se ha definido un método óptimo.

Por consiguiente, en la presente investigación se efectúa una revisión bibliográfica de las técnicas de tratamiento del cianuro por medio de la oxidación química; ya que este tipo de tratamiento es el más conocido y empleado por las diferentes minas alrededor del mundo debido a la facilidad en su implementación, el bajo costo que representa para las industrias y la gran efectividad que poseen al degradar los relaves generados por las minas de oro.

La importancia de esta investigación es evidenciar lo beneficioso que resultaría la aplicación de estas técnicas para minimizar el impacto ambiental en los ecosistemas y comunidades adyacentes a las actividades de extracción. A través de las técnicas para la degradación del cianuro definidas dentro de la presente investigación se elaboró una matriz comparativa considerando como variables principales: el porcentaje de remoción del cianuro, la necesidad de un tratamiento adicional y sus respectivas ventajas y desventajas; mediante las cuales se logró establecer el método más idóneo para su aplicación y desarrollo en las mineras auríferas y empresas a fines.

Como resultado se determinó que el método de oxidación con ácido de Caro es el más efectivo, debido a su elevada velocidad de oxidación sin la necesidad de utilizar catalizadores de cobre durante su proceso; por otro lado, no produce gases contaminantes que impliquen un riesgo medioambiental y no requiere de un tratamiento adicional debido a que la degradación del 98% está dentro de los límites máximos permisibles dados por el Ministerio de Energía y Minas.

Palabras clave

Aurífero, cianuro, degradación, relave, métodos.

Abstract

Mining is considered one of the most important sectors for the Peruvian economy; however, it is also one of the most polluting sources for the environment, causing growing concern about the final disposal of these effluents, especially cyanide, which is considered one of the most harmful. Currently there are studies on the treatability of cyanide in tailings, however, its application has not been extended, nor has an optimal method been defined. Therefore, in the present investigation a bibliographical review of the cyanide treatment techniques is carried out by means of chemical oxidation; since this type of treatment is the best known and used by the different mines around the world due to the ease in its implementation, the low cost it represents for the industries and the great effectiveness they have when degrading the tailings generated by the gold miners. The importance of this research is to demonstrate how beneficial the application of these techniques would be to reduce the environmental impact on the ecosystems and communities adjacent to the extraction activities.

Through the techniques for cyanide degradation defined within the present investigation, a comparative matrix was developed considering the main variables: the percentage of cyanide removal, the need for additional treatment and their respective advantages and disadvantages; through which it was possible to establish the most suitable method for its application and development in gold mining companies and businesses.

As a result it was determined that the oxidation method with Caro acid is the most effective, due to its high oxidation rate without the need to use copper catalysts during its process; on the other hand, it does not produce polluting gases that imply an environmental risk and does not require additional treatment because the 98% degradation meets the maximum permissible limits set by the Ministry of Energy and Mines

Key words

Gold, cyanide, degradation, tailings, methods.

Índice General

| | |
|--|----|
| Resumen..... | iv |
| Abstract..... | v |
| CAPÍTULO 1: Introducción | 5 |
| 1. Planteamiento del Problema | 5 |
| 1.1. Descripción del Problema | 5 |
| 1.2. Formulación del Problema | 6 |
| 1.3. Sistematización del Problema | 6 |
| 2. Objetivos de la Investigación..... | 6 |
| 2.1. Objetivo General..... | 6 |
| 2.2. Objetivos Específicos..... | 7 |
| 3. Justificación de la Investigación | 7 |
| 3.1. Conveniencia..... | 7 |
| 3.2. Justificación Teórica | 7 |
| 3.3. Justificación Metodológica | 8 |
| 3.4. Justificación Práctica | 8 |
| 4. Delimitación de la Investigación | 8 |
| 4.1. Temporal..... | 8 |
| 4.2. Temática..... | 8 |
| CAPÍTULO 2: Aspectos Metodológicos | 10 |
| 5. Tipo de estudio..... | 10 |
| 6. Método de investigación..... | 10 |
| 6.1. Ventajas..... | 10 |
| 6.2. Desventajas | 10 |
| 6.3. Limitaciones..... | 10 |
| 7. Fuentes para la recolección de información..... | 11 |

| | | |
|---------------------------------------|--|----|
| 8. | Tratamiento de la información..... | 14 |
| CAPÍTULO 3: Marco de Referencia | | 19 |
| 9. | Estado del Arte..... | 19 |
| 9.1. | Investigaciones Internacionales | 19 |
| 9.2. | Investigaciones Nacionales | 21 |
| 9.3. | Investigaciones Locales | 22 |
| 10. | Marco Teórico - Conceptual | 23 |
| 10.1. | Cianuro..... | 23 |
| 10.2. | Tipos de lixiviación..... | 25 |
| 10.2.1. | Lixiviación en botaderos | 25 |
| 10.2.2. | Lixiviación en pilas | 25 |
| 10.2.3. | Lixiviación en bateas | 26 |
| 10.2.4. | Lixiviación in situ | 26 |
| 10.3. | Degradación del cianuro | 26 |
| 10.3.1. | Técnicas de tratamiento para la oxidación del cianuro..... | 27 |
| 10.3.1.1. | Tratamiento con H ₂ O ₂ (Peróxido de hidrogeno)..... | 27 |
| 10.3.1.2. | Tratamiento con UV-H ₂ O ₂ | 30 |
| 10.3.1.3. | Tratamiento con O ₃ | 31 |
| 10.3.1.4. | Tratamiento por Cloración | 33 |
| 10.3.1.5. | Proceso INCO (SO ₂ /Aire) | 34 |
| 10.3.1.6. | Tratamiento con “Ácido de Caro” | 35 |
| 10.4. | Oro | 35 |
| 10.4.1. | Métodos de extracción..... | 35 |
| 10.4.2. | Proceso de Lixiviación | 36 |
| 10.4.3. | Agentes Lixiviantes | 38 |
| 10.5. | Generación de residuos en mineras..... | 39 |
| 10.5.1. | Residuos de la extracción de mineral a través del cianuro | 39 |

| | | |
|--|---|----|
| 10.5.2. | Residuos líquidos..... | 40 |
| 10.6. | Impactos del cianuro sobre la salud y el medio ambiente | 41 |
| 10.6.1. | Toxicidad en Seres Humanos | 41 |
| 10.6.2. | Eco toxicidad de Cianuro | 42 |
| CAPÍTULO 4: Resultados y Conclusiones..... | | 43 |
| 11. | Resultados | 43 |
| 12. | Conclusiones y Recomendaciones | 46 |
| 12.1. | Conclusiones | 46 |
| 12.2. | Recomendaciones | 47 |
| 13. | Referencias Bibliográficas | 49 |
| 14. | Anexos | 52 |

Índice de Tablas

| | |
|---------------|----|
| Tabla 1. | 11 |
| Tabla 2. | 13 |
| Tabla 3. | 14 |
| Tabla 4. | 44 |

Índice de Figuras

| | |
|--|----|
| <i>Figura 1.</i> Gráfico circular del porcentaje de participación de las fuentes de información..... | 12 |
| <i>Figura 2.</i> Grafica de barras de la cantidad de publicaciones por países..... | 13 |
| <i>Figura 3.</i> Proceso del Peróxido de hidrógeno. | 28 |
| <i>Figura 4.</i> Diagrama de Bloques del proceso de lixiviación con cianuro..... | 37 |

CAPÍTULO 1: Introducción

1. Planteamiento del Problema

1.1. Descripción del Problema

A lo largo del tiempo, la minería ha sido considerada un factor fundamental para la economía peruana; tal como lo expone la última encuesta mundial del U.S. Geological Survey (USGS) realizada en el 2018, Perú se mantuvo sexto en la producción de oro, proporcionando un 4.4%, reflejado en 142.6 TMF de la producción mundial; sin embargo, la minería también es considerada como el sector más contaminante, principalmente por la disposición de sus residuos durante la extracción del mineral. La extracción de oro a través de la lixiviación con cianuro es una de las técnicas más utilizadas debido a su alto rendimiento y bajo costo; no obstante, este involucra la generación de numerosos pozos de extracción repletos de relaves con una alta toxicidad, que a la larga terminan ocasionando grandes daños ambientales, como las variaciones en el régimen hídrico del suelo, la presencia de partículas sólidas en las corrientes de agua, la eliminación de la vegetación en zonas circundantes y principalmente, afecta la calidad de vida de las comunidades aledañas y la salud de las personas.

A causa de la alta toxicidad de este componente, su uso es controversial, de tal manera que recientemente, han ocurrido más de 30 percances críticos causados por el derrame de relaves cianurados, en tan sólo las últimas dos décadas; como el caso de la mina de oro Bala Mare, que dio lugar a la peor catástrofe ambiental en Europa, derramando alrededor de 100 000 metros cúbicos de residuos cianurados.

Considerando los numerosos accidentes vinculados al uso del cianuro es que el Parlamento Europeo afirma: “No existe ninguna garantía real de que no se vuelva a producir un accidente semejante, especialmente teniendo en cuenta el incremento de

las condiciones meteorológicas extremas, como se prevé en el Cuarto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.” (Resolución (RC-B7-0238/2010), 2010). De tal manera en que varios estados alrededor del mundo, se ha prohibido o limitado la lixiviación con cianuro (Alemania, Argentina, Costa Rica, Filipinas, Grecia, República Checa, Unión Europea, Turquía y Estados Unidos), debido a que este puede tener un impacto irreversible en la diversidad biológica, de esta forma es que nace una creciente preocupación mundial por la disposición final de los residuos de este proceso.

Actualmente existen investigaciones sobre la degradación del cianuro en los relaves, incluso se han aplicado estas metodologías en minas de Canadá, Estados Unidos y Australia, obteniendo buenos resultados, sin embargo, no se ha extendido su aplicación, ni se ha definido un método óptimo.

1.2. Formulación del Problema

¿Cuál es el mejor método para la tratabilidad de los relaves cianurados originados por la lixiviación de oro?

1.3. Sistematización del Problema

- ¿Cuáles son los métodos más usados para la degradación del cianuro?
- ¿En qué consiste el proceso que sigue cada método de oxidación química recopilado?
- ¿En qué se diferencian los distintos métodos investigados?
- ¿Qué método será el más adecuado para la degradación del cianuro presente en los efluentes de las mineras de oro?

2. Objetivos de la Investigación

2.1. Objetivo General

Identificar el mejor método para la tratabilidad de los relaves cianurados originados por el proceso de lixiviación en los efluentes de las mineras auríferas.

2.2. Objetivos Específicos

- Recopilar información de los métodos más usados para la degradación del cianuro.
- Desarrollar el proceso que sigue cada método de oxidación química recopilado.
- Comparar las características de los métodos investigados a través de una matriz integrada.
- Seleccionar el método más adecuado para la degradación del cianuro a través de oxidación química.

3. Justificación de la Investigación

3.1. Conveniencia

Hoy en día, en el Perú se han dado varios casos en los que la minería ha tenido un impacto ambiental crónico, debido a la alta emisión de residuos químicos, polvos, gases tóxicos y la destrucción que deja a su paso consecuencias irreversibles en nuestro ecosistema.

Dada la presente problemática que afecta el bienestar de la sociedad, es que a través de esta investigación se busca disminuir el impacto ambiental en las regiones cercanas a las minas mediante la identificación del método óptimo para la degradación del cianuro.

3.2. Justificación Teórica

La presente investigación tiene como fin, brindar el conocimiento referente a los métodos más eficientes para la tratabilidad de relaves de cianuro dentro de la industria aurífera, cabe mencionar que existe información referida, pero ninguna desarrollada a través de un enfoque industrial. La investigación presente dará las bases teóricas para

próximas investigaciones donde se quieran aplicar de manera práctica cada metodología.

3.3. Justificación Metodológica

Para la realización de esta investigación se consultaron libros, revistas científicas y artículos de investigación encontradas en bases de datos académicas como Base, SciELO y Google Académico, así como bases especializadas en ciencias como Scopus y World Wide Science, utilizando palabras clave como “Cyanide”, “Tratability”, “Environment” y que no tuvieran una antigüedad mayor a cinco años, esto debido a que nuestra investigación se basa en metodologías modernas y datos que fueron tomados de estudios recientes. La investigación presente servirá como base para próximas tesis de posgrado en donde se desee comprobar la aplicación de cada una de las metodologías descritas o en investigaciones donde se desee buscar nuevas alternativas metodológicas.

3.4. Justificación Práctica

Los resultados obtenidos permitirán asentar las bases sobre los diversos métodos de reducción de este componente, de manera que da lugar a estudios futuros centrados en la viabilidad de la aplicación de este método, sobre todo en las minas de América Latina; y posteriormente la posible formulación de un proyecto de implementación de este proceso con el objetivo de generar un menor impacto ambiental a comparación de los métodos convencionales que son utilizados hoy en día.

4. Delimitación de la Investigación

4.1. Temporal

La investigación se efectuó en el periodo 2019-I, teniendo como fecha de inicio el 3 de octubre durante el curso de Taller de Investigación I.

4.2. Temática

La investigación pertenece al campo de Ingeniería Industrial enfocado en el área de Medio Ambiente, este se hizo a través de la revisión de libros, revistas científicas y artículos de investigación.

CAPÍTULO 2: Aspectos Metodológicos

5. Tipo de estudio

El tipo de investigación que se considera en la presente investigación es de carácter cualitativo, debido a que se realiza un análisis de la información ya existente, como por ejemplo la comparación del grado de complejidad en la aplicación de cada metodología.

6. Método de investigación

Se efectuó una revisión bibliográfica en la que se utilizaron instrumentos como el análisis bibliométrico para conocer los datos significativos sobre tema de investigación, a través del seguimiento de artículos científicos, trabajos de grado y tesis, así como identificar el tipo de publicación científica más frecuente en el tratamiento de relaves cianurados en la actualidad.

6.1. Ventajas

Se utilizó el análisis bibliométrico para facilitar la clasificación de la información, de manera en que solo se tomó en cuenta para el desarrollo de esta investigación aquellos artículos recientes, debido a que los últimos métodos investigados generalmente son más eficientes que los usados convencionalmente.

6.2. Desventajas

Algunas de las publicaciones encontradas no cuentan con una fecha de publicación definida, lo cual no permitió su uso para el desarrollo de esta investigación, a pesar de la importancia de la información hallada.

6.3. Limitaciones

Solo se pudo efectuar el análisis bibliométrico de aquellas publicaciones encontradas en bases de datos con acceso libre lo cual limitó el alcance de la investigación.

Por otro lado, la terminología que se emplea en las fuentes investigadas es muy técnica lo cual dificulta su entendimiento.

7. Fuentes para la recolección de información

El tema elegido para la investigación es el análisis de los métodos de degradación de cianuro en los relaves generados por las mineras auríferas. Inicialmente, no se determinaron las palabras adecuadas para la búsqueda; por lo cual a medida que avanzó la investigación y mediante la consulta a expertos, se logró establecer como palabras clave para el estudio de nuestro tema: aurífero, cianuro, degradación, relave y métodos.

Tabla 1.

Cantidad de publicaciones por fuente

| Fuentes | Cantidad de Publicaciones |
|------------------|----------------------------------|
| Base | 6 |
| SciELO | 7 |
| Scopus | 2 |
| World Wide | 1 |
| Science | |
| Google Académico | 14 |
| Total | 30 |

Elaboración Propia

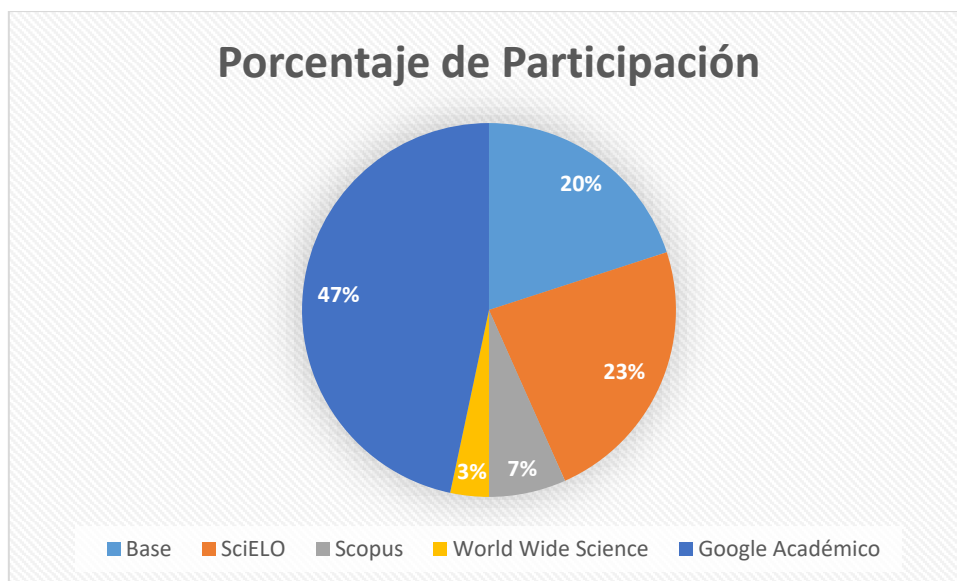


Figura 1. Gráfico circular del porcentaje de participación de las fuentes de información.

Elaboración Propia.

Para el levantamiento de información se empleó como principal fuente de información Google Académico debido a que es la base de datos con mayor cantidad de tesis fuertemente relacionadas al tema de investigación, en segundo lugar, se utilizó SciELO y Base ya que son las fuentes de búsqueda con gran cantidad en artículos científicos.

También se consideraron dos motores de búsqueda extras como Scopus y World Wide Science aunque se encontraron artículos limitados.

Luego de identificar las bases de datos, se utilizaron las palabras clave definidas anteriormente, de tal manera que se comenzó la exploración de información con las palabras clave: reducción, residuo y cianuro, obteniendo inicialmente una cantidad significativa de información superficial, no obstante, al emplear los términos: tratamiento y degradación se logró encontrar información más precisa y esencial para nuestro tema.

A través de todos los pasos definidos anteriormente se logró filtrar aquellos artículos relevantes para el presente tema, en la siguiente tabla se puede apreciar la procedencia de las fuentes empleadas para la investigación, lo que nos permite apreciar que los países con mayor investigación relacionada son Colombia y Perú.

Tabla 2.

Cantidad de publicaciones por país

| País | Cantidad |
|-------------|-----------------|
| Perú | 10 |
| Ecuador | 3 |
| EE.UU. | 1 |
| Indonesia | 1 |
| Colombia | 8 |
| España | 7 |
| Argentina | 1 |
| Chile | 1 |
| México | 2 |
| Total | 34 |

Elaboración Propia



Figura 2. Grafica de barras de la cantidad de publicaciones por países.

Elaboración Propia

8. Tratamiento de la información

Para la presente investigación fue necesario la identificación de las principales publicaciones científicas en donde se encontró artículos basados en los principales temas, abarcados entre los años 2014 a 2018 con respecto a los diferentes métodos de tratabilidad del cianuro en los relaves mineros, sobre todo en la aplicación práctica de estas metodologías y el impacto que tienen en el medio ambiente.

Se han encontrado propuestas de métodos experimentales que no son aplicados en el sector minero actualmente, sin embargo, se ha demostrado su efectividad a nivel teórico en un laboratorio. Para verificar la relevancia de cada uno de los artículos, fue necesario dar lectura al resumen y analizar la proximidad de este a nuestro tema, por otro lado, se observaron las conclusiones para verificar la afinidad con el objeto de estudio.

Tabla 3.

Recopilación del año, lugar, autor, palabras clave y nombre de las publicaciones utilizadas

| Nro. | Año | Lugar | Autor | Palabras Clave | Nombre |
|-------------|------------|--------------|-------------------------------------|---|---|
| 1 | 2018 | Perú | Mendoza L. | Ambiental, etapa, ejecución, gestión, herramienta, industria minera, mina | Evaluación de las Herramientas de Gestión Ambiental para la prevención de impactos ambientales en la industria minera. |
| 2 | 2010 | Ecuador | Sacher W. | Ambiental, cianuro, oro, minería, impacto, toxicidad, lixiviación. | Cianuro, La cara tóxica del oro. Una introducción al uso del cianuro en la explotación del oro. |
| 3 | 2014 | EE.UU. | Díaz F. | Mercurio, abastecimiento de agua, minería, contaminación del agua, salud pública. | Mercurio en la minería del oro: impacto en las fuentes hídricas destinadas para consumo humano. |
| 4 | 2009 | Indonesia | Hidayati N. & Juhaeti T. & Syarif F | Fito extracción, contaminantes, cianuro, mercurio. | Contaminaciones de mercurio y cianuro en el entorno de la mina de oro y posible solución de limpieza mediante fito extracción |

| | | | | | |
|----|------|-----------|---|---|--|
| 5 | 2014 | Perú | Eppers O. | Lixiviación, Minería, Cianuro, practicas, ambiental, residuos. | Buenas Prácticas de Gestión Ambiental para Plantas Hidrometalúrgica de la pequeña minería y minería artesanal que utilizan Cianuro |
| 6 | 2017 | Perú | MINEM | Cielo Abierto, Minería, Medidas, ambiental, impacto, calidad. | Medidas Ambientales en el Marco IGAFOM |
| 7 | 2016 | Perú | Rupay F. | Destrucción, Cianuración, Oxidación. | Remoción del Cianuro con el complejo (CuSO4-H2O2) de los efluentes de cianuración de oro para evitar riesgos a la salud y al ambiente. |
| 8 | 2012 | Colombia | Moncada M. | Impactos, Hídricos, Biota, Perturbaciones. | Vista general de la actividad minera y sus impactos. |
| 9 | 2013 | Colombia | Guerrero J. | Tisular, Enzimas, Toxicidad, Reactivo, Relave, Soluciones. | Cianuro: Toxicidad y Destrucción Biológica |
| 10 | 2007 | España | Fernández B. | Detoxificación, Reutilización, Reciclado, Reactivo, Volatización, Oxidación | Desarrollo de un nuevo método para la eliminación de cianuro de aguas residuales de mina. |
| 11 | 2004 | Argentina | Departamento de pastoral social de la diócesis de San Carlos de Bariloche | Estériles, Desertificación, Desintegración, Lixiviación. | La minería del oro a cielo abierto utilizando la lixiviación con cianuro |
| 12 | 2012 | Chile | Vargas J. | Lixiviación, Metalúrgica, Afluentes, Antiaglutinante. | Estudio ambiental y optimización en la extracción del oro utilizando el cianuro. |
| 13 | 2015 | Perú | Lannacone J | Toxicidad, Toxicología, Degradación, Efluentes. | Evaluación de la toxicidad letal media por exposición a cianuro libre en efluentes y relaves mineros utilizando los biomodelos <i>Brachydanio erio</i> Y <i>Eisenia andrei</i> . |
| 14 | 2011 | México | Guía para la Acción Comunitaria | Transtorno, Hidrográfico, Cúmulo, Lixiviación. | Proyectos de ley para la prohibición de uso de cianuro de sodio en la minería. |

| | | | | | |
|----|------|----------|---|--|---|
| 15 | 2014 | Ecuador | Jumbo Pacheco, X., & Nieto Monteros, D. | Biodegradación, cianuro libre, consorcio microbiano, peróxido de hidrógeno. | Tratamiento químico y biológico de efluentes mineros cianurados a escala laboratorio |
| 16 | 2017 | España | Machaca D. & Yana P. | Cianuro, remoción, toxicidad, fotocátalisis, oxidantes | Remoción de Cianuro de Aguas Residuales Minero Metalúrgicos por proceso de Oxidación Avanzada y Fotocátalisis Solar |
| 17 | 2016 | Perú | Pomalaza B. | Efluente, Remoción, Oxidación. | Remoción del Cianuro de Efluentes minero-metalúrgicos por oxidación química con el ácido de caro |
| 18 | 2007 | España | Fernández B. | Cianuro, Minería, método, Permanganato Potásico. | Desarrollo de un nuevo método para la eliminación de cianuro de aguas residuales de mina |
| 19 | 2010 | México | Fajardo, J., Burbano, D., Burnbano, E., Apraez, N., & Moreano, M. | Cyanide, removal, cyanide, residual sand, gold mining. | Estudio de métodos químicos de remoción de cianuro presente en residuos de cianuración provenientes del proceso de extracción de oro de veta en el departamento de Nariño |
| 20 | 2015 | Colombia | Cardona E. | Cianuro, degradación, bacterias, minería de oro, microorganismos. | Microorganismos Potenciales degradadores de Cianuro en residuos de minería de oro |
| 21 | 2015 | Ecuador | Olarte B. | Cianuro, Tiourea, Peróxido de Hidrógeno, Espectrofotometría UVVISIBILE | Tratamiento de residuos líquidos mineros, aplicando peróxido de hidrógeno en la empresa minera Franromec. |
| 22 | 2012 | España | Gómez P. | Soluciones, Efluente, Factible, Tratamiento, Implicación, Sostenibilidad. | Degradación de Cianuros mediante Oxidación Química en Efluentes Industriales. |
| 23 | 2014 | Colombia | López I. | Fitoextracción, Fitoestabilización, Fitoimmobilización, Fitovolatilización, Fitodegradación. | Alternativas de disposición para la fitorremediación de suelos contaminados por actividades mineras. |
| 24 | 2018 | Colombia | Gordillo M. | Degradación, Oxidación, Precipitación, Adsorción, | Biodegradación de cianuro en aguas y suelos contaminados por la minería de oro. |

| | | | | | |
|----|------|----------|-------------------------|---|---|
| | | | | Acidificación, Quelación, Evaporación. | |
| 25 | 2015 | Perú | Pérez A. | Relaves, efluentes líquidos, fotocátalisis, procesos de oxidación avanzada, catalizadores, dióxido de titanio, reactor tubular. | Evaluación de la factibilidad técnica para el tratamiento de relaves con cianuro aplicando el método de oxidación avanzada con radiación UV-Solar a nivel de la pequeña minería aurífera. |
| 26 | 2018 | Perú | Gutierrez S. | Cepas, reactivo, solución, complejo, degradación, metabólico, enzimas. | Evaluación de la capacidad degradadora de cianuro por bacterias aisladas de ambientes mineros de la provincia de Candarave, región de Tacna |
| 27 | 2013 | Perú | Carrión M. | Saccharomyces cerevisiae, soporte, lixiviado de mineral, oro, plata, cianuro. | Capacidad de Saccharomyces cerevisiae como soporte para biosorber oro, plata y cianuro en lixiviado de mineral |
| 28 | 2015 | Colombia | Gaviria A.; Meza L. | Cianuro, peróxido de hidrogeno, hipoclorito, ácido de caro. | Análisis de alternativas para la degradación de cianuro en efluentes líquidos y sólidos del municipio de Segovia. |
| 29 | 2016 | España | Garcés M. | Cianuro. Biodegradación. Consortio. Microorganismos | Aislamiento de consorcio de microorganismos degradadores de cianuro. |
| 30 | 2011 | España | Deloya A. | Microorganismos autóctonos, medio protector, liofilización, lixiviación, consorcio de microorganismos, biorremediación. | Tratamiento de desechos del cianuro por biorremediación |
| 31 | 2014 | Colombia | Lozada J. y Arends E | Impacto ambiental, minería, oro, bosque tropical, Imataca. | Aspectos ambientales de los diferentes tipos de minería de oro, desarrollados en la reserva forestal Imataca. |

| | | | | | |
|----|------|----------|----------------------------|--|--|
| 32 | 2014 | Perú | Tuya J. | Cianuro, efluentes mineros, bacterias alcalófilas, biodegradación, Pseudomonas, Chromobacterium. | Evaluación de la capacidad degradativa de cianuro por bacterias alcalófilas aisladas de los relaves de la planta concentradora de metales Mesapata Cátac – Ancash. |
| 33 | 2010 | Colombia | Fajardo J. | Cianuro, remoción, cianuración, arenas residuales, minería del oro. | Estudio de métodos químicos de remoción de cianuro presente en residuos de cianuración provenientes del proceso de extracción de oro de veta en el departamento de Nariño. |
| 34 | 2016 | España | Castrillón V. y Navarro L. | Biotecnología, metales pesados, amalgamación, metilmercurio, contaminación, macrófito. | Evaluación de la Fitorremediación como Alternativa para el Tratamiento de Aguas Residuales Contaminadas con Mercurio Producto de la Minería Aurífera (artesanal y pequeña escala). |

Elaboración Propia

CAPÍTULO 3: Marco de Referencia

Dentro de este capítulo se desarrollan los conceptos básicos que permiten el entendimiento de esta investigación.

9. Estado del Arte

Se estableció referencias, en base a artículos científicos, papers, libros y una serie de tesis, detalladas a continuación:

9.1. Investigaciones Internacionales

- En el 2016, en la Universidad Nacional Abierta y a Distancia, fue presentada la tesis **“Evaluación de la Fitorremediación como alternativa para el tratamiento de aguas residuales contaminadas con mercurio como producto de la minería aurífera (artesanal y pequeña escala) (Castrillón V. & Navarro L. , 2016)”** el cual tiene como objeto la evaluación a partir de una revisión bibliográfica de la fitorremediación como una opción para la tratabilidad de relaves contaminados generados por la minería aurífera; la investigación tomó como referente a la minería en el Municipio de Marmato en Caldas; en la cual, la situación problemática planteada se basa en la fuente significativa de contaminación generada por los procesos de las minas de oro como el amalgamiento, donde se separa y extrae el oro de las rocas a través del uso del mercurio.

A partir de esta problemática, se han planteado diversas metodologías para reducir los daños que produce este componente en el medio ambiente, por lo cual, se hizo un enfoque en el análisis de la fitorremediación como una posible opción a través de una revisión bibliográfica, la presentación de los tipos de fitorremediación aplicables a la fecha y la exposición de aquellas especies utilizables durante la fitorremediación, así como su eficiencia para la tratabilidad de relaves.

Como resultado del estudio se pudo identificar el control deficiente sobre los relaves mineros, y como el mejor tratamiento de fitorremediación se escogió la *Elodea* debido a su eficiente nivel de absorción de los contaminantes que se encontraron en aguas residuales.

- En el año 2015, se presentó en la Universidad Nacional de Colombia la tesis **“Análisis de alternativas para la degradación del cianuro en efluentes líquidos y sólidos del municipio de Segovia, Antioquia** (Gaviria A. & Meza L., 2015)”, con el objetivo de determinar la cantidad adecuada de cada uno de los reactivos, los tiempos requeridos y condiciones de pH, de manera que se logre reducir la toxicidad del cianuro hasta niveles seguros y con ello establecer una comparación con las demás alternativas tratadas.

Para la tratabilidad a través de hipoclorito de sodio se determinó que se necesita de 12.5 kg NaOCl/kg CN en un tiempo de 40 minutos para alcanzar el 0.2 ppm de concentración permisible. Para el proceso de oxidación a través de peróxido de hidrógeno se necesita de 3.5 kg H₂O₂/kg CN un tiempo de 2.5 horas para alcanzar el límite de concentración deseado. Al combinar los tratamientos con hipoclorito de sodio con peróxido de hidrógeno se estableció que se debe mezclar 2.5 kg H₂O₂/kg CN con 5 kg NaOCl/kg CN en un tiempo de 20 minutos para llegar al punto de concentración objetivo.

A través de este estudio se pudo llegar a la conclusión de que los efluentes sólidos y líquidos generados en las mineras auríferas de las localidades de Segovia y Remedios contienen altas concentraciones de cianuro en comparación con los estándares permisibles, lo cual permitió visualizar el estado actual de las aguas y suelos de la región y darnos cuenta de la necesidad de poner en práctica métodos de degradación de cianuro. Con el fin de mitigar esta situación y reducir la

concentración del cianuro hasta los límites permisibles, es que se efectuó el análisis de la efectividad de tres métodos propuestos, obteniendo que las alternativas más viables, desde un punto de vista económico, serían la combinación de H₂O₂ y NaOCl y el peróxido de hidrógeno, descartando el uso del hipoclorito de sodio por su alto costo; desde un punto de vista ambiental, el peróxido de hidrógeno resulta en la alternativa más viable, debido a su alta efectividad en la degradación de cianuro a diferencia del hipoclorito de sodio que genera residuos contaminantes para la vida acuática.

9.2. Investigaciones Nacionales

- Otra investigación importante a considerar fue la tesis presentada en el año 2015 en la Universidad Nacional de Colombia, “**Microorganismos Potenciales degradadores de Cianuro en residuos de minería de oro**” (Cardona, 2015) donde se evalúa el proceso de la biorremediación a través del uso de residuos contaminados con cianuro como resultado de la actividad minera, para determinar la efectividad de microorganismos degradadores como una alternativa, a través de la utilización de especies vegetales.

Para el desarrollo de esta investigación, se aisló las bacterias de residuos generados por la minería aurífera, para proceder con los experimentos in vitro y en suelo bajo para la degradación del cianuro. Como resultado se identificó bacterias idóneas que dan cabida para una efectiva degradación de cianuro en condiciones in vitro, no obstante, no se obtuvieron buenos resultados con respecto a la biorremediación por plantas y bacterias.

Adicionalmente, este estudio refleja la importancia de continuar la investigación de nuevas metodologías para tratar de mitigar este gran impacto ambiental causado por el sector minero.

- En el 2016, en la Universidad Nacional del Centro del Perú, se presentó la tesis **“Remoción de cianuro de efluentes minero-metalúrgicos por oxidación química con el ácido caro (Pomalaza, 2016)”**, el cual tiene por objeto reducir a un nivel adecuado la alta concentración de cianuro de los relaves ocasionados en la Planta Piloto Metalúrgica de Yauris, a través de la oxidación química con el ácido de Caro.

Al realizar las pruebas de degradación con el ácido de caro, se logró reducir a una velocidad significativa la concentración de cianuro por debajo de los límites permisibles (0.7 mg/l).

Como se evidencia en los resultados, la alternativa propuesta de remoción de cianuro mediante el ácido caro es el recomendado por su alto grado de eficiencia y por su fácil y económica aplicación que este método requiere.

9.3. Investigaciones Locales

- (Rupay, 2016). Describe en su tesis titulada **“Remoción del cianuro con el complejo (CuSO₄ – H₂O₂) de los efluentes de cianuración de oro para evitar riesgos a la salud y al ambiente”** en la cual parte con la premisa, que la contaminación del agua, aire y suelo es causada en gran medida por las actividades de las mineras auríferas, que generan grandes cantidades de cianuro de sodio y otras sustancias.

Debido a lo cual, se plantea como objetivo la degradación de la concentración de cianuro en los efluentes, a límites permisibles, a través de pruebas piloto realizadas en el área de Hidrometalurgia en la Planta Piloto de Yauris; con la hipótesis inicial, que al emplear el complejo (CuSO₄ – H₂O₂) por oxidación química para la remoción del cianuro, se logra la efectiva degradación de este.

El método de investigación consta en estructurar un plan para establecer relaciones de causa-efecto a la acción de variables experimentales para así poder comparar los resultados a través de las técnicas de procesamiento de datos ANOVA y Excel.

- Como resultado de la caracterización de los efluentes cianurados, se obtuvo el valor de 102 mg/l de cianuro, el cual está sobrepasando los límites máximos permisibles, por lo que es imprescindible la aplicación de otra metodología a fin de reducir esta concentración, evitando riesgos a la salud y al ambiente. En la tesis titulada **“Evaluación de las herramientas de gestión ambiental para la prevención de impactos ambientales en la industria minera”** el autor evalúa la utilización de distintas herramientas de gestión ambiental con el fin de controlar la problemática actual que ocasiona el sector minero en el ecosistema y en las comunidades cercanas.

Como resultado de la aplicación de estas herramientas se evalúan los impactos ambientales y posibles controles que se deben efectuar dentro de tres escenarios: presente, futuro y de emergencia, con el fin de minimizar el efecto que tiene el ambiente las diversas operaciones mineras.

10. Marco Teórico - Conceptual

10.1. Cianuro

El componente CN es un grupo químico que consta de dos átomos, uno de nitrógeno y otro de carbono, estos están unidos por tres enlaces.

Adicionalmente, hay una cantidad significativa de compuestos con este grupo químico, a los cuales se les denomina cianuro.

El cianuro está presente tanto en el estado natural como artificial, como por ejemplo algunos compuestos que han sido fabricados por el hombre son: el

cianuro de sodio, cianuro de hidrógeno, entre otros; cuya toxicidad es demasiado alta.

Por otro lado, se ha determinado que hay más de dos mil fuentes de cianuro, en las que cada una de estas cuentan con un grado de toxicidad variable y un determinado grado de complejidad. (Logsdon M. & Hagelstein K. & Mudder T., 1999). Por otro lado, este componente también está presente en varias plantas comestibles con una cantidad sumamente baja, sin embargo, el consumo excesivo de estos (en especial la yuca) puede causar graves enfermedades a largo plazo. (Gutiérrez, 2010)

La reactividad del cianuro es significativamente mayor a comparación de otros, esto debido a que este tiene carga negativa y alta disponibilidad de sus electrones; adicionalmente, tiene la capacidad de unirse con varios tipos de elementos químicos como el azufre, compuestos a base de carbono orgánico y organismos vivientes. (Sacher, 2010)

Adicionalmente, el cianuro establece enlaces con casi todos los metales (oro, cobre, zinc, mercurio, hierro, etc.) de esta manera forma complejos metal-cianuro, los cuales son considerablemente solubles en agua. Esta es la propiedad más importante para el sector minero, pues permite la extracción de metales como el oro y plata. Sin embargo, su aplicación no solo se limita en este sector, sino que también en otros como el del plástico, fertilizante, herbicidas, colorantes y la farmacéutica. (Moran, 2010)

10.2. Tipos de lixiviación

10.2.1. Lixiviación en botaderos

Este tipo de lixiviación es empleado para la tratabilidad de lastres, desmontes o sobrecargas de minas, debido a las bajas leyes que regulan su actividad.

10.2.2. Lixiviación en pilas

Mediante este proceso se logra obtener oro, a través de la disolución del mineral utilizando agua y ácido sulfúrico, la obtención del mineral se describe a detalle a continuación.

Mientras se traslada el material chancado hacia el lugar designado para formar la pila, se debe irrigar con una solución compuesta por ácido sulfúrico y agua, también conocido como la actividad de curado. Una vez localizado en el lugar designado para la formación de la pila, el material es descargado a través de un esparcidor, el cual lo va ubicando cuidadosamente, de tal manera, que se forma un terraplén continuo de siete metros de altura aproximadamente, en otras palabras, la pila de lixiviación. (Cárdenas, Díaz, Guajardo, & Oliva, 2019)

Finalmente se procede a instalar en la pila de lixiviación, un sistema de riego por goteo el cual abarca toda la zona comprendida. Previamente, se establece una membrana impermeable bajo las pilas de material a lixiviar, en ella se cuenta con un sistema de drenes que posibilitan la recolección de las soluciones que se introducen en el material.

(Cárdenas, Díaz, Guajardo, & Oliva, 2019)

10.2.3. Lixiviación en bateas

También llamado lixiviación por percoloración, se basa en el depósito del mineral, anteriormente chancado, dentro de un molde de hormigón con forma de paralelepípedo, el cual cuenta con un fondo falso de madera, recubierto con una tela filtrante que posibilita la recirculación de la solución, para finalmente ser cubierto con soluciones de lixiviación hasta el 50% o 75% de su volumen.

Para el uso de este tratamiento se debe disponer de una serie de bateas conectadas entre sí, de manera que se eleva el contenido del metal de interés y los relaves puedan ser enviados directamente a un proceso de recuperación.

La aplicación de esta metodología proporciona mayor velocidad al ejecutar el proceso de lixiviación, además de permitir el tratamiento de volúmenes considerables de minerales, aunque solamente para aquellos con una cinética de disolución muy rápida.

10.2.4. Lixiviación in situ

Radica en la lixiviación de desechos fragmentados abandonados, donde se aplica la solución directamente al cuerpo mineralizado.

10.3. Degradación del cianuro

Al momento de separar el oro de la solución con cianuro, este queda falto de metal, pero sigue presentando cianuro, el cual debe ser reducido; para lograr esto, industrias químicas y mineras han logrado enormes avances en torno al manejo de estas soluciones, de forma que no afecten a la salud o al medio ambiente. Para la presente investigación abarcaremos el tratamiento de estos

residuos a través de diferentes procesos de oxidación química, por ser los más conocidos y empleados en las industrias auríferas.

10.3.1. Técnicas de tratamiento para la oxidación del cianuro

10.3.1.1. Tratamiento con H₂O₂ (Peróxido de hidrogeno)

Este componente es conocido por ser un poderoso oxidante, su aplicación se ha ido extendiendo a lo largo de las décadas, de manera que actualmente es utilizado por una cantidad considerable de instalaciones metalúrgicas alrededor del mundo, sobre todo en tratamientos de relaves cianurados.

Este reactivo es comúnmente comercializado en contenedores de 1m³ con una concentración mayor al 70% en H₂O₂. Normalmente el pH natural del efluente cianurado es de 10, y es aquí donde la reacción de oxidación tiene lugar, logrando la oxidación de metales como el cobre y el zinc, permitiendo así la precipitación de los hidróxidos correspondientes. (Pomalaza, 2016)

Si bien los ferrocianuros no son oxidados, estos se precipitan en modo de sales de metal insoluble, al mismo tiempo que los precipitados de hidróxido, logrando la formación del cianato el cual se hidroliza espontáneamente formando ión carbonato e ión amonio, y por último toda la cantidad residual de oxidante se descompone generando oxígeno. (Pomalaza, 2016) El proceso que sigue el peróxido de hidrógeno se muestra en la *ilustración 1*.

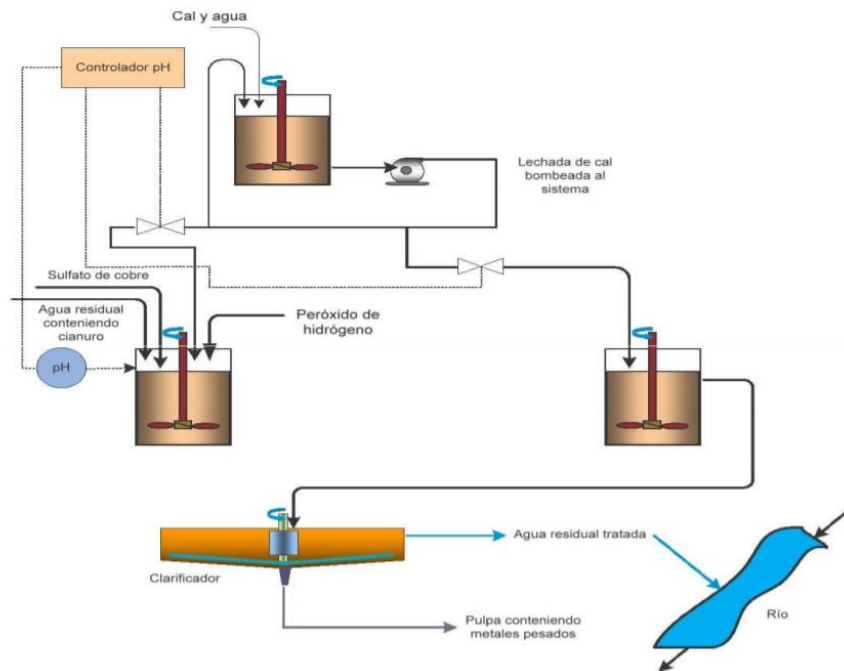


Figura 3. Proceso del Peróxido de hidrógeno.

Fuente: (Young C. & Jordan T., 1995)

Por otro lado, el tiocianato no se oxida, reflejando una ventaja con respecto a las plantas productivas donde no requieren de este seguimiento, evitando así el consumo desmesurado de este reactivo, sin embargo, en las industrias que requieran la eliminación del tiocianato será necesario procesos oxidativos más radicales.

El proceso de oxidación se efectúa en tanques expuestos y a pesar que la reacción sea homogénea es necesario la agitación para obtener una óptima combinación del efluente y oxidante, evitando así el almacenamiento de precipitados en los tanques. (Gómez, 2012)

Se necesita de 1,31 gramos de agua por gramo de Cianuro oxidado, a pesar que actualmente se requieren de 2 a 8 gramos de agua por gramo de cianuro puro oxidado. (Gómez, 2012)

La reacción cinética de oxidación es fuertemente influenciada por pequeñas concentraciones de iones de Cobre (10-20 mg/l) que se comportan como catalizadores. Por lo tanto, es usado generalmente para el tratamiento de efluentes que presentan iones de cobre en solución, superando los 20 mg/l. En falta de dichos iones, disminuye la rapidez de la reacción de oxidación, requiriendo una mayor cantidad de agua para aumentar la velocidad del proceso o bien agregarlos en forma de CuSO_4 . (Pomalaza, 2016) No obstante, la reacción sería mucho más lenta, de modo que en este caso se debería considerar la aplicación del método UV-foto activación, tratamiento por Ácido de Caro o Hipoclorito.

or consiguiente, podemos enumerar las siguientes ventajas asociadas a la aplicación de este método:

- El costo del capital requerido es considerablemente menor a los utilizados en otros procedimientos químicos.
- La metodología es un tanto sencilla de diseño y funcionamiento.
- A través de este método es posible la reducción de una cantidad significativa de todas las formas de cianuro a cantidades ambientalmente aceptables.
- A través de la precipitación se pueden reducir notablemente los metales.
- La flexibilidad del proceso permite adaptarlo a procedimientos tanto continuos, como discontinuos.
- Se ha demostrado su aplicación eficiente tanto en laboratorios como a escala industrial.

- La aplicación de la metodología no genera cantidades apreciables de lodo residual y no genera cantidades significativas de sólidos disueltos.

En contraste, las desventajas encontradas son:

- El consumo y costo exagerado de peróxido de hidrogeno y sulfato de cobre como reactivos.
- El método no suprime el tiocianato y el amoniaco.
- El cianuro no es recuperado.

10.3.1.2. Tratamiento con UV-H₂O₂

(Quispe, Arteaga, & Cardenas, 2011) encontró lo siguiente: La eliminación de cianuro a través de la radiación de H₂O₂ implica que a medida que se va incrementando esta cantidad, la remoción del cianuro sigue el mismo efecto, dando como resultado una alta reducción de cianuro hasta una concentración de 0.5% de H₂O₂; mientras la proporción de H₂O₂ sea mayor, el cambio de la concentración de CN es menor.

Adicionalmente, de acuerdo con Venkatadri R. y Peters R.W., el uso de este tratamiento (H₂O₂ foto activado) es aplicado generalmente para la destrucción de cianuro y otros disolventes orgánicos.

El proceso se describe de la siguiente manera: la irradiación de H₂O₂ con luz ultravioleta (frecuencia del rango de 254 nm), ocasiona el fraccionamiento de esta molécula, dando lugar a la formación de radicales libres OH; estos a su vez de poseer una elevada movilidad en el medio acuoso, tienen un elevado potencial de oxidación y son muy

reactivos, así logrando oxidar todos los compuestos de cianuro.

(Pomalaza, 2016)

Siendo así, esta metodología tiene una gran efectividad, la cual solo requiere de H_2O_2 , sin embargo, estas son las desventajas asociadas a este método:

- Actualmente el proceso continúa todavía en desarrollo, pues no hay ninguna instalación que lo ponga en funcionamiento.
- El proceso es lento.
- Su aplicación requiere de foto activadores y es preferible emplearlo en soluciones claras, ya que, de ser el caso contrario, las partículas absorberán la radiación, reduciendo así la intensidad.
- La precipitación de los sólidos que se desarrolla en el proceso, disminuye considerablemente su eficiencia. (Chatwin T., 1989)
Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, las condiciones óptimas para la aplicación de este método tendría lugar en balsas de contención situadas en regiones con una elevada irradiación solar (preferiblemente a largo del año) y estar a una profundidad menor a 50 cm, de esta forma no se reduce la efectividad de este.

10.3.1.3. Tratamiento con O₃

Una nueva posibilidad para el tratamiento de residuos cianurados es el ozono, este método llega a lograr la degradación completa de tiocianatos, cianuros y cianatos. Además, no requiere almacenamientos

de reactivos como otros métodos citados y consecuentemente tiene un bajo nivel de mantenimiento.

El costo de aplicación de este método ha ido disminuyendo conforme el aumento de su utilización durante el tiempo, sin embargo, la inexistencia de investigaciones acerca de la cinética y los mecanismos necesarios para la reacción de oxidación han reducido su utilización.

(Smith A. & Mudder T., 1991)

Para este método el compuesto a utilizar es una combinación de ozono y oxígeno, este último solo en un volumen del 3%, de tal forma que juntos tienen una gran capacidad oxidante al ser introducido en forma de burbujas en una solución acuosa. Pues requiere de un contacto eficiente para garantizar el óptimo traspaso de masa a la solución a tratar, ya que el O_3 cuenta con una baja solubilidad en agua. (Pomalaza, 2016)

De acuerdo con la literatura revisada, el consumo teórico de ozono para la total oxidación del cianuro es de 1,85 gramos de ozono por gramo de cianuro. Las cantidades actuales están en un intervalo de 3-6 gramos de O_3 por gramo de cianuro oxidado, por lo que es necesario mantener un control del pH, debido a que los iones hidronio pueden descomponer el ozono ocasionando una pérdida de efectividad en la oxidación.

Actualmente se está priorizando la investigación del tratamiento con ozono y fotólisis asistida de manera conjunta, ya que estos intensifican la potencia de la oxidación, logrando minimizar el consumo de este, el cual es costoso.

Las aplicaciones de ambos métodos resultan ser uno de los más efectivos en la degradación de cianuro y sus derivados; alcanzando así concentraciones de residuos de cianuro menores a 0,1 mg/l que partían de soluciones que contenían entre 1 y 100.000 mg/l (Garrison et al, 1975; Heltz et al, 1994).

10.3.1.4. Tratamiento por Cloración

En el pasado la oxidación por cloración fue un tratamiento muy empleado, sin embargo, hoy en día este ha sido reemplazado por otros métodos alternativos debido a que el empleo de este es costoso; pues si bien la metodología es muy eficiente, logrando reducir el cianuro a cantidades mínimas, este requiere de una cantidad significativa de reactivos, por lo que no lo hace rentable.

El uso teórico de cloro para oxidar el cianuro a cianato es de 2.73 gramos de Cl_2 por gramo de CN oxidado, en la práctica es de 3 a 8 gramos de Cl_2 por gramo de CN oxidado. (Pomalaza, 2016)

Los pasos que sigue este método se explica a continuación: en la fase inicial, el cianuro se transforma en Cloruro de Cianógeno y posteriormente, este último se hidroliza formando cianato, el cual se hidroliza a amonio a través de una reacción catalítica. (Gómez, 2012)

Algunas limitaciones a considerar para su aplicación son las siguientes:

- Si bien el tratamiento por cloración puede degradar el cianuro, cianato y amonio, este provoca un consumo muy elevado de cloro al oxidar el tiocianato.

- Su aplicación generalmente se basa en soluciones, debido a que, con lechadas, se requiere un consumo mayor del reactivo.

(Young C. & Jordan T., 1995)

El empleo de este método para cianuro libre sólo logra la eliminación de cantidades poco significativas de cianuro de hierro, este resultado varía según la presencia de otros metales.

10.3.1.5. Proceso INCO (SO₂/Aire)

Este proceso tiene lugar en un tanque de detoxificación, dentro del cual se realiza la inyección de una combinación de aire y dióxido de azufre, que velozmente oxidan el cianuro presente en las soluciones residuales, con la ayuda del catalizador de iones de cobre. Para realizar la oxidación primero, se añaden entre 30 y 90 gramos de ion de cobre (Cu₂₊) /tonelada de solución, luego pasa a la inyección por burbujas de la mezcla dióxido de azufre (SO₂) /aire, para finalmente ser completada con la adición del metal bisulfito de sodio (Young C. & Jordan T., 1995).

Durante el proceso hay que tener en cuenta principalmente variables como el tiempo de permanencia, el volumen de aire, la dosificación de cobre, el pH y la rapidez del oxidante; que de tenerlas bajo un adecuado control y en las cantidades correctas, permiten que se pueda obtener resultados eficientes durante la tratabilidad de efluentes, reduciendo una concentración cercana a 200 mg/l de cianuro total, hasta rangos por debajo de 1 mg/l.

10.3.1.6. Tratamiento con “Ácido de Caro”

Se comenzó a aplicar recién a nivel industrial a fines de los 90's, convirtiéndose en una de las alternativas más viables y aplicables dentro del sector. La eficiencia de este tratamiento se basa en volcar al efluente tanto el ácido de Caro, obtenido a partir de la mezcla de altas concentraciones de ácido peroxosulfúrico (H_2SO_5) y ácido sulfúrico (H_2SO_4), como de una base que puede ser hidróxido de calcio ($Ca(OH)_2$) o hidróxido de sodio ($NaOH$), al mismo tiempo. Al no requerir la adición de catalizadores, el ácido de Caro alcanza una alta rapidez de oxidación y efectividad tanto en soluciones cianuradas claras como en fangos.

10.4. Oro

En el Perú, es evidente el crecimiento que viene teniendo la industria aurífera, debido principalmente a la economía a escala que beneficia a esta clase de operaciones, los bajos costos unitarios por unidad producida, los beneficios que tienen sus derivados y la aplicación de tecnologías combinadas con técnicas de ingeniería, diseño y construcción.

10.4.1. Métodos de extracción

Se estima que aproximadamente a lo largo de los años se han extraído alrededor de 100,000 toneladas de oro de las cuales solo el 10% provienen de la prehistoria y antigüedad.

Probablemente la técnica de extracción más fácil y la primera en ser aplicada fue el lavado en batea, la cual se basa en llenar un recipiente cónico con grava y agitarlo bajo una corriente de agua, para que así la

grava más ligera vaya siendo eliminada y solo quede las partículas de metal más densas.

Dentro de los métodos de gravimetría, la minería hidráulica, proporciono un método, en el cual un intenso chorro de agua se proyecta en la grava que contiene el oro, logrando con ello que el material sea suprimido, con ayuda de canaletas en las cuales desemboca el metal, mientras la grava queda flotando para su posterior eliminación; otro método es el de la minería fluvial, que utiliza embarcaciones de fondo plano para sacar el material del fondo del río y depositarlo en un recipiente cribador, el cual es girado y al mismo tiempo llenado con agua para que la arena portadora de oro se hunda y al caer se obtenga una mayor concentración.

En adición a los métodos antes mencionados, se ha demostrado que los procesos de mayor efectividad para la extracción de oro son la amalgamación, aunque se encuentra casi en total desuso en todo el mundo debido a la elevada toxicidad del mercurio y el gran daño que esta causaba en el ambiente; y la cianuración, en donde se introduce el mineral finamente triturado a un tanque de lixiviación y es mezclado con una disolución de cianuro sódico o potásico, para finalmente ser separado mediante la filtración en vacío.

10.4.2. Proceso de Lixiviación

La lixiviación o Heap Leaching es un método bastante asequible para la tratabilidad de minerales con baja presencia en metales preciosos; a través del cual se extraen minerales, comúnmente oro, de una masa sólida a través de una mezcla con solución de cianuro de sodio y

oxígeno, que es introducido al tanque mediante una inyección directa de aire. La velocidad de disolución de estos metales preciosos depende principalmente del área de contacto del metal con la fase líquida y de la rapidez de agitación.

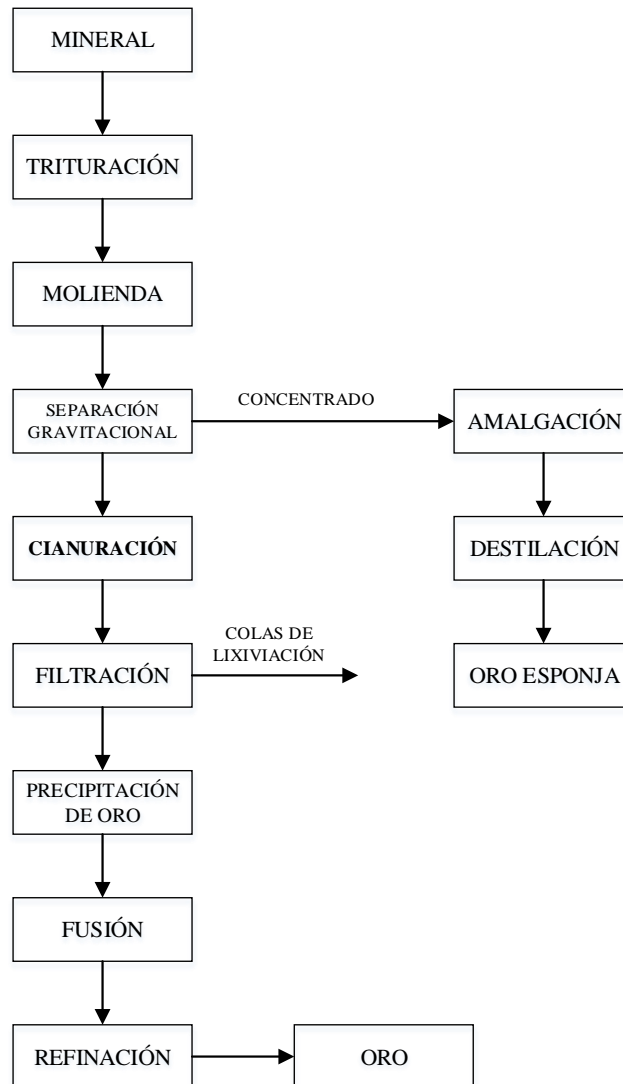


Figura 4. Diagrama de Bloques del proceso de lixiviación con cianuro.

Elaboración Propia

Los procesos de lixiviación presentan diferentes sistemas de operación, que pueden ser seleccionados tomando en cuenta factores técnicos y económicos, como el comportamiento del metal, reservas minerales, capacidad de procesamiento, etc.

10.4.3. Agentes Lixiviantes

Según (Vargas, 2012), los reactivos que se utilizan comúnmente durante el proceso de lixiviación son:

- **Cianuro**

Es el solvente más utilizado en la actualidad debido a su sencilla aplicación, este se elabora con agua no ácida a un pH neutro con una concentración de 10% en peso. El rango requerido para la concentración de la solución lixivante es de 0.05 a 0.10% de NaCN.

- **Cal**

Este reactivo se añade directamente con el mineral durante la etapa de chancado, logrando conservar una alcalinidad de 10 a 11, adicionalmente, el uso de este componente dependerá de cada mineral (entre 0.5 a 5 kg/TM).

- **Zinc**

El polvo de Zinc se añade en proporciones desde 0.6 a 1.5 parte de Zinc por parte de oro y plata; para garantizar este consumo se debe emplear zinc de alta pureza.

- **Carbón activado**

Se emplea para precipitar plata y oro de las soluciones, utilizándose comúnmente cuando el mineral tiene grandes cantidades de oro con respecto a la plata, este puede ir junto a una precipitación opcional de plata con Na₂S cuando la relación plata/oro en la solución es muy elevada.

Las cualidades del carbón activado fueron muy empleadas en el siglo pasado, sin embargo, debido a posibles pérdidas del oro y plata durante

el proceso, su uso cada vez disminuyó. No obstante, al día de hoy gracias a los avances realizados por Zadra en 1950 se usa este reactivo ampliamente en nuestro medio.

10.5. Generación de residuos en mineras

Los desechos generados por las minas de oro se clasifican en las siguientes categorías según (Eppers, 2014):

- Desmontes o estériles
- Residuos de la extracción de mineral a través del cianuro
- Residuos líquidos

Cada uno de los residuos mencionados anteriormente, deben ser manejado cuidadosamente ya que el impacto de este puede llegar a ser irreversible.

10.5.1. Residuos de la extracción de mineral a través del cianuro

La extracción del mineral a través del cianuro genera distintas clases de residuos, este en función al proceso aplicado. Estos generalmente son altamente tóxicos causando problemas de erosión con agua y viento; no obstante, en ciertos procesos de extracción se utilizan aditivos químicos para simplificar la separación. (Eppers, 2014)

Dependiendo del tipo de lixiviación empleado, el mineral resultante contiene una parte de la solución alcalina de cianuro, considerado como un desecho peligroso si las concentraciones superan los límites máximos permisibles. Según la granulometría del mineral lixiviado, el residuo se puede presentar en forma de sólido o de lodo, por lo cual, con la finalidad de evitar el riesgo de una posible contaminación del suelo y agua, se debe impedir la introducción del lixiviado al subsuelo,

así como cualquier contacto con cuerpos de aguas superficiales.

(Eppers, 2014)

Según la Estadística de Accidentes Ambientales de Gravedad, la amenaza más significativa durante el proceso de lixiviación es el rompimiento de un dique de colas con un consecuente derrame descontrolado de cantidades significativas de lodos contaminados con cianuro y otros metales, aquí radica la importancia del cumplimiento con la normativa de construcción de diques establecidas en la Guía Ambiental para el manejo de Relaves Mineros (MEM, 1996), en todas las instalaciones que generen relaves como residuo de su producción. Por otro lado, generalmente los desechos con concentraciones altas de cianuro cuentan con una granulometría fina lo cual facilita su erosión producida por el aire y agua, dando lugar a materiales contaminados.

(Eppers, 2014)

10.5.2. Residuos líquidos

En muchas plantas metalúrgicas, las soluciones cansadas (soluciones con altas concentraciones de mineral) son expulsadas sin previo control al suelo para su infiltración, los cuales implican una fuente considerable de contaminación al medio ambiente.

Las concentraciones de cianuro típicas de las soluciones cansadas oscilan entre los 40 miligramos y los 2000 miligramos por litro de cianuro. (Logsdon M. & Hagelstein K. & Mudder T., 1999). Por lo que se requiere de un tratamiento intensivo de estos desechos antes de su descarga en el ambiente, no obstante, generalmente los tratamientos biológicos no son suficientes para reducir la concentración del cianuro

a los límites máximos permisibles por la MEM, y se debe recurrir a tratamientos físico-químicos adicionales para garantizar la degradación máxima posible de los metales pesados y metaloides.

10.6. Impactos del cianuro sobre la salud y el medio ambiente

Un aspecto preocupante alrededor de la minería se ha basado últimamente en la producción de oro y las consecuencias asociadas a la utilización del cianuro durante este proceso; el cual ha originado una preocupación ambiental y social cada vez más creciente, gracias a documentos y campañas ambientales como Dirty Mining, The Environment y Communities. Pues si bien es necesario la presencia del cianuro para la efectiva obtención del mineral, también se debe tener en cuenta, su alta toxicidad y posibles consecuencias tanto para las personas, como la flora y fauna.

La exposición a este componente es de suma importancia, pues, para un adulto, la ingesta oral de cianuro es letal a partir de una porción equivalente a un gramo de arroz y en relación con la flora y fauna, resultan fácilmente afectadas a través del aire y agua.

10.6.1. Toxicidad en Seres Humanos

Mundialmente se registran unas 15,000 muertes laborales al año dentro de la industria minera debido a la manipulación de residuos cianurados.

La mayor parte de estos residuos que desembocan en aguas superficiales, nacen en los efluentes de las plantas de tratamiento de relaves mineros.

La composición más toxica del cianuro es en la forma de HCN gaseoso, según la Conferencia Norteamericana de Higienistas

Industriales Gubernamentales (ACGIH) la cantidad máxima de HCN es de 4.7 ppm. En concentraciones de 20 a 40 ppm de HCN es posible observar dificultad respiratoria después de varias horas, y la muerte después de pocos minutos en concentraciones por encima de 250 ppm. en el aire.

La dosis mortal en humanos por digestión de cianuro libre varía entre 1 a 3 mg/kg, mientras que la dosis letal por impregnación e la piel es alrededor de 100 mg/kg.

10.6.2. Eco toxicidad de Cianuro

La consecuencia más significativa del cianuro en el ecosistema es la contaminación en aguas tanto superficiales como subterráneas, pues a causa de la alta solubilidad de este componente en agua, es que su contaminación resulta mucho más rápida y problemática en comparación con otros contaminantes.

Este a su vez, altera la vida acuática y otras especies como mamíferos, aves y reptiles que se encuentren en las zonas cercanas a la producción, incluso según (R. Eisler, 1991) la especie más sensible al cianuro son los peces, como las truchas.

CAPÍTULO 4: Resultados y Conclusiones

11. Resultados

Para la revisión de las distintas metodologías cuya finalidad es lograr la efectiva degradación de los relaves cianurados originados por el proceso de lixiviación en los efluentes de las mineras auríferas; se ha considerado los siguientes parámetros: porcentaje de degradación del cianuro puro, necesidad de tratamiento adicional, además de las ventajas y desventajas de cada método.

La identificación de estos parámetros permitió la realización de un análisis comparativo, logrando identificar el método de Acido de Caro como el más viable.

En la tabla 4 se muestra la comparación de los métodos de degradación abarcados, de modo que permite la síntesis y entendimiento de cada uno de ellos. Los métodos que no requieren de un tratamiento adicional son los que utilizan peróxido de hidrógeno, UV-H₂O₂ y ácido de Caro con un porcentaje de degradación del cianuro de 98, 94 y 96 respectivamente; por otro lado, encontramos aquellos con la necesidad de aplicar un tratamiento adicional como el método con O₃, tratamiento por cloración y el proceso INCO, cuyos porcentajes de degradación son los siguientes: 92, 95, 92.

Adicionalmente, se identificaron las principales ventajas y desventajas de cada método.

Tabla 4.

Cuadro comparativo de los métodos de degradación del cianuro

| Tratamiento | Porcentaje de degradación del cianuro puro | Ventajas | Desventajas | ¿Necesita un tratamiento adicional? |
|---|---|--|---|--|
| Tratamiento con H ₂ O ₂ (Peróxido de hidrógeno) | 98% | La metodología para su aplicación es sencilla tanto en su diseño como funcionamiento. El costo de capital requerido es bajo. Presenta un alto porcentaje de remoción de cianuro. Puede ser utilizado también para la destrucción de otros disolventes orgánicos. | Requiere de un consumo excesivo de sulfato de cobre y peróxido de hidrógeno. | No |
| Tratamiento con UV-H ₂ O ₂ | 94% | Es un proceso muy veloz. Logra la degradación casi total del cianuro. No requiere el almacenamiento de reactivos. | El proceso aún se encuentra en desarrollo. Su efectividad requiere de un tiempo de desarrollo muy largo. | No |
| Tratamiento con O ₃ | 92% | Es altamente efectivo para la eliminación de cianuro en concentraciones mínimas. | Requiere de un elevado control de la cantidad de compuestos a usar. | Si |
| Tratamiento por Cloración | 95% | | Se requiere de un elevado consumo de cloro. Se logra la eliminación de cantidades poco significativas de cianuro. | Si |

| | | | | |
|-------------------------------|-----|--|--|----|
| Proceso INCO | 92% | Logra la eliminación parcial de cianuro | Elevado control y supervisión de las variables del proceso. | Si |
| Tratamiento con Ácido de Caro | 96% | Permite efectuar simultáneamente procesos de reciclado de cianuro, además de su alta cinética o velocidad de reacción. | No es estable y debe ser aplicado rápidamente en las pulpas. | No |

Elaboración Propia

12. Conclusiones y Recomendaciones

12.1. Conclusiones

- Se identificó que el mejor método para la degradación de cianuro es el ácido de Caro debido a su elevada velocidad de oxidación sin la necesidad de utilizar catalizadores de cobre durante su proceso, a comparación de otros métodos analizados; por otro lado, no produce gases contaminantes que impliquen un riesgo medioambiental y no requiere de un tratamiento adicional debido a que la degradación del 96% cumple con los límites máximos permisibles establecidos por el Ministerio de Energía y Minas.
- Al recopilar información sobre los métodos más usados para la degradación de cianuro se encontró que aquellos que aplican la oxidación química en su proceso son los más comunes y efectivos, encontrando dentro de este grupo los tratamientos con H₂O₂, UV-H₂O₂, O₃, Ácido Caro, tratamiento por cloración y proceso INCO, que fueron los que se analizaron en la presente investigación.
- Se desarrolló el proceso que sigue cada método de oxidación química recopilado, obteniendo que el tratamiento a través del H₂O₂ es el que posee la metodología de aplicación más sencilla, lo que comprueba que este sea actualmente el método más utilizado dentro de la industria aurífera.
- Se comparó las características de los métodos investigados a través de una matriz integrada utilizando parámetros como porcentaje de degradación, necesidad de un método adicional, ventajas y desventajas; lo que nos permitió determinar de una manera más precisa y objetiva los diferentes métodos analizados.

- Se seleccionó el Ácido de Caro como el método de oxidación química más adecuado, ya que su componente principal (H_2SO_5) es considerado como un oxidante superior al peróxido de hidrógeno y además, este componente es capaz de oxidar eficientemente altos niveles de tiocianatos, reacción que no es posible para el H_2O_2 .

12.2. Recomendaciones

- A pesar de que los resultados obtenidos según los parámetros analizados muestran que el mejor método para la reducción del cianuro es el peróxido de hidrógeno con un 98% efectivo, este método requiere de la utilización de catalizadores, que expuestos presentan una alta toxicidad para el ambiente; por lo que a pesar de ser el método con mayor porcentaje de degradación de cianuro, es a su vez el que representa el mayor riesgo para el ambiente, de modo que se debería plantear la búsqueda de nuevas alternativas.
- Debido a que en esta investigación solo se analizan los métodos de remoción de cianuro por oxidación química, se está dejando de lado la investigación de otros tipos de métodos, como el uso de microorganismos, más modernos, pero igual de eficientes; de modo que si se desea efectuar un análisis más completo y profundo sobre cuál es el método óptimo, se debe considerar este tipo de metodologías.
- Antes de la implementación de cualquiera de las metodologías desarrolladas las mineras deberían aplicar una matriz de Leopold para así, conocer de manera más precisa que impactos ambientales generan sus actividades para la región y la urgencia con la cual deben de ser tratadas.
- Si bien en la investigación únicamente se abarcó las metodologías para el tratamiento de efluentes con cianuro, se recomienda estudiar los efectos de

otros agentes contaminantes como el mercurio y azufre, que son utilizados en el sector minero o en cualquier proceso que lo requieran; para así a través de una investigación mucho más exhaustiva analizar la viabilidad de utilizar las técnicas de tratamiento planteados, logrando un mayor alcance de mitigación.

13. Referencias Bibliográficas

- (USGS), S. G. (2018). *Encuesta mundial del U.S. Geological Survey*. Colorado, EE.UU.
- Cárdenas, F., Díaz, M., Guajardo, C., & Oliva, M. (2019). *Lixiviación de minerales mediante pilas y bateas*. Santiago de Chile: Universidad de Chile.
- Cardona, E. (2015). *Microorganismos Potenciales degradadores de Cianuro en residuos de minería de oro*. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Carrere, R. (2014). *Minería Impactos sociales y ambientales*. Montevideo: I. Rosgal S.A.
- Castrillón V. & Navarro L. . (2016). *Evaluación de la fitorremediación como alternativa para el tratamiento de aguas residuales contaminadas con mercurio producto de la minería aurífera (artesanal y pequeña escala)*. España: Universidad Nacional Abierta y a Distancia.
- Chatwin T. (1989). *Cyanide Attenuation/Degradation in Soil*. Resource Recovery & Conservation Company Utah.
- Eppers, O. (2014). *Buenas Prácticas de Gestión Ambiental para Plantas Hidrometalúrgicas de la pequeña minería y minería artesanal que utilizan cianuro*. Arequipa.
- Gaviria A. & Meza L. (2015). *Análisis de alternativas para la degradación del cianuro en efluentes líquidos y sólidos del municipio de Segovia, Antioquia*. Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Gómez, P. (2012). *Degradación de Cianuros mediante Oxidación Química en Efluentes Industriales*. Universidad de Oviedo.
- Gutiérrez, G. (2010). *Informe especial Minería Química a cielo abierto: el caso de Las Crucitas. Capítulo 3: El efecto del cianuro en la salud humana*,. Universidad de Costa Rica.
- Logsdon M. & Hagelstein K. & Mudder T. (1999). *The Management of Cyanide in Gold Extraction*. *International Council on Metal and the Environment*.

- MEM. (1996). *Guía Ambiental para el Manejo de Cianuro, Subsector Minería, Volumen XIII, Referencia de aprobación: R.D. No. 025-96-EM/DGAA*. Obtenido de <http://intranet2.minem.gob.pe/web/archivos/dgaam/publicaciones/normastecnicas/GUIA%20DGAAM%2013.pdf>
- MINAM. (2010). *Decreto Supremo N° 010-2010*. Perú.
- Moran, R. (2010). *Cyanide compounds are seldom present in uncontaminated waters in measurable concentrations*. Mineral Policy Center.
- Oyarce Guarniz, E., & Lescano Terán, M. (2015). *Proceso de lixiviación a nivel artesanal para la obtención de los parámetros óptimos en la recuperación de plata y oro en el distrito de Simbrion en la provincia de Gran Chimú*. Trujillo.
- Pomalaza, O. (2016). *Remoción del cianuro de efluentes minerometalúrgicos por oxidación química con el ácido de caro*. Huanzayo, Perú: Universidad Nacional del Centro del Perú.
- Quispe, L., Arteaga, M., & Cardenas, E. (2011). *Eliminación del Cianuro mediante sistema combinado UV/H₂O₂/TiO₂*. Universidad Nacional San Andrés-UNMSA. Revista Boliviana de Química. Volumen 28 N°2 p. 115-116.
- R. Eisler. (1991). *Sodium cyanide hazards to fish and other wildlife from gold mining operations*. (supra n.12), p.59.
- Resolución (RC-B7-0238/2010). (2010). Sobre la prohibición general del uso de las tecnologías mineras a base de cianuro en la Unión Europea. *Resolución RCB7*. Parlamento Europeo.
- Rupay, F. (2016). *Remoción del Cianuro con el complejo (CuSO₄-H₂O₂) de los efluentes de cianuración de oro para evitar riesgos a la salud y al ambiente*. Huancayo, Perú: Universidad Nacional del centro del Perú.

- 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 América Latina.
- Smith A. & Mudder T. (1991). *The Chemistry and Treatment of Cyanidation Wastes*. Mining Journal Books Ltd. London.
- Vargas, J. (2012). Estudio Ambiental y optimización en la extracción del oro utilizando el cianuro. *Ciencia & Desarrollo*, p. 75-80.
- Young C. & Jordan T. (1995). *Cyanide remediation: current and past technologies*. 10th Annual Conference on Hazards Waste Research. Vol.44. pp. 104-129.

14. Anexos

Anexo 1. Límites máximos permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades mineras. Extraído de (MINAM, 2010)

| Parámetro | Unidad | Límite en cualquier momento | Límite para el Promedio anual |
|-------------------------------|--------|-----------------------------|-------------------------------|
| pH | | 6 - 9 | 6 - 9 |
| Sólidos Totales en Suspensión | mg/L | 50 | 25 |
| Aceites y Grasas | mg/L | 20 | 16 |
| Cianuro Total | mg/L | 1 | 0,8 |
| Arsénico Total | mg/L | 0,1 | 0,08 |
| Cadmio Total | mg/L | 0,05 | 0,04 |
| Cromo Hexavalente(*) | mg/L | 0,1 | 0,08 |
| Cobre Total | mg/L | 0,5 | 0,4 |
| Hierro (Disuelto) | mg/L | 2 | 1,6 |
| Plomo Total | mg/L | 0,2 | 0,16 |
| Mercurio Total | mg/L | 0,002 | 0,0016 |
| Zinc Total | mg/L | 1,5 | 1,2 |