

**ESTUDIO DE LAS PRINCIPALES TÉCNICAS DE REMEDIACIÓN DE
EFLUENTES LÍQUIDOS CONTAMINADOS POR DRENAJES ÁCIDOS DE
MINAS DE ORO EN COLOMBIA**

Luz Mery Posada Otálora

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE QUÍMICA
ESPECIALIZACIÓN EN QUÍMICA AMBIENTAL
BUCARAMANGA
2011**

**ESTUDIO DE LAS PRINCIPALES TÉCNICAS DE REMEDIACIÓN DE
EFLUENTES LÍQUIDOS CONTAMINADOS POR DRENAJES ÁCIDOS DE
MINAS DE ORO EN COLOMBIA**

Luz Mery Posada Otálora
Licenciada en Biología y Química

Monografía presentada como requisito para optar al título de
Especialista en Química Ambiental

Director:

Hermínsul de Jesús Cano Calle
Químico
Especialista en Química Ambiental

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE QUÍMICA
ESPECIALIZACIÓN EN QUÍMICA AMBIENTAL
BUCARAMANGA
2011**

DEDICATORIA

“A Dios por bendecirme y consentirme todos los días de mi vida. . . .

A mi hija, Isabella por su inmenso amor, porque me donó parte de su tiempo, de sus juegos de niña para que mami se superara. . . .

A mi madre, Nohora Isabel por su apoyo incondicional, por ser el gran motor de mi vida y por impulsarme a ser cada día mejor

A mis hermanos, por sus ánimos. . . su lealtad, sus buenos deseos. . . .

A Jairo que me brinda su amor incondicional y a quien corresponde con todo mi corazón. . . . ”

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo, mi Monografía es el resultado de un esfuerzo en el cual, directa o indirectamente, se involucraron personas valiosas que contribuyeron leyendo, opinando, dándome ánimos, teniéndome paciencia y acompañándome en los momentos que no supe que hacer o que escribir.....

Le doy Gracias a Dios por permitirme llegar hasta este momento tan importante y lograr esta meta significativa de mi vida

Gracias a mi madre Nohora Isabel por su cariño, comprensión y apoyo sin condiciones, sin medida, por estar ahí siempre con una voz de aliento y con la convicción y la fe en mis capacidades, impulsándome a ser cada día mejor

Al profesor Helminsur, mi director de la monografía, quien sin conocerme me dio su voto de confianza, opiniones, orientaciones y parte de su valioso tiempo

A cada uno de los docentes que aportaron a mi desarrollo profesional durante la especialización, en especial a la profesora Yolanda, la profesora Carolina, el profesor Julio Calvo, excelentes profesionales

A Elizabeth, más que una funcionaria administrativa de la especialización una persona incondicional que me colaboró al máximo con sus orientaciones para que me salieran las cosas bien.....

A mis compañeros: Carlos, Diana, Sandra Milena que me brindaron su apoyo en momentos difíciles y en especial a Nelson quien me orientó en la recolección y manejo de la información.....

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	17
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	18
3. JUSTIFICACIÓN.....	19
4. OBJETIVOS.....	20
4.1 OBJETIVO GENERAL	20
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	20
5. MARCO TEÓRICO.....	21
5.1 EXTRACCIÓN DE ORO A NIVEL TÉCNICO	21
5.1.1 Operaciones mecánicas: molienda, trituración y clasificación.....	21
5.1.2. Lixiviación.....	23
5.1.3. Refinación final.....	24
5.1.4 Hidrometalurgia.....	24
5.1.4.1 Lixiviación.....	26
5.2 LA MINERÍA AURÍFERA EN COLOMBIA.....	27
5.2.1 Inventario minero colombiano.....	29
5.2.2 Sistemas de explotación.....	29
5.2.3 Nivel de integración de operaciones.....	30
5.2.4 Rangos de explotación.....	30
5.3 ETAPAS DE LA MINERÍA AURÍFERA PRACTICADA EN COLOMBIA.....	30
5.3.1. Exploración.....	30
5.3.2. Prospección geoquímica.....	30
5.3.3. Explotación.....	30
5.3.3.1 Planeamiento y montaje.....	31
5.3.3.2 Desarrollo.....	31
5.3.4 Beneficio y transformación de minerales.....	33
5.3.4.1 Clasificación de tamaño.....	33
5.3.4.2 Trituración.....	33
5.3.4.3 Molienda.....	33
5.3.4.4 Concentración.....	33
5.3.4.5 Amalgamación.....	34
5.3.4.6 Lixiviación con cianuro.....	34

5.3.4.7 <i>Fundición y purificación</i>	34
5.3.5 <i>Cierre de mina</i>	34
5.3.6 <i>Residuos generados en los procesos de extracción de oro</i>	35
5.3.7 <i>Problemática de la minería aurífera colombiana</i>	36
5.3.7.1 <i>Problemas en la etapa de explotación</i>	36
5.3.7.2 <i>Problemas en la etapa de beneficio de oro</i>	37
6. MARCO LEGAL	41
6.1 TRATADOS INTERNACIONALES RATIFICADOS POR COLOMBIA	41
6.2 CONSTITUCIÓN POLÍTICA NACIONAL DE 1991 (CP)	42
6.3 LEYES Y DECRETOS	44
7. IMPACTOS DE LA ACTIVIDAD AURÍFERA	47
7.1 IMPACTOS SOCIALES.....	47
7.2 IMPACTOS AMBIENTALES.....	48
7.2.1 <i>Impactos al recurso hídrico</i>	49
7.2.2 <i>Impactos atmosféricos</i>	50
7.2.3 <i>Impactos al suelo</i>	50
8. DESCONTAMINACIÓN DE EFLUENTES DE PROCESOS MINEROS	53
8.1 MÉTODOS PASIVOS DE DESCONTAMINACIÓN DE EFLUENTES	53
8.1.1 <i>Sistemas de medio inorgánico (IMPS)</i>	53
8.1.2 <i>Sistemas tipo humedal</i>	55
8.1.3 <i>Sistemas de flujo sub-superficial y actividad bacteriana sulfato-reductora</i>	57
8.2. MÉTODOS ACTIVOS DE DESCONTAMINACIÓN DE EFLUENTES.....	58
8.2.1 <i>Dilución</i>	58
8.2.2 <i>Extracción de los productos tóxicos de la solución y conversión de formas tóxicas a formas no tóxicas</i>	59
8.2.2.1 <i>Degradación natural</i>	59
8.2.2.2 <i>Oxidación de fases cianuradas para formar compuestos menos tóxicos</i>	61
8.2.2.3 <i>Formación de complejos de hierro</i>	67
8.3. SISTEMAS SEMI-PASIVOS.....	71
8.4 SELECCIÓN DEL SISTEMA	72
8.5 MEDIDAS DE DESCONTAMINACIÓN DE EFLUENTES MINEROS EN COLOMBIA	73
8.5.1 <i>Recuperación del mercurio en efluentes líquidos</i>	73
8.5.2 <i>Recuperación del mercurio en efluentes líquidos con peróxido</i>	73

8.5.3	<i>Neutralización de efluentes de túneles exploratorios.</i>	73
8.5.4	<i>Degradación del cianuro en efluentes líquidos.</i>	73
8.5.5	<i>Recuperación del mercurio en efluentes líquidos con carbón activado y bentonita.</i>	74
8.5.6	<i>Biorremediación.</i>	74
9.	PRODUCCIÓN MAS LIMPIA (PML), EN LA MINERÍA AURÍFERA	75
9.1	PML EN LA ETAPA DE EXTRACCIÓN	75
9.1.1	<i>En la minería aluvial.</i>	75
9.1.2	<i>En yacimientos de filón.</i>	76
9.2	PML EN LA ETAPA DE BENEFICIO	76
9.2.2	<i>PML en la concentración gravimétrica.</i>	77
9.2.2.1	<i>Algunos factores que influyen en la concentración gravimétrica.</i>	79
9.2.2.2	<i>Manejo de colas contaminadas.</i>	79
9.2.2.3	<i>Recuperación de oro de la amalgama.</i>	79
10.	CONCLUSIONES	81
11.	RECOMENDACIONES	82
12.	BIBLIOGRAFÍA	83
	ANEXOS	86

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Procesos mecánicos: molienda, trituración y clasificación.....	22
Figura 2. Procesos químicos: lixiviación	23
Figura 3. Procesos térmicos: refinación final	25
Figura 4. Distritos auríferos en Colombia.....	27
Figura 5. Explotaciones auríferas colombianas por departamento	29
Figura 6. Residuos generados en los procesos de extracción de oro.....	35
Figura 7. Mala manipulación del mercurio en la minería aurífera.....	39
Figura 8. Métodos de detoxificación: dilución	58
Figura 9. Procesos de degradación de los compuestos cianurados	59
Figura 10. Diagrama de flujo del proceso: oxidación por H ₂ O ₂	65
Figura 11. Diagrama de flujo del proceso INCO.....	66
Figura 12. Equilibrio HCN/CN ⁻ en función del pH.....	69

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Regiones auríferas en Colombia	28
Cuadro 2. Principales riesgos para la salud en la explotación minera	37
Cuadro 3. Recursos naturales contaminados con mercurio.....	38
Cuadro 4. Impactos sociales de la actividad aurífera en Colombia.....	48
Cuadro 5. Impactos de la actividad aurífera nacional sobre el recurso hídrico	49
Cuadro 6. Impactos atmosféricos causados por la actividad aurífera nacional.....	50
Cuadro 7. Impactos sobre el suelo, el paisaje y los ecosistemas terrestres	50
Cuadro 8. Microorganismos y vías de degradación de compuestos cianurados...	64

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Diagrama de flujo: Refinación técnica del oro.....	86
Anexo 2. Recuperación de oro con carbón en pulpa	87
Anexo 3. Flujograma Merrille Crowe para recuperación de oro.....	88
Anexo 4. .Diagrama de flujo del proceso AVR	89

GLOSARIO

Amalgama (beneficio): Aleación entre dos o más metales, en la explotación minera, uno de esos metales es el mercurio, por lo que se puede simplificar como la aleación de mercurio con otro metal.

Amalgamación: Procedimiento de concentración en el que los metales nativos se separan de los minerales no metálicos de la ganga mediante un mojado selectivo de las superficies metálicas por el mercurio.

Drenaje Ácido de Mina (DAM): Agua de pH bajo enriquecida en, la acidez de los DAM es producida por oxidación e hidrólisis de minerales de sulfuros y está representada por acidez mineral (Fe, Al, Mn, etc.) y la acidez del ion hidrógeno.

Entibar. En las minas, apuntalar y fortalecer con maderas o tablas.

Lixiviación (beneficio): Proceso hidrometalúrgico mediante el cual se realiza la disolución selectiva de los diferentes metales que contiene una mena, por medio de una solución acuosa que contiene un reactivo químico apropiado.

Lixiviados: Soluciones obtenidas por extracción o lixiviación, mediante el transporte de agua y movilización descendente de sustancias.

Mena: Es el mineral de base del que es posible extraer otro mineral de mayor pureza e importancia económica.

Minería: Es una industria extractiva de yacimientos minerales, incluye operaciones a cielo abierto, canteras, dragado y operaciones combinadas orientadas a la transformación de minerales bajo tierra o en superficie.

Minería a cielo abierto: Conjunto de procedimientos mineros desarrollados en superficie.

Minería artesanal o ilegal: Minería desarrollada sin título minero; es decir, al margen de la ley. Incluye trabajos y obras de exploración si título minero y minería amparada por título minero, pero con extracción realizada por fuera del área otorgada en la licencia.

Minería legal: Es la minería amparada por un título minero, que es el acto administrativo escrito mediante el cual se otorga el derecho a explorar y explotar el suelo y subsuelo de propiedad nacional.

Plan de Manejo Ambiental (PMA): Instrumento de gestión en el que se establecen las acciones requeridas para prevenir, mitigar, controlar, compensar y corregir los posibles impactos ambientales causados por desarrollo de un proyecto, obra o actividad.

Recuperación: Conjunto de acciones destinadas a devolver a los recursos naturales (aire, agua y suelo) la posibilidad de soportar uno o más usos, sin perjuicio del medio ambiente.

Restitución: Acciones destinadas a devolver a un terreno las características precedentes al inicio de cualquier actividad impactante.

Socavón: Galería principal de una mina que ha sido agrandada hasta ser convertida en un cuarto subterráneo para la extracción de minerales.

RESUMEN

TÍTULO: ESTUDIO DE LAS PRINCIPALES TÉCNICAS DE REMEDIACIÓN DE EFLUENTES LÍQUIDOS CONTAMINADOS POR DRENAJES ÁCIDOS DE MINAS DE ORO EN COLOMBIA*

AUTOR: Luz Mery Posada Otálora**

PALABRAS CLAVES: EXPLOTACIÓN ALUVIAL, HIDROMETALURGIA, IMPACTO AMBIENTAL, LIXIVIACIÓN, MINERÍA AURÍFERA, PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA, REMEDIACIÓN.

CONTENIDO:

El presente trabajo representa una revisión crítica al sector de la minería aurífera desarrollada en Colombia. La temática se desarrolla a lo largo de cinco capítulos en los que se analizan los procesos de explotación aurífera, los principales impactos ambientales causados por las actividades mineras y las técnicas más apropiadas para la remediación de tales impactos, se analizan las técnicas de producción más limpia aplicables a la minería aurífera nacional y se hace una revisión del marco legal aplicado a la minería colombiana.

La minería aurífera colombiana se caracteriza por ser en su gran mayoría una minería de pequeña escala y poco tecnificada; la cual además de producir bajos rendimientos, generan una amplia gama de impactos ambientales así: sobre el recurso hídrico por vertimiento de efluentes ácidos contaminados principalmente con mercurio, cianuro y metales pesados; sobre el aire por la emisión material particulado, gases y vapores tanto de mercurio como de ácido cianhídrico, y sobre el suelo por las grandes remociones de tierra y de cobertura vegetal.

Existe una buena cantidad de técnicas tanto activas como pasivas para la descontaminación de efluentes ácido generados en las actividades auríferas, pero la mejor opción es la adopción de técnicas de producción más limpia a lo largo de todo el proceso, con las cuales además de evitarse la afectación ambiental, se logran mayores rendimientos en la recuperación del mineral.

En relación con el marco normativo, el sector minero colombiano está pasando por un momento de incertidumbre tras ser declarada inexecutable de Ley 1382 de 2010 que derogaba el anterior código minero nacional; sin embargo, el ministerio de minas se encuentra en la elaboración un proyecto de ley que promete sacar al sector minero del limbo jurídico en que se encuentra temporalmente.

*Monografía

**Facultad de Ciencias, Escuela de Química, Especialización en Química Ambiental. Director: Químico, Hermínsul de Jesús Cano Calle.

ABSTRACT

TITLE: STUDIES OF THE MAIN TECHNIQUES OF REMEDIATION OF WASTEWATER CONTAMINATED BY ACID MINE DRAINAGE OF GOLD IN COLOMBIA*

AUTHOR: Luz Mery Posada Otálora**

Keywords: ALLUVIAL MINING, HYDROMETALLURGY, ENVIRONMENTAL IMPACT, LEACHING, GOLD MINING, CLEANER PRODUCTION, REMEDIATION.

CONTENT:

This work represents a critical review of the gold mining industry developed in Colombia. The theme is developed over five chapters that explore the processes of gold mining, the main environmental impacts caused by mining activities and the most appropriate techniques for the remediation of such impacts, analyzes the cleaner production techniques apply to gold mining country and we review the legal framework for mining in Colombia.

Colombian Gold mining is characterized by mostly a small-scale mining and low tech, which also produce low yields, produce a wide range of environmental impacts as well: on the water resources by dumping of effluents contaminated acids mainly mercury, cyanide and heavy metals on airborne particulate matter emissions, gases and vapors of mercury both as hydrogen cyanide, and on the ground by large earthmoving and vegetation.

There is a fair amount of both active and passive techniques for decontamination of acid effluents generated in the gold assets, but the best option is to adopt cleaner production techniques throughout the entire process, which in addition to avoided environmental involvement, higher yields are achieved in the recovery of the mineral.

Regarding the regulatory framework, the Colombian mining sector is going through a time of uncertainty after being declared unconstitutional Act 1382 of 2010 which repealed the previous national mining code, but the ministry of mines is in developing a draft law that promises to take the mining sector of the legal limbo in which it is temporarily.

*Monograph

**Science Faculty, School of Chemistry. Environmental Chemical Specialization. Director: Chemical, Hermisul de Jesús Cano Calle.

1. INTRODUCCIÓN

Colombia se caracteriza por poseer importantes riquezas en recursos naturales renovables y no renovables, perteneciendo a los recursos no renovables nacionales el renglón de la minería aurífera. Aunque en el país existen grandes empresas mineras que aplican tecnologías de punta para la explotación del oro, buena parte de la explotación aurífera es realizada de manera clandestina por pequeños mineros que aplican métodos artesanales altamente contaminantes. En este trabajo se analizan los dos tipos de minería aurífera, con especial énfasis en la minería de pequeña escala debido a los impactos ambientales asociados con sus procesos de explotación y beneficio, las medidas de mitigación y/o remediación.

La normatividad colombiana establece que para otorgar la licencia ambiental es fundamental realizar un estudio de Impacto ambiental previo a la etapa de exploración, etapa sobre la cual se exige la implementación del Plan de manejo ambiental para mitigar y/o restaurar los recursos naturales afectados, como el agua; sin embargo, estas exigencias en la práctica son inoperantes, ya que en la mayoría de los casos la extracción del oro es realizada de manera ilegal o clandestina por pequeños núcleos familiares de manera artesanal, los cuales evidentemente no cumplen con los requisitos establecidos por la ley.

En este trabajo se presenta una recopilación de alternativas para la mitigación de los impactos ambientales causados por las explotaciones auríferas de pequeña y mediana escala. Se describen algunas medidas de descontaminación de efluentes ácidos de mina y se describen las principales técnicas de producción más limpia aplicadas en el sector minero en Colombia.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La explotación aurífera es una actividad riesgosa para la salud humana y para el medio ambiente debido principalmente al empleo de sustancias químicas contaminantes, a la alta demanda de agua y al vertimiento de residuos contaminados a los cuerpos de agua. Colombia cuenta con la normatividad necesaria para proteger el medio ambiente de los impactos causados por las explotaciones auríferas a gran escala o por empresas legalmente constituidas; sin embargo, como subsiste un alto grado explotación clandestina, se torna muy difícil controlar los impactos causados por esta actividad.

El impacto ambiental de mayor preocupación provocado por la actividad aurífera, es la contaminación del agua, impacto causado por diferentes vías tales como: la gran demanda del recurso, el vertimiento de los residuos líquidos sin tratamiento a los cuerpos de agua, la alteración del cauce natural de ríos y cuencas, entre otros. Lo cual hace que estas aguas se vuelvan inutilizables por el hombre y demás seres vivos.

Existen tecnologías para la explotación de oro amigables con el medio ambiente y de alto rendimiento, pero que demandan una gran inversión económica, lo cual las hace inasequibles a la mayoría mineros. Sin embargo, mediante la aplicación de principios de Producción Más Limpia (PML) y la aplicación de técnicas de remediación apropiadas, se puede lograr la mitigación de los impactos causados por esta actividad a un razonable costo económico.

3. JUSTIFICACIÓN

El país adolece de medidas efectivas de control y seguimiento ambiental a las actividades mineras; particularmente la actividad aurífera, lo cual conlleva a que se esta actividad sea genere los mayores impactos ambientales en cada una de sus etapas: explotación, transformación y beneficio del metal; procesos generadores de lixiviados de minas ácidas DAM que causan impacto en los ecosistemas acuáticos y en la salud humana.

La actividad minera no tecnificada, representa un grave peligro para la salud humana y el ecosistema, debido principalmente al impacto ambiental causado sobre el recurso hídrico por el vertimiento de los residuos líquidos y sólidos sobre los cuerpos de agua. Surge la necesidad de estudiar técnicas de remediación adaptables a la realidad minera del país, así como las principales técnica de Producción Más Limpia aplicables al sector.

La recopilación y el análisis crítico de las técnicas de remediación del recurso hídrico impactado por los efluentes ácidos de la explotación de oro representa un primer paso hacia la meta de resarcir el daño causado por la actividad aurífera a un recurso natural tan importante como lo es el agua; tema de la mayor relevancia debido a que Colombia posee grandes riquezas tanto en oro como en recursos hídricos.

4. OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar las técnicas de remediación de residuos líquidos derivados de los procesos de explotación y beneficio en la minería aurífera y determinar el grado de aplicación en Colombia.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Identificar las regiones de Colombia en las que se presenta extracción minera de oro con generación de efluentes ácidos.
2. Explorar el marco normativo que rige la actividad minera en Colombia.
3. Determinar los Impactos ambientales generados por la actividad minera del oro en las comunidades aledañas a las zonas de explotación, cuando no se aplican políticas de extracción responsable.
4. Identificar las técnicas aplicadas por las empresas y asociaciones mineras que operan en Colombia, para mitigar y/o remediar los impactos ambientales generados sobre el recurso hídrico, como consecuencia del desarrollo de su actividad minera.

5. MARCO TEÓRICO

La extracción y refinación de oro es una de las prácticas más antiguas de la humanidad, y existe una gran variedad de métodos y técnicas empleadas para el este proceso, las cuales presentan diferentes niveles de eficiencia y de afectación al ambiente y a la salud humana. Los principales productores de oro a nivel mundial son: Sudáfrica, Estados Unidos, Australia, Canadá, China y Rusia. Colombia ocupa el puesto 16, con una modesta participación del 0,78%.¹

5.1 EXTRACCIÓN DE ORO A NIVEL TÉCNICO²

La refinación de oro consta de una serie de proceso que involucran operaciones mecánicas de reducción de tamaño, operaciones físico-químicas de lixiviación y formación de aleaciones, y operaciones térmicas de fundición y moldeado de metal. *Los Anexos 1 y 2* presentan los flujogramas de los procesos más comunes.

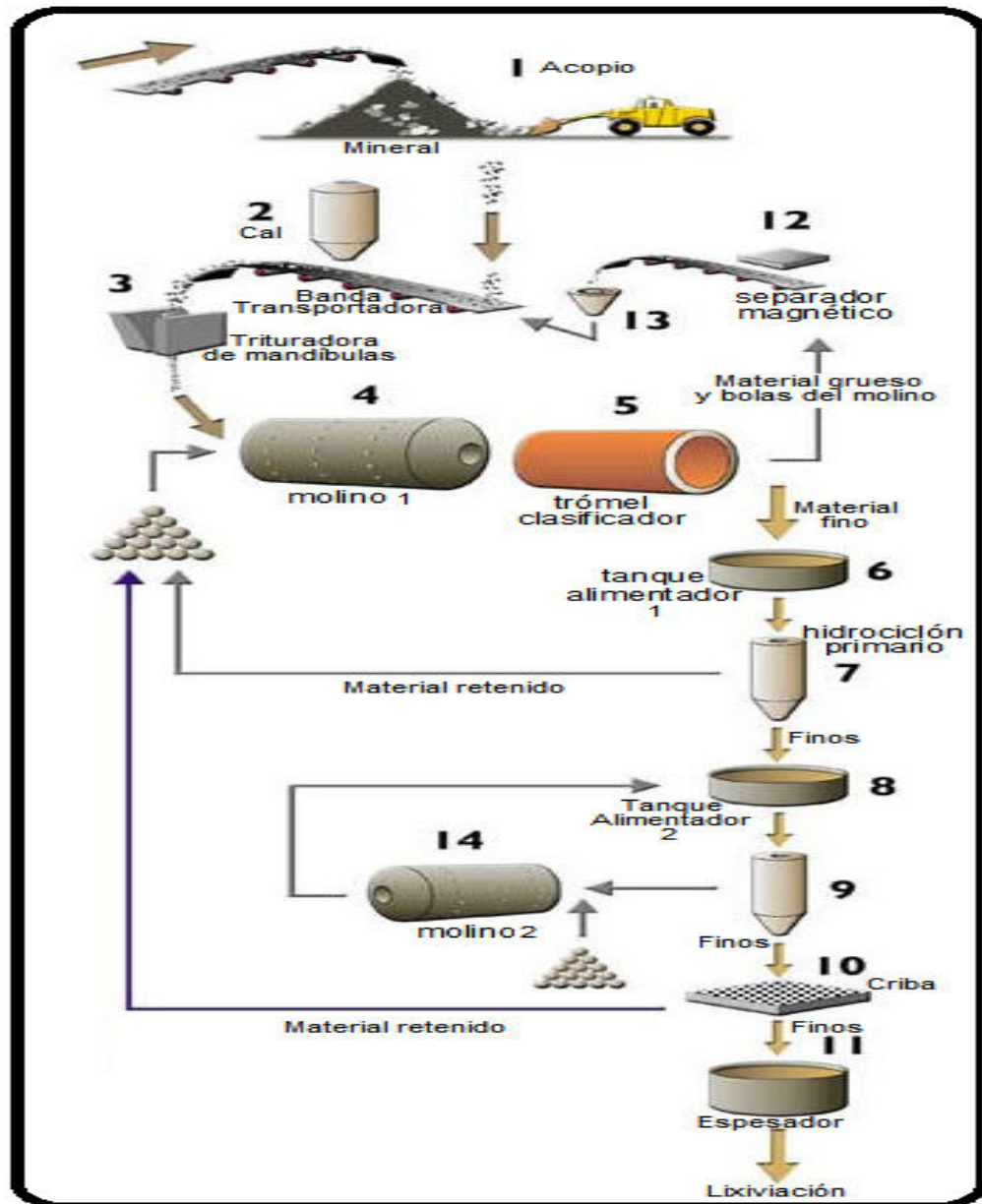
5.1.1 Operaciones mecánicas: molienda, trituración y clasificación. Proceso de aproximadamente 24 horas de duración, cuyo esquema se muestra en *la Figura 1* y se realiza de la siguiente manera.

El mineral acopiado en la planta de cianuración se pasa por una cinta transportadora donde se le adiciona cal para ajustar el pH previo a la molienda primaria, luego la mezcla triturada se pasa por un molino donde se produce un polvo fino. El molino posee un trómel clasificador, el mineral retenido en el trómel es enviado, por medio de circuito a un separador donde se recuperan las bolas del molino y el mineral retenido se recircula a la trituradora.

¹ Guía para la Gestión de las Autoridades Locales de Pueblos y Distritos Mineros de América Latina y el Caribe. CEPAL/UNCTAD. Chile, 2003.

² ALVAREZ G. Rodrigo, 2005.

Figura 1. Procesos mecánicos: molienda, trituración y clasificación



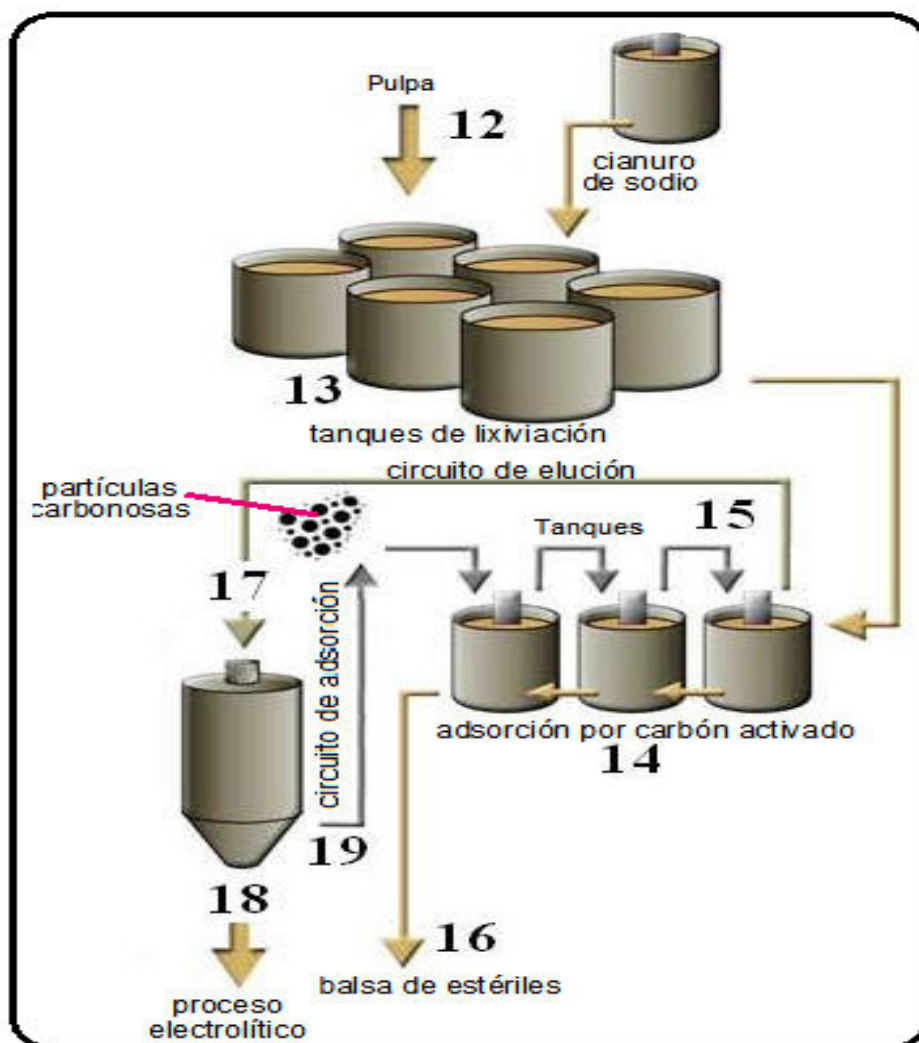
Fuente. ALVAREZ, Rodrigo. 2005.

El polvo que traspasa el trómel, se lleva a un tanque alimentador y luego a una batería de hidrociclones para continuar con el proceso de clasificación. Al final del proceso, la pulpa está en tamaños de grano muy pequeños (aprox. 75 μm), como

se requiere para el proceso de lixiviación; para eliminar cualquier exceso de agua en este punto, se emplea un espesador.

5.1.2. Lixiviación. Una vez molido y acondicionado el mineral (pulpa), se introduce en una serie de tanques de lixiviación donde se le adiciona cianuro y se le inyecta oxígeno para mejorar el rendimiento del proceso. Ver *Figura 2*.

Figura 2. Procesos químicos: lixiviación



Fuente. ALVAREZ, Rodrigo. 2005.

La solución rica en metales preciosos pasa a un proceso de adsorción por carbón activado, punto en que recupera el oro de la solución. Se adicionan partículas

carbonosas activadas superficialmente mediante calentamiento a 600 °C, las cuales se introducen en el circuito de adsorción a contracorriente con respecto a la circulación de la disolución.

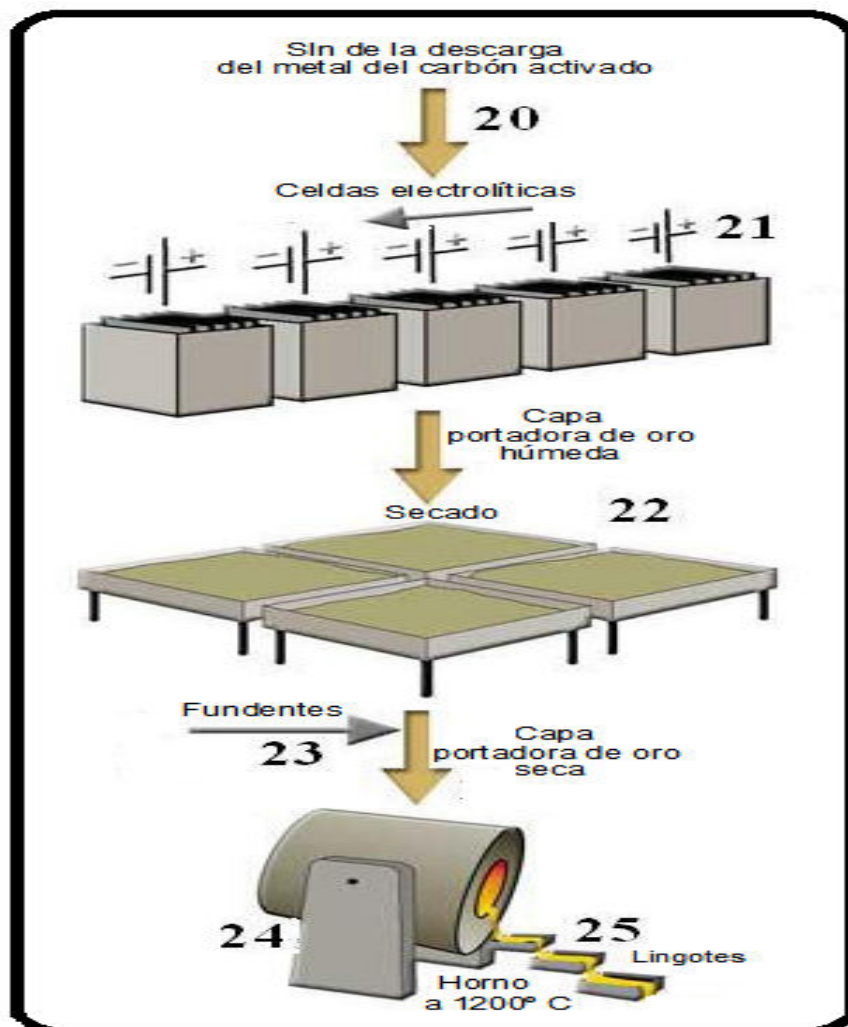
Cuando la solución llega al último tanque, se supone descargada de oro, por lo que es entonces bombeada hacia una balsa de estériles, mientras que las partículas de carbón, con el oro adsorbido en su superficie son llevadas al circuito de elución donde el metal noble es recuperado mediante la aplicación de vapor de agua y finalmente conducido a los circuitos de afino mediante un proceso electrolítico. La solución residual portadora de carbón es reactivada de nuevo mediante un lavado ácido y recirculada al circuito de adsorción.

5.1.3. Refinación final. La solución resultante de la descarga del metal del carbón activado se pasa a través de varias celdas electrolíticas a cuyos cátodos migra el oro; los cátodos son descargados de la capa formada con agua y reutilizados. La capa portadora de oro es secada y el material resultante mezclado con compuestos fundentes y llevado a un horno a 1200° C; tras varias horas en su interior, la colada resultante se vierte en moldes donde se solidifica en lingotes de una pureza superior al 99%.³ El diagrama de flujo de esta parte del proceso de refinación de oro se muestra en *la Figura 3*.

5.1.4 Hidrometalurgia. Denominación dada al conjunto de técnicas que emplean soluciones acuosas para la extracción y recuperación de metales. En casi todas las plantas de refinación de oro se emplean estas técnicas cuyas principales etapas son: la lixiviación, la purificación y/o concentración de la solución y la recuperación del oro.

³ Sancho et al., 2000.

Figura 3. Procesos térmicos: refinación final



Fuente. ALVAREZ, Rodrigo. 2005.

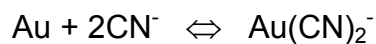
La extracción hidrometalúrgica resulta un proceso que se torna complejo debido a la diversidad de especies presentes en el mineral a tratar y a la heterogeneidad de las soluciones resultantes tras la extracción. El éxito de estos procesos radica en

encontrar el punto óptimo de equilibrio para la reacción de interés y tener control sobre la cinética de dicha reacción.

Como agente lixiviador, la industria aurífera moderna utiliza principalmente el cianuro de sodio; se ha probado otros agentes complejantes como la tiourea, los cloruros y algunos haluros, pero generalmente no han resultado rentables y además presentan problemas particulares para el medioambiente y la salud. Los complejos de cianuro son más estables y eficaces y no requieren el empleo de otras sustancias químicas agresivas para realizar la recuperación del oro.

5.1.4.1 Lixiviación. La reacción de interés en este proceso implica la disolución de oro en una solución líquida, para lo cual se requiere dos agentes; un complejante y un oxidante. El cianuro es el complejante universalmente utilizado por su bajo costo y su gran avidéz por el oro, mientras que el oxidante comúnmente usado es el oxígeno proporcionado por el aire. Este proceso se puede realizar con los cianuros de sodio (NaCN), de potasio (KCN) y de calcio (Ca(CN)₂), siendo el más utilizado el NaCN.

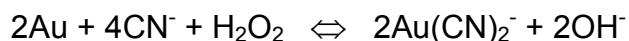
La reacción de disolución del oro se puede simplificar así: (reacción anódica):



La reducción del oxígeno se puede simplificar así: (reacción catódica)



Las reacciones anteriores (anódica y catódica) se resumen en las siguientes reacciones, que ocurren en paralelo.

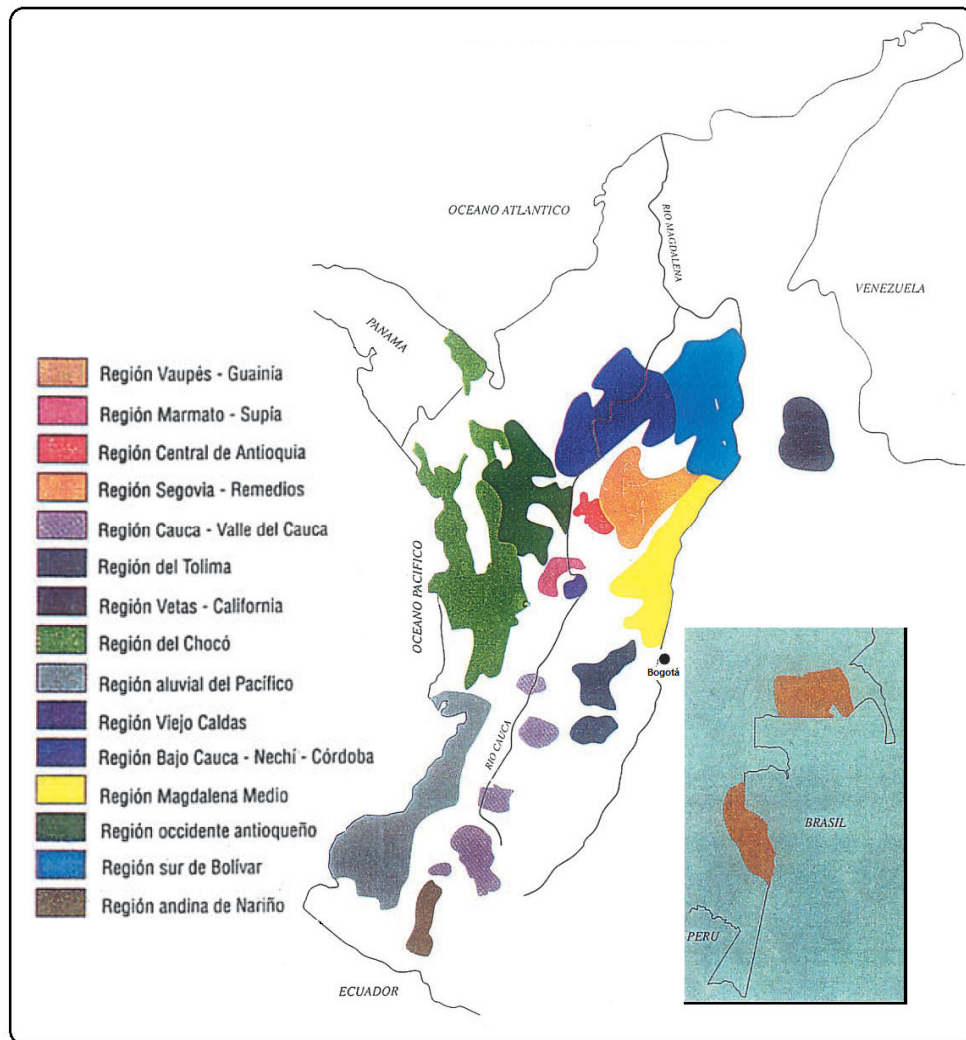


Las variables que afectan la cinética de la reacción son: las concentraciones de CN y O₂ en la solución, temperatura, pH, área específica de contacto, agitación y presencia o ausencia de otros iones en la solución.

5.2 LA MINERÍA AURÍFERA EN COLOMBIA

En Colombia se han identificado quince regiones auríferas en las cuales pueden ocurrir diez tipos de yacimientos auríferos; *la Figura 4* se muestra su ubicación en el mapa del territorio nacional y en *el Cuadro 1* se presenta una lista detallada.

Figura 4. Distritos auríferos en Colombia



Fuente. Recursos Minerales de Colombia. Instituto de Investigación e Información Geocientífica Minero Ambiental y Nuclear. Ministerio de Minas.

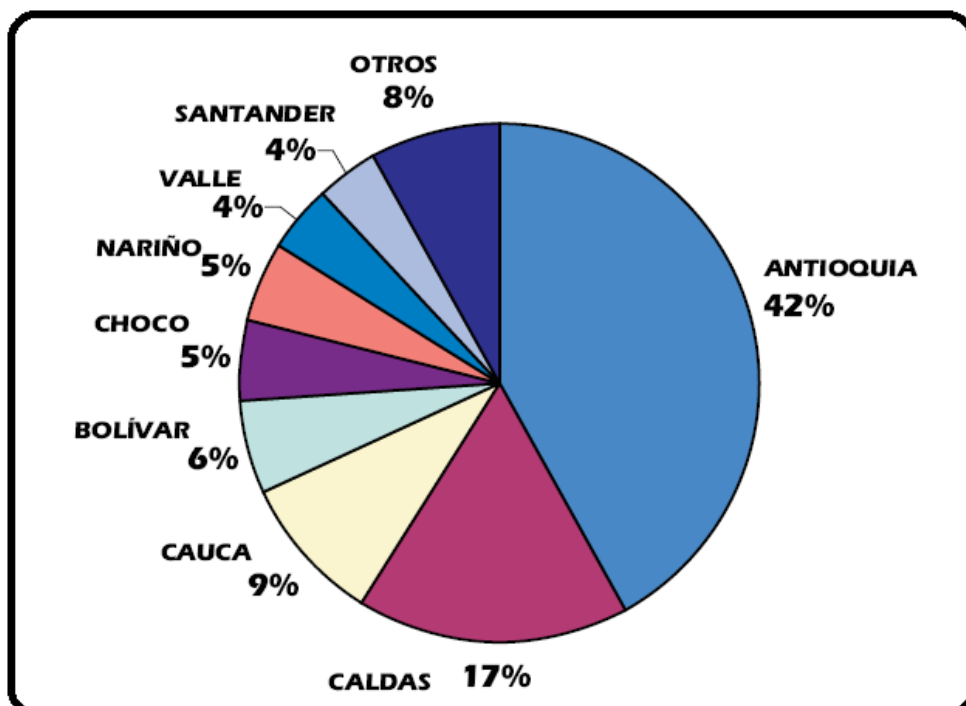
Cuadro 1. Regiones auríferas en Colombia

	Región	Distritos
Minería de Oro en Aluvión	Antioquia	Caucasia - Bagre - Nechí
		San Miguel- La Sierra
		Amalfi - Anorí
		Río Sucio
	Chocó	Atrato - San Juan
	Nariño	Barbacoas
	Tolima	Sotomayor
		Saldaña
	Bolívar	Animas Altas (Simití)
		San Pablo
Buena Señá (Río Viejo)		
Vaupés-Guanía	Naquén	
	Caramacoa	
	Teraira	
Minería de Oro en Filón	Antioquia (Oriental)	Zaragoza - Segovia - Remedios
		Puerto Berrio
	Antioquia (Central)	Murindó
		Titiribí
		Acandí (Chocó)
	Cordillera Occidental	Batolito de Mandé
		Páramo de Frontino
		Plateado
		Torrá - Tamaná
		Cumbiatara - Piedrancha
	Ibagué-Sonsón	Ibagué
		Sonsón
		El Hatillo - Florencia
		Cajamarca - Salento - El Salitre
	Cauca Romeral	Buga -El Retiro
		Almaguer
		Marmato - Caramanta
	Sur de Bolívar (Serranía San Lucas y Montecristo)	Río Viejo
		San Martín de Loba
		Barranco de Loba
Montecristo		
Santa Rosa del Sur		
Páramo de Santander	Morales	
	Vetas - California	

Fuente. Instituto de Investigación e Información Geocientífica Minero Ambiental y Nuclear. Ministerio de Minas. Recursos Minerales de Colombia.

5.2.1 Inventario minero colombiano. La minería aurífera colombiana se realiza en 18 departamentos, como se muestra en *la Figura 4*. Del total de explotaciones, 42% se ubican en el departamento de Antioquia, seguido por los departamentos de Caldas, Cauca, Bolívar, Chocó, Nariño, Valle del Cuaca y Santander, regiones que suman un 50% de explotaciones. Los restantes departamentos tan solo representan 8% del total de explotaciones, como se muestra en *la Figura 5*.

Figura 5. Explotaciones auríferas colombianas por departamento



Fuente. Inventario Minero Nacional. Instituto de Investigación e Información Geocientífica Minero Ambiental y Nuclear. Ministerio de Minas.

5.2.2 Sistemas de explotación. Del total de minas que se explotan en el país, el 72% corresponden a explotaciones a cielo abierto, lo cual implica una prevalencia de las explotaciones de filón en el país. Las explotaciones a cielo abierto predominan en Chocó, Valle, Tolima, Guainía y Putumayo.

5.2.3 Nivel de integración de operaciones. El inventario presenta tres niveles de integración: explotaciones que realizan únicamente el proceso de extracción; explotaciones que realizan la extracción y beneficio, explotaciones que realizan extracción, beneficio y transformación. Del total de explotaciones del país, el 81% realizan los procesos de extracción y beneficio y el 19%, realizan únicamente el proceso de extracción. No se reportan procesos de transformación, lo que muestra que los mineros no se interesan por darle valor agregado a la producción aurífera.

5.2.4 Rangos de explotación. La minería aurífera establece tres rangos de producción así: rango 1 (producción $\leq 0,05$ t/año), rango 2 ($0,05$ t/año \leq producción $\leq 1,0$ t/año) y el rango 3 (producción $\geq 1,0$ t/año). Con base en estos rangos, el 76% de la producción aurífera colombiana se clasifica en el rango 1, el 23% en el rango 2 y solo el 1% en el rango 3. Lo que confirma que la prevalencia aurífera en Colombia es la minería informal y la pequeña minería.

5.3 ETAPAS DE LA MINERÍA AURÍFERA PRACTICADA EN COLOMBIA

5.3.1. Exploración. Se basa en una serie de técnicas instrumentales y empíricas que permiten caracterizar adecuadamente un yacimiento. El resultado de esta etapa es la ubicación de áreas favorables para centrar estudios de prospección o para empezar la actividad extractiva de una manera debidamente planificada.

5.3.2. Prospección geoquímica. Consiste en el análisis de muestras de sedimentos de arroyos, de suelos o de plantas que puedan concentrar elementos químicos relacionados con una determinada mineralización.

5.3.3. Explotación. Debido a la diversidad de ambientes geológicos donde se encuentran las reservas auríferas del país, se presentan diferentes sistemas de aprovechamiento del mineral.

La adopción de una técnica de explotación de mineral depende de factores como: la profundidad, forma e inclinación de los depósitos, la distribución de leyes del

mineral, las características geomecánicas de las rocas encajantes y del propio mineral, las condiciones físicas y culturales de la zona, la magnitud de la operación, y la maquinaria utilizada. En el caso de la minería aurífera se utilizan variaciones de los sistemas de explotación como el subterráneo en la minería de filón y a cielo abierto en las explotaciones aluviales. La fase de explotación incluye las etapas de planeamiento y montaje, desarrollo, beneficio y cierre de mina.

5.3.3.1 Planeamiento y montaje. Comprende el conjunto de actividades que van desde la organización, diseño, establecimiento de infraestructura y equipos para adelantar la explotación del mineral. En el caso de la pequeña y mediana minería colombiana para el sistema aluvial y subterráneo esta etapa no se cumple en la gran mayoría de las regiones auríferas.

5.3.3.2 Desarrollo. Básicamente se emplean dos sistemas de explotación minera; estos sistemas presentan múltiples variantes que van desde el empleo herramientas menores en la minería artesanal, hasta el empleo de equipos sofisticados en la minería tecnificada.

➤ **Explotación aluvial.** Utiliza como métodos de extracción desde los más mecanizados con retroexcavadoras, buldócer, motobombas, dragas; hasta métodos artesanales con herramientas manuales como picas, barrenos y palas. Los métodos de arranque del mineral utilizados son generalmente artesanales, en donde la perforación se realiza en forma manual con herramientas menores (pica, pala, barreno) o mecanizada utilizando taladros mecánicos o neumáticos, excavadora hidráulica.

En la extracción artesanal, el cargue se realiza en forma manual en costales, carretillas y en algunos casos volquetas. Operaciones auxiliares, tales como el control de taludes, en la gran mayoría de los casos no se realiza, y cuando se hace no se aplican criterios técnicos. El tratamiento dado a los estériles, en la generalidad de las zonas, es la disposición como relleno en explotaciones antiguas aledaños a las áreas de explotación.

Para el control de aguas, en Antioquia se emplean motobombas; en el Chocó se construyen pozas de sedimentación, en Tolima se aplican métodos de recirculación y construcción de piscinas de sedimentación.

➤ **Explotación de filón.** Se adelanta mediante la apertura de zanjas, siguiendo el rumbo de los afloramientos o mediante túneles, cámaras y pilares, a tajo abierto. La apertura de sitios de extracción se realiza mediante voladuras con explosivos como: indugel, anfo o súper anfo. El arranque de mineral por lo general se hace de manera artesanal, haciéndose la perforación en forma manual con herramientas menores (pica, pala, barreno) o en forma mecanizada con taladros mecánicos/neumáticos o excavadora hidráulica.

En la extracción artesanal el cargue se realiza manualmente en costales, catangas o tolvas. El transporte se realiza utilizando elevadores, trenes eléctricos, vagonetas, o cable aéreo por gravedad. Las operaciones auxiliares asociadas al sostenimiento de túneles y socavones se realizan entibando con madera tipo puerta alemana, vigas y columnas.

La ventilación en las minas se realiza en forma natural, en la mayoría de los casos no existe ningún sistema de ventilación; en el caso de Antioquia y Santander se inyecta aire con ductos plásticos o por difusión. La iluminación dentro de las minas se hace mediante el empleo de electricidad, velas o lámparas de carburo.

No se realiza ningún control de aguas en las minas del Sur de Bolívar, Risaralda y Santander; en el departamento del Cauca, municipio de Buenos Aires se construyen pozas de sedimentación; en Antioquia, Chocó, Nariño, Putumayo, Tolima y Valle del Cauca, las aguas residuales mineras se controlan construyendo cunetas, drenando por gravedad, mediante bombeo, recirculando y construyendo piscinas de sedimentación.

El manejo y disposición de estériles se realiza sin tratamiento, en la mayoría de los casos se apilan en bocamina, campo abierto o cerca de las fuentes de agua, en algunas minas se utilizan como relleno de cámaras o huecos. El transporte utilizado para el personal tanto fuera como dentro de la mina es a pie o empleando animales.

5.3.4 Beneficio y transformación de minerales. Esta etapa tiene por objetivo aumentar el contenido metálico en concentrados de fácil manejo y mayor valor agregado. Por lo general se realiza en las áreas inmediatas a la explotación o en las cabeceras municipales e involucra las siguientes operaciones unitarias:

5.3.4.1 Clasificación de tamaño. En la pequeña minería se realiza de forma visual y manual utilizando zarandas, mallas o angeos, y en la mediana minería mediante el empleo de cribas, trómel o hidrociclones.

5.3.4.2 Trituración. Operación para adaptar el tamaño de la roca para la operación de molienda. En la minería artesanal se realiza de forma manual con porra, y en la mediana minería se utilizan trituradoras de mandíbula.

5.3.4.3 Molienda. Operación mecánica para reducir el tamaño de roca a un grado de liberación del mineral para ser recuperado gravimétricamente o por amalgamación. Este proceso se realiza en molinos de bolas o en molinos californianos.

5.3.4.4 Concentración. En minería de filón se realiza por métodos gravimétricos (mesa, batea, jig, canalón, etc.), métodos fisicoquímicos (flotación, aglomeración, floculación), métodos magnéticos y electrostáticos. En la pequeña minería aluvial se realiza empleando bateas, elevadores, canaletas, mesa de concentración; en explotaciones medianas emplean trampa hidráulica o concentrador centrífugo.

5.3.4.5 Amalgamación. En la minería aluvial, se efectúa en canalones con rifles en su fondo. El espacio entre las varillas se llena de mercurio sobre el que se pasa la pulpa mineral para que las partículas de oro sean atrapadas. Este proceso presenta pérdidas de mercurio cercanas al 30% p/p. En la minería de filón, la amalgamación se hace en simultáneo con la molienda; las pequeñas gotas de mercurio son arrastradas por los efluentes.

Otros equipos utilizados en esta operación son: barriles, tambores, botellas, placas amalgamadores, mesa y prensa de amalgama. Una vez lista la amalgama, se somete a la acción del fuego para evaporar el mercurio y recuperar el mineral, o se somete a un proceso de lixiviación con cianuro.

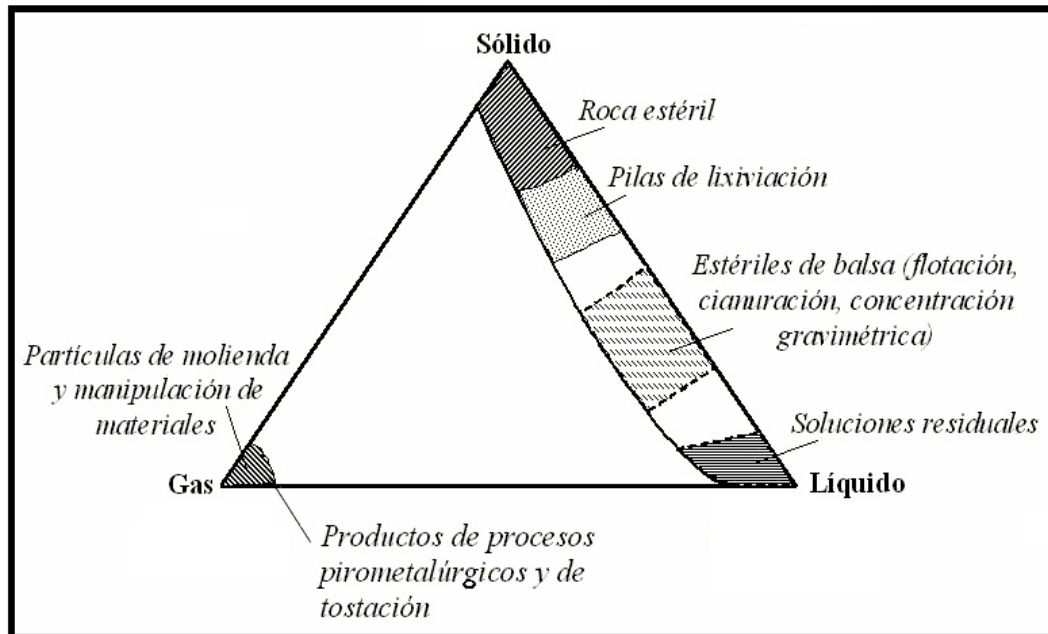
5.3.4.6 Lixiviación con cianuro. Las colas de la amalgamación se mezclan con cal hasta alcanzar un pH alcalino y se depositan en tinas de cianuración. El fondo de la tina contiene un medio filtrante que permite que la solución fluya por gravedad hacia cajas de precipitación con viruta de zinc, el precipitado de cianuración se pasa a un recipiente de acero donde se calcina a fuego lento para su fundición.

5.3.4.7 Fundición y purificación. El precipitado de la cianuración se somete a altas temperaturas (Aprox. 1300 °C) durante 2 a 3 horas, obteniéndose un botón de oro mezclado con otros metales, el cual se somete a un tratamiento con ácido nítrico o sulfúrico para cementar el oro y separarlo en una nueva fundición.

5.3.5 Cierre de mina. Finalizada la etapa productiva de la mina, se debe proceder a su clausura, lo cual implica el desmantelamiento y retiro de instalaciones, maquinaria y equipos, así como la ejecución de trabajos de recuperación y rehabilitación del área de explotación. En Colombia normalmente las minas son abandonadas sin la ejecución de medidas de recuperación, generando un verdadero problema ambiental.

5.3.6 Residuos generados en los procesos de extracción de oro. La extracción de oro genera gran variedad de productos residuales, algunos de ellos altamente tóxicos. Estos residuos se pueden clasificar como gases, sólidos, líquidos o sus mezclas, como se muestra en la Figura 6.

Figura 6. Residuos generados en los procesos de extracción de oro



Fuente. Marsden y House, 1993.

Los residuos generados en las actividades mineras requieren un adecuado tratamiento, debido principalmente a las siguientes razones.

- La recuperación y reutilización de reactivos que puede hacer el proceso más atractivo económicamente.
- Descontaminación de efluentes.
- Recuperación de otros metales de valor, como subproducto del proceso.

5.3.7 Problemática de la minería aurífera colombiana. La mayoría de los problemas de la actividad minera nacional derivan de la ausencia de las actividades de exploración, lo cual hace que la explotación no sea debidamente planificada y se presenten altas pérdidas de mineral, se trabaje en condiciones de inseguridad industrial y sobre todo, sin las mínimas medidas de protección ambiental.

5.3.7.1 Problemas en la etapa de explotación. Se originan daños al ambiente mediante la tala de bosques de los sitios de interés y con el retiro de la capa vegetal mediante maquinaria pesada; los materiales retirados son dejados a la deriva, lo que genera grandes aportes de material sedimentable a los ríos y afluentes cercanos.

➤ **Explotación de la minería de filón o veta.** Previo a la explotación, se hace un cateo y toma de muestras a las que se les realiza un somero análisis empírico. Luego se practica la apertura de túneles o socavones, los cuales por lo general carecen de medidas efectivas de sostenimiento, no cuentan con iluminación eléctrica ni adecuada ventilación; el trabajo dentro se hace por lo general de manera manual con el empleo de martillo, porra y cincel. En muchos casos se utilizan explosivos para realizar las voladuras poniendo en riesgo la vida del personal, dado que no se aplican medidas para el monitoreo y control de monóxido de carbono, gases sulfurosos y nitrosos propios de esta práctica.

➤ **Explotación aluvial.** En estas las explotaciones se succiona el material del lecho o las orillas de los ríos o quebradas con dragas o dragalinas. Esta práctica es altamente riesgosa para la integridad del buzo que direcciona la cabeza de la motobomba de succión de las draguetas, por posibilidad de quedar atrapado o sepultado por el material de trabajo. El beneficio del mineral se realiza simultáneamente a la explotación en el canalón el cual va montado en la misma dragueta, donde se deposita mercurio. Se produce alta contaminación al recurso hídrico y grandes pérdidas de oro fino.

En el Cuadro 2 se exponen los principales riesgos a los que está expuesto el personal en la etapa de explotación minera.

Cuadro 2. Principales riesgos para la salud en la explotación minera

Problema	Causas y efectos
Exposición al polvo	Se produce bajo tierra en las operaciones de perforación, arranque del mineral, carga, trituración de la roca y las voladuras. La exposición prolongada a estos excesos de polvo puede desencadenar enfermedades pulmonares crónicas, como la silicosis.
Escasa ventilación (calor, humedad, falta de oxígeno)	Error derivado de la falta de planificación para la apertura de socavones. Los efectos sobre la salud son: sensación de vértigo, desfallecimiento, respiración dificultosa, palpitaciones y sed extrema. Puede llevar a la pérdida de conciencia y posterior muerte.
Ruido y vibraciones	Las fuentes potenciales de emisión de ruido y vibraciones son los compresores, taladros, martillos perforadores y demás equipos mecánicos. La exposición repetida o prolongada a niveles excesivos de ruido conduce a un deterioro de la capacidad auditiva; y el personal estado expuesto de manera prolongada a las vibraciones pueden presentar síndrome de dedos blancos, el cual se manifiesta con un entumecimiento de los dedos y puede desencadenar en una gangrena.

Fuente. Producción más limpia en la minería del oro en Colombia. Subdirección de planeación minera. Bogotá. 2007.

5.3.7.2 Problemas en la etapa de beneficio de oro. Los entables o beneficiaderos de oro son construidos en el mismo sitio de la explotación junto a los campamentos, casetas de explosivos y talleres; por lo general cerca de las fuentes hídricas.

Los entables son equipados con tolvas, trituradoras, molinos y cribas para reducir el tamaño del material y separar el fino del grueso; el material fino pasa por canalones de madera o metal con fondos de mallas de fique y trampas donde se agrega mercurio para amalgamar el oro. Los residuos son dispuestos

directamente a los ríos y quebradas cercanas, con contenidos importantes de oro y mercurio.

En las fases de amalgamación, fundición y refinación se producen emisiones vapores de mercurio, especialmente cuando se realiza quema abierta. La contaminación con mercurio se da tanto en el recurso hídrico, como en el aire y suelo por diversas causas, como se muestra en *el Cuadro 3*.

Cuadro 3. Recursos naturales contaminados con mercurio

Recurso contaminado	Fuentes de contaminación
Agua	Trituración y/o molienda defectuosa, uso indiscriminado de mercurio en canalones, lavado de barriles, lodos residuales contaminados, relavado de arenas amalgamadas y cianuración de arenas residuales de amalgamación.
Aire	Mala disposición de arenas amalgamadas y relavado de arenas amalgamadas.
Suelo	Quema defectuosa de amalgamas o sin ninguna técnica, almacenamiento y manipulación incorrecta del mercurio y fugas de vapor en barriles.

Fuente. Producción más limpia en la minería del oro en Colombia. Subdirección de planeación minera. Bogotá. 2007.

El mercurio emitido se acumula, en forma de mercurio metálico y compuestos en los sedimentos de los ríos y los suelos donde por acción bacteriana y bajo ciertas condiciones puede convertirse en mercurio orgánico (metilmercurio o dimetilmercurio), sustancia altamente tóxica para el hombre, fauna y flora. *La Figura 7* muestra el mal manejo del mercurio de la minería tanto de aluvial como de filón.

Figura 7. Mala manipulación del mercurio en la minería aurífera



Fuente. Producción más limpia en la minería del oro en Colombia. Subdirección de planeación minera. Bogotá. 2007.

Otra de los problemas en el beneficio del oro se da en la lixiviación con cianuro, el cual al ser empleado sin las debidas precauciones, puede constituir una alta fuente de contaminación tanto para el hombre como para el ecosistema. En la mayoría de las minas las condiciones de seguridad son nulas o mínimas; no se emplean elementos de protección personal, no existe señalización preventiva ni se cuenta con botiquines ni antídotos contra el cianuro y otros tóxicos.

En resumen, los principales problemas que afectan la minería aurífera en pequeña escala, son derivados de patrones culturales (se utiliza en mercurio más por costumbre que por necesidad) y la falta de capacitación (se adolece de prácticas de producción limpia); estas debilidades se reflejan en:

- Desgaste físico del personal debido al intensivo trabajo manual.
- Bajo nivel de seguridad industrial y salud ocupacional.
- Daños a la salud y al medio ambiente por la manipulación inadecuada del mercurio, cianuro y otros elementos de alta toxicidad.

6. MARCO LEGAL

6.1 TRATADOS INTERNACIONALES RATIFICADOS POR COLOMBIA⁴

- **Pacto internacional de derechos sociales, económicos y culturales.**
Artículo 11: derechos derivados del derecho a tener un nivel de vida adecuado, incluso alimentación, vestido y vivienda y Artículo 12: derecho al más alto nivel posible de salud.
- **Declaración de Rio sobre el medio ambiente y el desarrollo.** Cuyo objetivo es establecer una alianza mundial nueva y equitativa mediante la creación de nuevos niveles de cooperación entre los Estados, los sectores claves de la sociedad y las personas.
- **Observación número 15 efectuada por el comité de derechos económicos sociales y culturales, en el 29º período de sesiones en Ginebra.** se expresaron los fundamentos jurídicos sobre el derecho al agua, así: “El agua es un recurso natural limitado y un bien público fundamental para la vida y la salud. El derecho humano al agua es indispensable para vivir dignamente y es condición previa para la realización de otros derechos humanos”. El derecho humano al agua es el derecho de todos a disponer de agua suficiente, salubre, aceptable, accesible y asequible para el uso personal y doméstico.
- **Acuerdo para la creación del Instituto Interamericano para la investigación del cambio global.** Ratificado por Colombia mediante la Ley 304 del 5 de agosto de 1996 cuyo objetivo es promover la cooperación regional

⁴<http://www.dnp.gov.co/PortalWeb/Programas/ViviendaAguayDesarrolloUrbano/MedioAmbiente/Conveniosinternacionalesobremedioambientesus.aspx>

para la investigación interdisciplinaria sobre aspectos del cambio global relacionados con la tierra, el mar, la atmósfera y el medio ambiente y el efecto sobre los ecosistemas y biodiversidad. Mejorar la capacidad científica, técnica e infraestructura de investigación de los países de la región.

6.2 CONSTITUCIÓN POLÍTICA NACIONAL DE 1991 (CP)⁵

La Constitución Política de Colombia promulgada en 1991 consagra más de 60 artículos a la protección del medio ambiente y el desarrollo sostenible.

- **Preámbulo.** Se consagra el derecho a la vida humana como bien supremo de nuestra sociedad, cuyo deber de garantía se erige como valor superior de la organización política imperante en el Estado Colombiano en cuya salvaguarda deben concurrir tanto particulares como autoridades públicas.
- **Artículo 8.** Establece como obligación del Estado y de las personas proteger las riquezas culturales y naturales de la Nación.
- **Artículos 11 y 13.** Establecen el derecho a la vida como inviolable y la obligación para el Estado de protegerlo. La Corte Constitucional ha sido insistente al decir que el derecho a la vida debe mirarse en sentido amplio, entendida la connotación de existencia en condiciones dignas, es decir atendiendo el conjunto de circunstancias mínimas inherentes al individuo que le permitan vivir con dignidad -lo menos penosa posible- acorde con su naturaleza de ser humano.
- **Artículos 93 y 94.** En virtud de los cuales se acoge como criterio de interpretación válido los tratados internacionales ratificados por Colombia y en especial, la Observación No. 15 del pacto internacional de derechos

⁵http://wsp.presidencia.gov.co/Normativa/Documents/ConstitucionPoliticaColombia_20100810.pdf

económicos sociales y culturales y en consecuencia debe considerarse como un derecho social autónomo, y deben incorporarse en el ordenamiento jurídico interno los instrumentos internacionales en los que se reconoce el derecho al agua, ampliando considerablemente el alcance y la eficacia de las medidas correctivas.

- **Artículo 58, inciso 2.** Establece que la propiedad es una función social que implica obligaciones. Como tal, le es inherente una función ecológica.
- **Artículo 65.** La producción de alimentos gozará de la especial protección del Estado. Para tal efecto, se otorgará prioridad al desarrollo integral de las actividades agrícolas, pecuarias, pesqueras, forestales y agroindustriales.
- **Artículo 79.** Todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano. Es deber del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica.
- **Artículo 80.** Establece que el Estado planificará el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución y que además, deberá prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental, imponer las sanciones legales y exigir la reparación de los daños causados.
- **Artículo 95, numeral 8.** Establece como deber de la persona y del ciudadano, proteger los recursos culturales y naturales del país y velar por la conservación de un ambiente sano.
- **Artículo 334.** La dirección general de la economía estará a cargo del Estado. Este intervendrá, por mandato de la ley, en la explotación de los recursos

naturales, en el uso del suelo, en la producción, distribución, utilización y consumo de los bienes.

- **Artículo 366.** El bienestar general y el mejoramiento de la calidad de vida de la población son finalidades sociales del Estado. Será objetivo fundamental de su actividad la solución de las necesidades insatisfechas de salud, de educación, de saneamiento ambiental y de agua potable.

6.3 LEYES Y DECRETOS⁶

- **Ley 9 de 1979.** Por la cual se dictan medidas sanitarias. Se establecen los parámetros generales de protección al medio ambiente, en temas como residuos líquidos, residuos sólidos, disposición de excretas, emisiones atmosféricas y áreas de captación.
- **Decreto 2104 de 1983.** Por el cual se reglamenta parcialmente el Título III de la Parte IV del Libro I del Decreto Ley 2811 de 1974 y los Títulos I y XI de la Ley 9 de 1979 en cuanto a residuos sólidos: almacenamiento, recolección, transporte, disposición sanitaria y demás aspectos relacionados con las basuras, cualquiera sea la actividad o el lugar de generación.
- **Decreto 1594 de 1984.** Derogado parcialmente por el Decreto 3930 de 2010 y por el Decreto 1575 de 2007, por el cual se reglamenta parcialmente la Parte III del Decreto 2811 de 1974, en cuanto a usos del agua y el manejo de los residuos líquidos.
- **Decreto 2655 de 1988.** Código de minas, derogado por la Ley 685 de 2001.
- **Ley 99 de 1993.** Por el cual se establecen los Principios Generales Ambientales que orientan la política ambiental colombiana.

⁶<http://www.lexbasecolombia.info/>

- **Decreto 1753 de 1994.** Derogado parcialmente por los decretos 1892 de 1999 y por el Decreto 1791 de 1996. Por el cual se reglamenta parcialmente la Ley 99 de 1993 en cuanto a las licencias ambientales.

- **Decreto 948 de 1995:** Adicionado por el Decreto 789 de 2010, derogado parcialmente por la Ley 1333 de 2009. Define el marco de las acciones y mecanismos administrativos de las autoridades ambientales para mejorar y preservar la calidad del aire.

- **Decreto 501 de 1995.** Por el cual se reglamenta la inscripción en el Registro Minero de los Títulos para la Exploración y Explotación de Minerales de Propiedad Nacional.

- **Decreto 1178 de 1999.** Por el cual se reestructura la Comisión Nacional de Regalías. Declarado inexecutable a través de la Sentencia C-722 de 1999.

- **Ley 685 de 2001.** Por la cual se expide el Código de Minas y se dictan otras disposiciones.

- **Decreto 1728 de 2002.** Por el cual se reglamenta el Título VIII de la Ley 99 de 1993 sobre la Licencia Ambiental.

- **Decreto 1729 de 2002.** Regula el uso adecuado del territorio para su apropiado ordenamiento y manejo de cuencas hidrográficas, allí se dispone lo relacionado con el plan de ordenamiento: su elaboración, ejecución y fuentes de financiación.

- **Decreto 1993 de 2002.** Por el cual se establece el Sistema de Información Minero Colombiano, SIMCO.

- **Decreto 3100 de 2003.** Derogado parcialmente por el Decreto 2570 de 2006 y modificado por el Decreto 3440 de 2004, por medio del cual se reglamentan las tasas retributivas por la utilización directa del agua como receptor de los vertimientos puntuales y se toman otras determinaciones.

- **Ley 1333 de 2009.** Por la cual se establece el procedimiento sancionatorio ambiental y se dictan otras disposiciones.

- **Decreto 3930 de 2010.** Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9ª de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II del Decreto-ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones.

- **Ley 1382 de 2010.** Por la cual se modifica la Ley 685 de 2001 Código de Minas. Fue declarada inexecutable por la Corte Constitucional, según Sentencia C-366-11; la cual decidió diferir los efectos de inexecutable por un lapso de dos años, esto como una medida para salvaguardar los recursos naturales y las zonas de especial protección ambiental mientras se salvan los vicios encontrados en la aprobación de la mencionada ley.

- **Proyecto de Ley minera.** Actualmente en el ministerio de minas se está elaborando un proyecto de ley que busca poner fin al limbo jurídico en que quedó el sector minero después de declararse inexecutable la Ley 1382 de 2010.

7. IMPACTOS DE LA ACTIVIDAD AURÍFERA

En gran parte de las regiones productoras colombianas y sus áreas de influencia se ha generado tradicionalmente, desde el punto vista ambiental, una minería de alta presión sobre los recursos naturales con grave repercusión sobre los ecosistemas y las comunidades que dependen de éstos. De otra parte, los procesos y actividades que conllevan la explotación aurífera, permiten tipificar los impactos y riesgos sobre los diferentes componentes ambientales, los cuales varían dependiendo de las condiciones biofísicas y socioeconómicas de las regiones, el sistema de explotación de aluvión o de filón, los métodos y tecnologías empleadas.

7.1 IMPACTOS SOCIALES

La mayor parte de la producción nacional de oro proviene de la pequeña y mediana minería, cuyas explotaciones en la mayoría de las regiones son de tipo artesanal de subsistencia o de minería ilegal denominada “minería nómada”, realizada individualmente o por pequeños grupos que operan al margen de la ley. Predomina el empleo de métodos anticuados y de bajo rendimiento que generan desperdicio de mineral y graves impactos al medio ambiente, lo cual repercute en el deterioro de la calidad de vida de estas comunidades.

En la mayoría de los casos, la población que se dedica a las labores auríferas está conformada por campesinos, colonos, indígenas de la región, los cuales devenga su sustento de la práctica de las actividades de explotación minera. Las actividades económicas alternativas a la minería en estas regiones giran en torno a la agricultura, ganadería, explotación de madera y en algunos casos los cultivos ilícitos.

7.1.1 Impactos a la población. Tanto la población dedicada a la actividad aurífera, como la población vecina a las zonas de explotación aurífera, resultan afectadas en sus aspectos estructurales, su entorno territorial y su sistema económico. En *el cuadro 4* se describe este tipo de impactos. En general, estas poblaciones presentan precarias condiciones de salubridad, mínima cobertura de servicios públicos y bajo nivel educativo; la presencia del estado es casi nula.

Cuadro 4. Impactos sociales de la actividad aurífera en Colombia

Impacto	Razón
Aspectos estructurales	Las explotaciones auríferas desencadenan procesos migratorios de población hacia las áreas de explotación, conllevando la demanda de bienes y servicios, generación de empleo, conflictos, cambios en el comportamiento, forma de vida, patrones y costumbres y demás factores socio-culturales.
Sistema económico	El desarrollo de la actividad extractiva se manifiesta en el aspecto económico por las relaciones de dependencia económica en diferentes sectores productivos, ya sea a escala local o regional, con indicadores de generación de empleo, directo e indirecto: valor agregado generado por la actividad: infraestructura y equipamiento.
Entorno territorial	Las actividades económicas tradicionales en dichos entornos pueden ser sustituidas parcial o totalmente y generar en la mayoría de los casos falsos desarrollos.
La salud humana	Se impacta directamente por la contaminación generada en los y procesos mineros, especialmente por el uso de metales pesados y elementos tóxicos en el proceso de amalgamación y beneficio e indirectamente por la inadecuada disposición de residuos y estériles.

Fuente. Diagnóstico y proyecciones de la gestión minero ambiental para las regiones auríferas de Colombia. Ministerio del medio ambiente.2002.

7.2 IMPACTOS AMBIENTALES

La minería aurífera es una actividad altamente riesgosa tanto para la salud humana como para el medio ambiente, debido principalmente al uso de sustancias químicas contaminantes, y el vertimiento de residuos a los cuerpos de agua.

7.2.1 Impactos al recurso hídrico. Los grandes volúmenes de agua que demanda la actividad aurífera y las consiguientes descargas con altos niveles de contaminación, contribuyen al deterioro de los cuerpos de agua superficiales y subterráneos. En el Cuadro 5 se muestran los principales impactos al recurso hídrico.

Cuadro 5. Impactos de la actividad aurífera nacional sobre el recurso hídrico

Impacto	Fuentes
Afectación de la disponibilidad del recurso	Se ocasiona por la intercepción de las corrientes y de las aguas lluvias, y por la inadecuada disposición de estériles y residuos provenientes de la actividad.
Deterioro de Ecosistemas acuáticos	Se produce por disposición de sedimentos y vertimientos con alto contenido de metales pesados resultantes de la explotación aurífera.
Deterioro de la calidad del agua	Originado por el aporte de sedimentos, cargas orgánicas y químicas tales como: drenajes ácidos, grasas y aceites, metales e hidrocarburos, que deterioran las condiciones físico-químicas y biológicas de las fuentes hídricas.
Generación de drenajes ácidos	Ocasionado en las operaciones de excavación, las cuales exponen los drenajes ácidos generados en los procesos de meteorización de sulfuros y azufre presentes en los yacimientos.
Contaminación con metales	Causada tanto por la generación de drenajes ácidos, como por los efluentes de los procesos de lixiviación y amalgamación con cianuro y mercurio respectivamente.
Descarga de sedimentos	Se produce en las operaciones de arranque del mineral, disposición de residuos, estériles y por procesos erosivos desencadenados por la actividad.
Descargas con hidrocarburos	Se genera por la manipulación de gasolina, diesel y lubricantes requeridos para la operación de maquinarias y equipos.
Disposición de grasas y aceites	Se genera en la operación de maquinaria como dragas, motobombas y equipos, así como su mantenimiento, especialmente con la inadecuada disposición de los efluentes provenientes de talleres y zonas de lavado.
Disposición de Cargas orgánicas	Provenientes de instalaciones sanitarias de las explotaciones, que pueden ocasionar Eutroficación y contaminación de acuíferos, corrientes superficiales y suelos.

Fuente. Diagnóstico y proyecciones de la gestión minero ambiental para las regiones auríferas de Colombia. Ministerio del medio ambiente.2002.

7.2.2 Impactos atmosféricos. En las regiones auríferas se produce un deterioro de la calidad del aire, causado principalmente por las emisiones de gases, vapores, ruido y material particulado. En *el Cuadro 6* se describen estos impactos.

Cuadro 6. Impactos atmosféricos causados por la actividad aurífera nacional

Impacto	Fuentes
Emisión de material particulado	Operaciones de perforación y arranque del mineral, las áreas de apilamiento, disposición de estériles y el tráfico de vehículos.
Emisión de gases y vapores	Gases originados en el tráfico vehicular y por equipos operados con combustibles fósiles. Generación de gases y vapores en los procesos de amalgamación y fundición con mercurio y cianuro.
Generación de ruido	Operación de maquinaria, equipos y el tráfico vehicular.

Fuente. Diagnóstico y proyecciones de la gestión minero ambiental para las regiones auríferas de Colombia. Ministerio del medio ambiente.2002.

7.2.3 Impactos al suelo. Las actividades auríferas afectan al suelo desde sus actividades preliminares, por el descapote para la preparación del sitio y la instalación de campamentos, bodegas, talleres, etc. Los principales impactos ambientales sobre el suelo y el paisaje mostrados en *el Cuadro 7*, se manifiestan en la pérdida de su capacidad productiva y las restricciones para su uso.

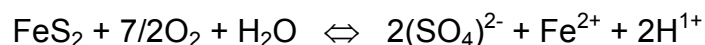
Cuadro 7. Impactos sobre el suelo, el paisaje y los ecosistemas terrestres

Impacto	Fuentes
Afectación al Suelo	Producido por el movimiento de maquinaria, la remoción y apilamiento de material, el uso de terrenos para la disposición de estériles.
Deterioro del paisaje	La presencia de los enclaves mineros en las explotaciones a cielo abierto y las áreas mineras abandonas, generan contaminación visual al paisaje, contribuyendo al desmejoramiento en la calidad de vida para los residentes y vecinos del área de explotación.
Destrucción de ecosistemas	Los ecosistemas terrestres resultan afectados por la modificación o destrucción de hábitats, que ocasionan la migración de la fauna y la extinción de especies nativas de fauna flora.

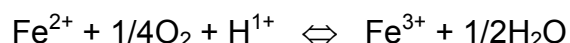
Fuente. Diagnóstico y proyecciones de la gestión minero ambiental para las regiones auríferas de Colombia. Ministerio del medio ambiente.2002.

7.3 FORMACIÓN Y ORIGEN DE MINAS ÁCIDAS DAM

Generalmente el oro se encuentra acompañado de minerales sulfurosos de bismuto, antimonio, arsénico, pirita y calcopirita e impurezas como cobre, plomo y zinc; los cuales producen acidez al entrar en contacto con el agua y el aire. La producción de acidez se da principalmente cuando pirita (sulfuro de pirita), entra en contacto con el aire, generando los iones: ferroso, sulfato, y el catión de hidrógeno⁷. La reacción se puede simplificar así:



Posteriormente el ion ferroso reacciona con el oxígeno para formar el ión férrico así:



Las principales fuentes de minas ácidas son los drenajes de minas subterráneas, el bombeo de minas activas, la escorrentía a cielo abierto, los lixiviados de los escombros y residuos que forman sedimentos.

Cuando las minas ácidas alcanzan las aguas limpias las contaminan en acidez, sulfatos y metales pesados; si hay infiltraciones las DAM contaminan las aguas subterráneas.

7.3.1 Tratamiento y restauración de afluentes líquidos contaminados con drenajes ácidos de minas, DAM. Las estrategias para contrarrestar la contaminación del agua causada por los drenajes ácidos de mina se centran en tres grandes líneas de acción, que son:

⁷ Kleiman et al., en 1981

- Tratamiento de efluentes ácidos producidos en minas activas.
- Tratamiento de efluentes ácidos producidos por minas clausuradas.
- Implementación de medidas de producción limpia enfocadas a la prevención y control de procesos de explotación y beneficio del mineral.

En el capítulo 8 se exponen las técnicas desarrolladas para la descontaminación de efluentes derivados de la minería, tanto para minas activas como para minas clausuradas; sin embargo, la mejor opción es la implementación de medidas de producción limpia, las cuales ayudan a prevenir la contaminación derivada de estas actividades, en el capítulo 9 se mencionan algunas de estas medidas.

8. DESCONTAMINACIÓN DE EFLUENTES DE PROCESOS MINEROS

Para la descontaminación de los efluentes del proceso de refinación del oro se manejan los métodos activos y pasivos, los cuales pueden ser aplicados de manera independiente o acoplados para alcanzar las metas de descontaminación.

8.1 MÉTODOS PASIVOS DE DESCONTAMINACIÓN DE EFLUENTES

Los sistemas de tratamiento pasivo, se definen como la mejora de la calidad del agua mediante el empleo de fuentes energéticas derivadas de procesos naturales (energía solar, fotosíntesis, energía metabólica, fuerzas gravitatorias, etc.), en sistemas que no demanden un mantenimiento frecuente para operar eficazmente.

El objetivo de los sistemas de tratamiento pasivo es intensificar los procesos naturales de mejora de la calidad de las aguas, para que estos procesos ocurran dentro del sistema de tratamiento y no en las aguas receptoras. Los factores determinantes para alcanzar este objetivo son: la cinética de los procesos de eliminación y/o transformación de contaminantes y el tiempo de retención dentro del sistema de tratamiento.

8.1.1. Sistemas de medio inorgánico (IMPS). Estos sistemas consisten en realizar cambios en la composición química de la solución a descontaminar mediante la precipitación y/o disolución de algunas especies minerales. Los métodos más comunes están basados la disolución de caliza; proceso con el que se logra ajustar el pH, neutralizar la acidez y añadir alcalinidad a la solución.

- **Cascadas de aireación.** Consiste en una serie de escalones a través de los cuales la solución fluye por gravedad; esta alternativa se fundamenta en que

el flujo de solución se rompe en láminas finas cada escalón, lo que proporciona mayores áreas de contacto aire-solución, maximizándose la transferencia de oxígeno a la solución. Para asegurar buenos resultados del proceso, es recomendado una anchura de escalón de 10 cm por cada l/s de caudal a tratar.

El diseño de cascadas de aireación es aún objeto de investigación, se recomienda evitar cascadas muy largas para evitar la formación y acumulación de precipitados, así mismo, se recomienda su construcción con materiales sulfatoresistentes, los cuales son fáciles de limpiar.

- **Canales anóxicos de caliza (ALD).** Consiste de un canal anóxico relleno de fragmentos de caliza cuyo diámetro promedio oscila entre 50 y 75 mm,⁸ por el que se hace pasar la solución a tratar con el fin de disolver la caliza, generar alcalinidad y neutralizar la acidez protónica, mediante la acción combinada de los iones carbonato y bicarbonato. También se pueden emplear otros compuestos como generadores de alcalinidad como silicato, carbonato y bicarbonato, fosfato, amonio, borato, y ligantes orgánicos.⁹

El interior del canal debe mantener condiciones reductoras para que los metales polivalentes se mantengan en su forma reducida, y así evitar la formación de hidróxidos y su respectiva precipitación. Se recomiendan tiempos de residencia de 14 horas y no tratar efluentes con más de 1 mg/l de oxígeno disuelto o con más de 2 mg/l de Al^{3+} y/o Fe^{3+} para evitar la colmatación del sustrato.

- **Canales calizos en condiciones oxidantes (OLDS).** Representan una alternativa a los ALDS; el mecanismo de los OLDS se basa en mantener un

⁸ PIRAMID Consortium, 2003.

⁹ Hem, 1985.

flujo rápido (> 0.1 m/min) de la solución en el interior del sistema, para que los hidróxidos de Fe y Al se mantengan en suspensión y abandonen el lecho sin ser retenidos en el mismo, evitando así su colmatación; para retener estos hidróxidos se instala un decantador a la salida del sistema. Las condiciones de diseño de los OLDS son similares a las de los ALDS, solo que se deben mejorar las condiciones hidráulicas a fin de proporcionar una mayor velocidad de la solución a través del lecho.

8.1.2 Sistemas tipo humedal. Son las tecnologías pasivas más empleadas para el tratamiento de aguas de mina, por razones tanto económicas como ambientales. Existen cuatro variantes de este tipo de sistemas.

- **Sistemas reductores y generadores de alcalinidad (RAPS).** Estos sistemas aparecen como una alternativa a los sistemas ALD cuyas aplicaciones son restringidas a efluentes con bajos contenidos de, Fe^{3+} , Al^{3+} y oxígeno disuelto. Básicamente, un RAPS consiste en un ALD recubierto con una capa de compost cuya función es reducir los cationes de Fe^{3+} a Fe^{2+} y disminuir el oxígeno disuelto, antes de que la solución a tratar entre en contacto con las partículas de caliza.

El diseño de los sistemas tipo RAPS¹⁰ consiste en dimensionar la capa del material generador de alcalinidad para un tiempo de residencia de la solución de aproximadamente 14 horas. Este volumen se sitúa dentro de un cuerpo de arcilla compacta para impedir la infiltración en profundidad; se recomienda un espesor mínimo de 0,5 m para la capa de compost.

Estos sistemas suelen ser mucho más eficiente que los humedales de sustrato orgánico y logran reducciones de acidez de hasta 40 g/día·m², siendo el rango habitual entre 25 y 30 g/día·m².

¹⁰ Watzlaf et al., 2004.

- **Celdas de sedimentación.** Consiste en un sistema sencillo similar al de los sedimentadores utilizados en el tratamiento de agua potable, cuyo criterio de diseño se simplifica en proporcionar un área de sedimentación adecuada en relación con el caudal de tratamiento. Se recomiendan tiempos de residencia entre 3 a 5 días; el área de sedimentación se puede determinar con la siguiente expresión ($A_{sp}=100.000*Q_d$), donde A_{sp} es el área de la balsa en m^2 y Q_d el caudal de diseño en m^3/s .
- **Humedales aerobios.** Se trata básicamente de una celda que contiene una capa de algún sustrato generalmente orgánico sobre el cual se plantan especies vegetales resistentes a las condiciones de la solución a tratar y que tengan un papel activo en el proceso depurador; el agua a tratar se hace circular superficialmente con una lámina de unos 15 a 25 cm. Las especies vegetales, además de ayudar a la sedimentación de metales, provocan una circulación lenta del flujo, favoreciendo la eliminación de metales mediante lentas reacciones químicas y biológicas.

Este tipo de sistemas solamente es apto para soluciones netamente alcalinas ($pH > 6$). Para el tratamiento de un agua ácida por ésta vía, se requiere un pretratamiento para neutralización.

- **Humedales de sustrato orgánico: wetlands.** Dada la limitación que ofrecen los humedales aerobios en lo referente al pH del efluente a tratar, se han probado diferentes tipos de sustratos como: estiércol de vaca y/o de caballo, mezclados con residuos vegetales, residuos de plantas depuradoras de agua y residuos orgánicos derivados de la industria del papel, los cuales han dado buenos resultados tras algunas ligeras modificaciones de diseño.

Para el diseño de un wetland se aplica el mismo criterio de los humedales aerobios para determinar el área superficial, pero el espesor del sustrato cambia a valores cercanos a los 50 cm, y el uso de especies vegetales es opcional. Con estos espesores de sustrato orgánico se favorece la actividad bacteriana responsable de la reducción de los sulfatos, proporcionando condiciones de alcalinidad en forma de bicarbonato se contribuye a la eliminación de Fe y Zn en forma de sulfuros y del Mn en forma de óxido o carbonato. Parte del flujo en estos sistemas es superficial, lo que mantiene al sustrato en un continuo proceso de intercambio iónico y molecular con los solutos, a través de diversos mecanismos químicos.

La zona clave para el desarrollo de los procesos de eliminación de contaminantes es la interfase sustrato-solución, siendo la frontera mediante la cual entran en contacto la solución oxigenada que se va a descontaminar y la solución que satura el sustrato, que se encuentra en condiciones anaerobias.

8.1.3 Sistemas de flujo sub-superficial y actividad bacteriana sulfato-reductora.

- **Reactores anaerobios para el tratamiento de aguas de mina superficiales.**
Esta tecnología consiste en biorreactor al cual se alimenta la solución a tratar junto con microorganismos anaeróbicos, los cuales al hacer su digestión, eliminan los metales y sulfatos presentes en las aguas de mina. Se estiman tiempos de residencia entre 3 a 4 días.¹¹
- **Barreras reactivas permeables (PRB).** Consiste en un medio permeable situado transversal al flujo de la solución a tratar. Al atravesar la barrera, ocurren las reacciones químicas y/o biológicas responsables de la eliminación de contaminantes; así, tras atravesar la barrera, se mejora la calidad del agua. Esta tecnología también es actualmente objeto de investigación, dado que su

¹¹ Younger et al., 2002.

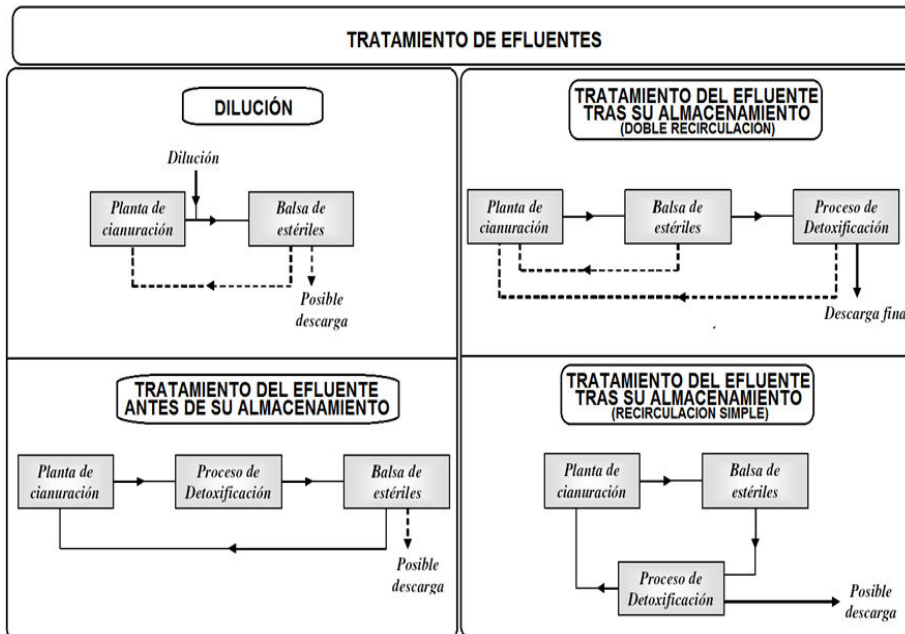
construcción y mantenimiento son muy delicados y su funcionamiento, hasta cierto punto, incierto.

8.2. MÉTODOS ACTIVOS DE DESCONTAMINACIÓN DE EFLUENTES

En contraste con los métodos pasivos, estos métodos se caracterizan por requerir fuentes artificiales de energía y/o reactivos químicos para mejorar de la calidad del agua. Entre los principales métodos se pueden mencionar: dilución, extracción de los productos tóxicos y la conversión de formas tóxicas a formas no tóxicas.

8.2.1 Dilución. Alternativa rápida para descontaminar un efluente; pero, aunque esta vía puede llevar la solución a valores de descarga permitidos, la cantidad total de tóxicos no se reduce, por lo que se recomienda solo como complemento de otros procesos. La *Figura 8* presenta un diagrama de este proceso.

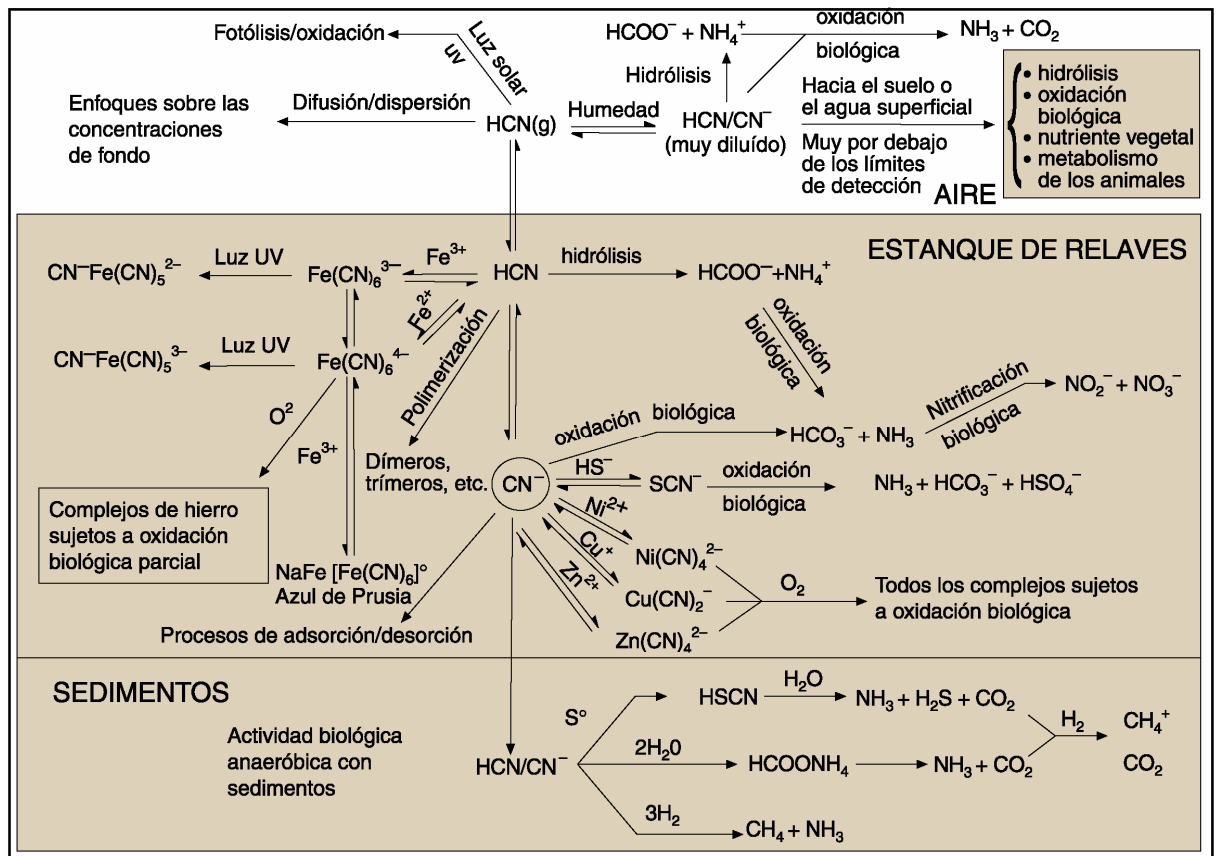
Figura 8. Métodos de detoxificación: dilución



8.2.2 Extracción de los productos tóxicos de la solución y conversión de formas tóxicas a formas no tóxicas. Los métodos de descontaminación de efluentes ricos en compuestos cianurados se pueden dividir en tres categorías: oxidación de fases cianuradas para formar compuestos menos tóxicos, eliminación de compuestos cianurados y complejación para formar fases menos tóxicas.

8.2.2.1 Degradación natural. Estos procesos reducen la toxicidad de los compuestos cianurados. Los principales mecanismos responsables de esta transformación son: volatilización, oxidación, adsorción, hidrólisis, biodegradación y precipitación (Ver esquema de estos procesos en la *Figura 9*). A pesar de su efectividad, la cinética de estos procesos los hace inapropiados para la industria.

Figura 9. Procesos de degradación de los compuestos cianurados



Fuente. Mudder, 1999.

Los mecanismos más importantes responsables de la degradación natural son:

- **Oxidación.** El oxígeno disuelto que pueda contener una determinada solución oxida el cianuro a cianato; el mecanismo que se cree responsable para explicar este fenómeno es la quimisorción de las moléculas de oxígeno en la superficie carbonosa provoca la formación de ácido carboxílico y peróxidos, compuestos que son más reactivos con respecto al cianuro que el oxígeno¹².

- **Degradación fotolítica:** La fotólisis es un proceso capaz de promover reacciones de oxidación/reducción proporcionando energía a partir de una radiación electromagnética que activa los procesos de transferencia de electrones,¹³ haciendo a éstos más aptos para participar en reacciones redox. La fotólisis directa no es eficaz para la eliminación del cianuro libre, pero se sabe que destruye algunos cianuros metálicos, tanto débiles como fuertes.

- **Volatilización.** El cianuro libre existe en solución acuosa en equilibrio con el ácido cianhídrico. Debido a su baja temperatura de volatilización (Aprox. 26°C) y su elevada presión de vapor (100 KPa a 26°C), el ácido cianhídrico se volatiliza desde la solución, diluyéndose en la atmósfera en fase gaseosa con la consiguiente detoxificación de la disolución. La volatilización del HCN desde la solución se puede incrementar mediante el descenso del pH, el aumento de la temperatura, con la presencia de catalizadores o con agitación de la solución.

Es común expresar la tasa de volatilización como vida media del cianuro libre presente en la solución, parámetro éste que puede variar desde unas pocas horas (para soluciones altamente aireadas en presencia de carbón activado) hasta varios meses (para soluciones almacenadas a bajas temperaturas). La tasa de emisión de ácido cianhídrico a la atmósfera se puede expresar

¹² Marsden y House, 1993.

¹³ Young y Jordan, 2000.

empíricamente, a partir del equilibrio teórico de soluciones cianuradas al aire, a diferentes valores pH y temperatura.¹⁴

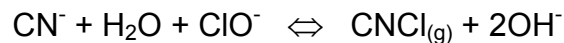
$$[\text{HCN}]_{\text{aire}} = \left[\frac{(1470/T)e^{(9275-2292/T)}}{1 + 10^{(\text{pH} - 9,3)}} \right]$$

- **Adsorción por diversas fases minerales:** Ciertas especies minerales se han revelado como “atenuadoras” del ión cianuro y de los compuestos cianurados; por ejemplo, se ha demostrado que determinados materiales carbonosos pueden adsorber en su superficie hasta 0,5 mg CN⁻/g. Este valor resulta ser 0,05 para minerales arcillosos y feldespatos; se ha encontrado que la bauxita, la ilmenita y la hematita también poseen cierta tendencia a la adsorción de compuestos cianurados.

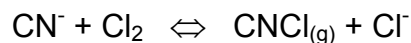
8.2.2.2 Oxidación de fases cianuradas para formar compuestos menos tóxicos.¹⁵

Procesos fundamentados en la avidéz de los oxidantes para captar electrones, produciendo a partir del cianuro el ión cianato, su forma oxidada de menor toxicidad; estas tecnologías son capaces de destruir el cianuro libre.

- **Oxidación por hipoclorito.** Este método de oxidación denominado “cloración alcalina” ha sido ampliamente aplicado desde finales del siglo XIX y con éxito en sus diferentes variantes, se basa en la oxidación del cianuro con la introducción del ión hipoclorito (ClO⁻); la oxidación se produce en un periodo de tiempo de 10 a 15 minutos, mediante la siguiente reacción.



Alternativamente, reemplazando el ClO⁻ por el Cl₂, la reacción es la siguiente:

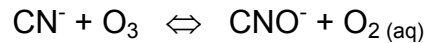


¹⁴ Menne, 1997.

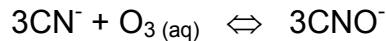
¹⁵ Huiatt et al. 1983, Wheathington. 1988 y Young et al. 1995.

➤ **Oxidación por ozono (O₃).** El O₃ se emplea como agente oxidante para la descontaminación de efluentes cianurados. Las mezclas O₃/O₂ provocan condiciones fuertemente oxidantes al ser inyectadas en forma de burbujas en una solución acuosa, logrando disociar los complejos más estables de cianuro. Al igual que el O₂, el O₃ reacciona con el cianuro para producir cianato.

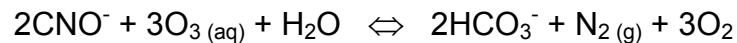
- La primera reacción denominada “ozonación simple”, libera oxígeno molecular que puede continuar el proceso de oxidación del cianuro.



- La segunda reacción altamente oxidante se denomina “ozonación catalítica”.



- Continuando con la evolución del sistema, si existe ozono disponible, oxidará el cianato formado a ión bicarbonato y nitrógeno molecular así:



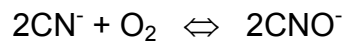
Esta técnica¹⁶ demanda un riguroso control del pH durante la operación, ya que los grupos OH⁻ pueden descomponer al O₃.

➤ **Oxidación biológica asistida.** Este método se basa en la capacidad de ciertas especies de microorganismos para degradar algunos compuestos de cianuro y amonio, así como para acumular metales pesados. El proceso requiere una adaptación gradual de especies de bacterias mutantes a hábitats con altas concentraciones de cianuro libre, tiocianato y metales pesados.

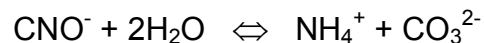
¹⁶ Young y Jordan, 2000.

En el Cuadro 8 se presenta una recopilación de las principales condiciones de la biodegradación de compuestos cianurados, la especie responsable y la reacción que se lleva a cabo.

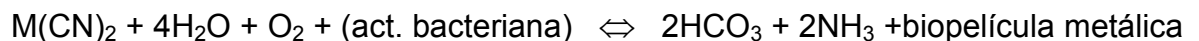
El fundamento de la técnica es la consecución de un elevado grado de conversión metabólica de cianuro a cianato mediante la actividad bacteriana; teniendo en cuenta que tanto el carbono como el nitrógeno son nutrientes, un modelo de reacción sería:



El cianato producido es hidrolizado para producir amonio y carbonato:

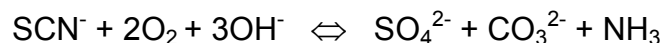


El amonio liberado es considerado como tóxico, por lo que debe ser tratado antes de la descarga. La mayoría de cianuros metálicos¹⁷ son eficazmente oxidados, y los metales adsorbidos, ingeridos y/o precipitados por la acción de las bacterias, mediante el siguiente proceso:



- Donde M representa un metal divalente (Fe, Zn, Ni, Cu, etc.).

Si hay presencia de tiocianato en la solución a tratar, será oxidado instantáneamente según la siguiente reacción.



Los efluentes tratados por esta vía suelen poseer unas calidades finales más adecuadas para una descarga directa que los tratados otros métodos activos. La

¹⁷ Marsden y House, 1993.

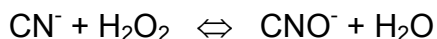
degradación biológica, ha demostrado ser capaz de eliminar el 92% del cianuro total, y más de un 95% de cobre y otros metales tóxicos.¹⁸

Cuadro 8. Microorganismos y vías de degradación de compuestos cianurados

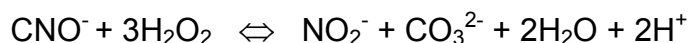
Condiciones	Compuesto degradado	Microorganismos	Reacción
Aerobias	HCN	Stemphylium loti	$\text{HCN} + \text{H}_2\text{O} \Leftrightarrow \text{HCONH}_2$
	HCN	Alcaligenes xylooxidans	Indefinida
	NaCN	P. putida	Indefinida
	KCN	Pseudomonas stutzeri AK61	Indefinida
	KCN	Bacillus pumillas C1	Indefinida
	Cianuros orgánicos	Pseudomonas aeruginosa	Indefinida
	HCN vía HCNO	P. fluorescens	$\text{NADH} + \text{H}^+ + \text{HCN} + \text{O}_2 \Leftrightarrow \text{HNCO} + \text{H}_2\text{O} + \text{NAD}$ $\text{HCN} + 2\text{H}_2\text{O} \Leftrightarrow \text{CO}_2 + \text{NH}_3$
Anaerobias	HCN	Cultivos mixtos	$\text{HCN} + 2\text{H}_2\text{O} \Leftrightarrow \text{HCOO}^- + \text{NH}_4^+$

Fuente. ALVAREZ, Rodrigo. 2005.

- **Oxidación por peróxido de hidrógeno H_2O_2 .** Este proceso cuyo Flujograma se muestra en *la Figura 10*, tiene una gran ventaja de no requerir la no introducción de nuevos iones; además, la cinética de la oxidación resulta viable para fines industriales y el reactivo es barato y fácil de manipular y almacenar. El H_2O_2 , que tiene un poder oxidante intermedio entre el O_2 y el O_3 , oxida al ión cianuro según la siguiente reacción:



En exceso de peróxido, se pueden formar los iones carbonato y nitrito que, a su vez, se pueden transformar en nitrato:



¹⁸ Homestake, Marsden y House, 1993.

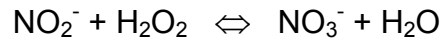
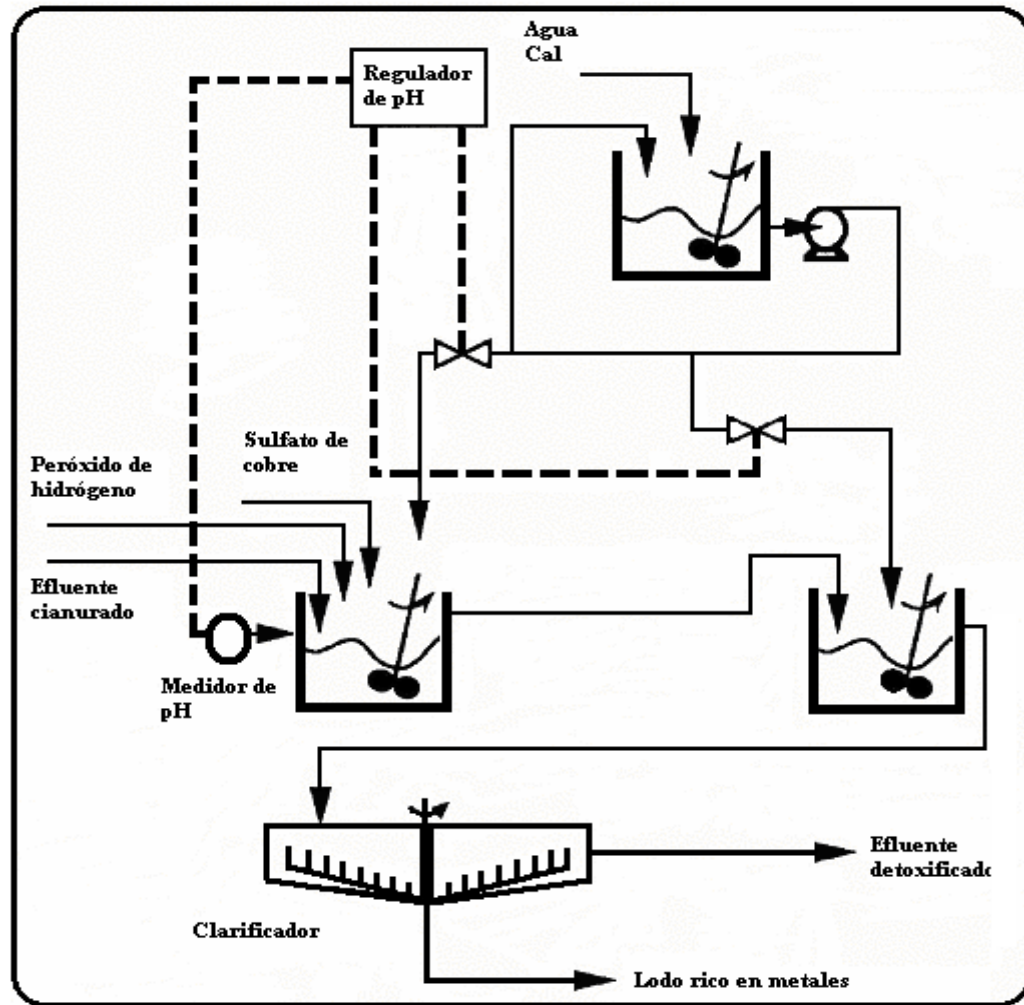


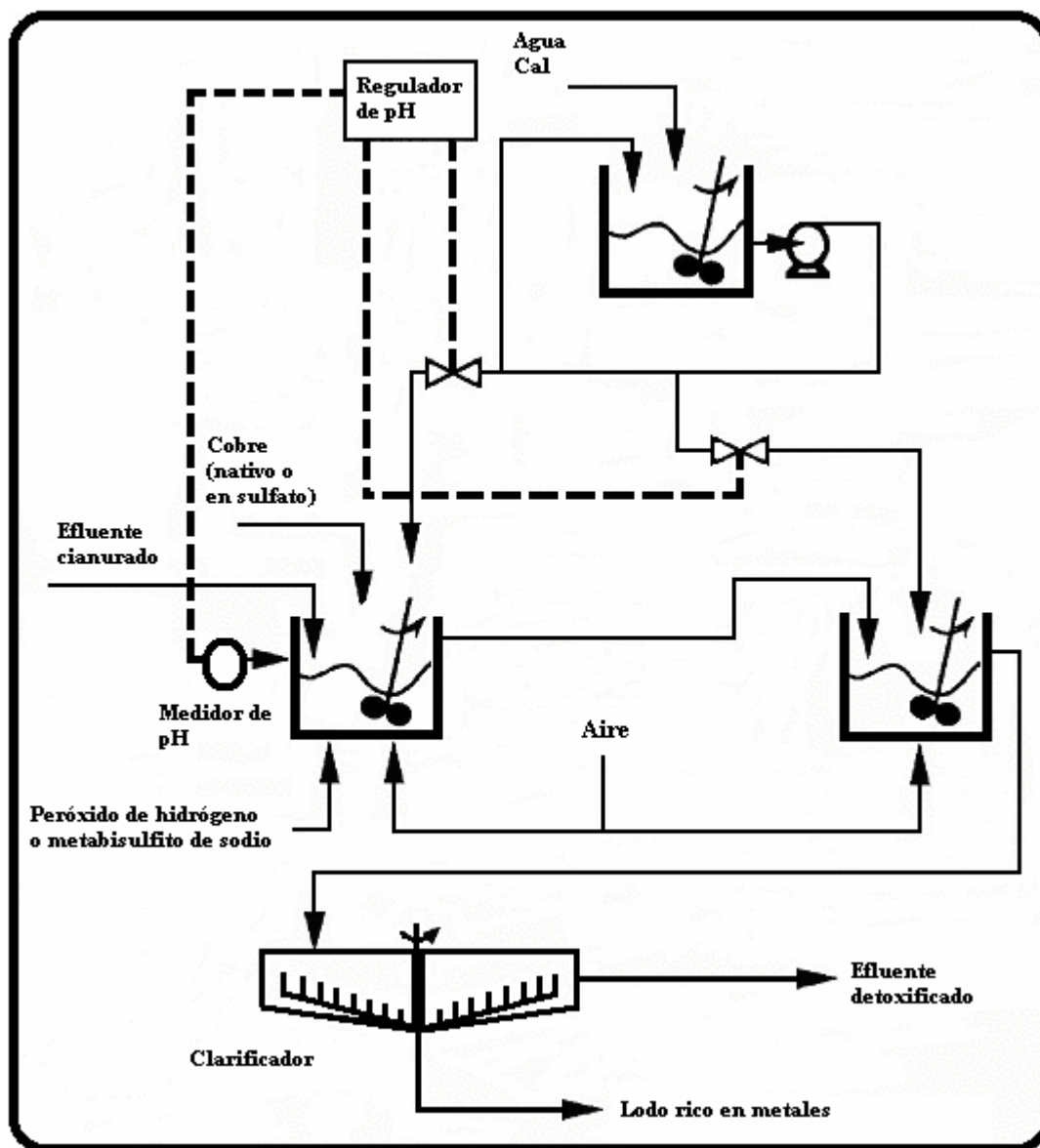
Figura 10. Diagrama de flujo del proceso: oxidación por H_2O_2



Fuente. Higgs, 1992.

- **Oxidación por dióxido de azufre y aire.** El dióxido de azufre ha sido ampliamente usado para la oxidación de las especies cianuradas. El proceso cuyo Flujograma se muestra en *la Figura 11*, presenta muchas variantes, siendo el más empleado el denominado proceso INCO.

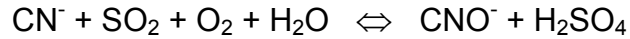
Figura 11. Diagrama de flujo del proceso INCO



Fuente. Higgs, 1992.

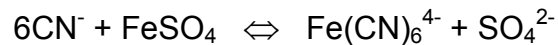
El proceso de oxidación se fundamenta en la inyección en el tanque de detoxificación de una mezcla de dióxido de azufre y aire, que rápidamente oxida el cianuro libre y el cianuro WAD presentes en la solución acuosa, utilizando como catalizador iones de cobre (II). El pH óptimo para el proceso es de 9, pero se lleva a cabo en condiciones razonables en el rango 7,5-9,5. La tasa óptima de dióxido

de azufre en el aire inyectado debe estar en torno al 1-2 %v/v, aunque el proceso opera bien hasta valores del 10%. La reacción es la siguiente para el cianuro libre:



El SO_2 se suele inyectar en fase líquida o gaseosa (por ejemplo, provocando la combustión de azufre puro). Otras fuentes de SO_2 empleadas en el proceso son el metabisulfito de sodio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) y el sulfito de sodio (Na_2SO_3).

8.2.2.3 Formación de complejos de hierro¹⁹. El CN^- puede ser convertido a ferrocianuro, mediante la adición de un exceso de una sal de Fe^{2+} en un rango de pH entre 7,5 y 10,5. El ferrocianuro es un compuesto sólido, estable y no tóxico; la reacción que resume el proceso es:



Este proceso no es muy efectivo para una descontaminación efectiva, debido a que se presenta múltiples restricciones cinéticas y dependencia de otros equilibrios establecidos entre los diferentes compuestos cianurados presentes en la solución a tratar; la mínima concentración que se ha logrado por este método es de 2,5 mg/l.

8.2.2.4 Otros métodos. Existen otros métodos para la descontaminación de efluentes cianurados, pero que solo son aplicables a soluciones muy diluidas y que además demandan un tratamiento posterior, previo a su disposición final; Entre estos métodos se pueden destacar:

➤ **Físicos:** además de la dilución, con menor frecuencia se emplean los siguientes métodos:

¹⁹ Marsden y House, 1993

- **Hidrólisis/destilación.** Este método se basa en que la presión de vapor del ácido cianhídrico formado al hidrolizarse el ión cianuro, es muy superior a la del agua (100 kPa frente a 34 kPa a 26 °C) y que el punto de ebullición del agua es superior al del ácido (100°C frente a 26°C) por lo que la separación del cianuro puede ser promocionada mediante el empleo de elevadas temperaturas y/o bajas presiones. El ácido cianhídrico producido puede ser recuperado a un sistema de almacenamiento para su posterior reciclado.
- **Electrolisis.** Los complejos metálicos de cianuro son susceptibles de ser disociados en el correspondiente metal y el ión cianuro mediante la aplicación de una diferencia de potencial entre dos electrodos inmersos en la misma solución, según la siguiente reacción en la que M representa un metal.

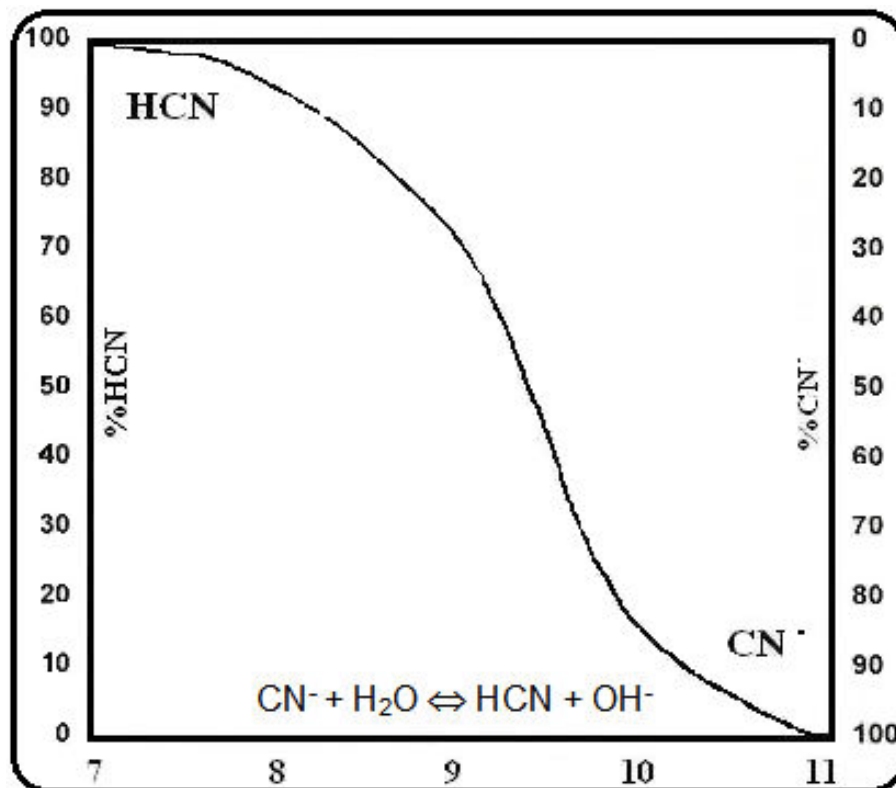


- **Membranas.** Los compuestos cianurados pueden ser extraídos de la solución acuosa mediante el empleo de membranas, bien mediante electrodiálisis o por ósmosis inversa.
- **Ultrasónicos:** Se ha encontrado que el empleo de ultrasonido en los tanques de descontaminación ayuda a mejorar el rendimiento de los procesos de oxidación de los compuestos cianurados en presencia de ozono; los métodos de aplicación aún se encuentran en etapa de investigación.²⁰
- **Métodos de complejación.** Los compuestos cianurados pueden ser tratados por medio de algunos métodos de complejación, como los siguientes:

²⁰ Marsden y House, 1993.

- **Extracción mediante solventes:** Consiste en la adición de un solvente orgánico inmisible en la solución y menos denso que ésta, el cual debe tener incorporado un agente extractante de gran aidez por los compuestos cianurados. Esta tecnología aún está en fase de estudio.
- **Acidificación/volatilización:** Se basa de en el equilibrio HCN/CN⁻ mostrado en *la Figura 12*; de la cual se observa que a menores valores de pH se presentan mayores concentración de HCN en la solución y por consiguiente, mayores posibilidades de volatilización del mismo. Con este método, tras la acidificación, la solución queda prácticamente libre de cianuros, pero requiere ser neutralizada antes de su descarga.

Figura 12. Equilibrio HCN/CN⁻ en función del pH



Fuente. Scott y Engles, 1981.

Adición de metales a la solución: Los compuestos cianurados mediante la adición de determinados cationes metálicos se pueden transformar en no reactivos al precipitar complejos cianuro-metálicos. Un ejemplo representativo es el desarrollado por Merrill-Crowe el cual utiliza zinc precipitar el oro de la solución y formar un compuesto cianurado más débil ($\text{Zn}(\text{CN})_4^{4-}$) que es, por tanto, más fácilmente tratable.²¹ En *el Anexo 3* se presenta el diagrama de flujo del proceso Merrill-Crowe para recuperación de oro.

- **El proceso Acidificación-Volatilización-Regeneración (AVR) para la recuperación del cianuro:** Mas que un proceso de descontaminación, este es un proceso de regeneración de reactivo que emplea los mismos del proceso de acidificación/volatilización. Básicamente se trata de disminuir el pH de la solución a descontaminar mediante la adición de ácido sulfúrico, con lo cual se promueve la formación de ácido cianhídrico, el cual una vez en estado gaseoso, es absorbido en una solución de hidróxido de sodio. Ver *Anexo 4*.

- **Métodos de adsorción:** Estos métodos se basan en la capacidad de absorción de compuestos cianurados, que presentan ciertos minerales como el carbón activado y algunas resinas; los adsorbentes más empleados son:
 - **Carbón activado:** El carbón activado presenta una gran capacidad de adsorción debido a que su elevada porosidad; sin embargo, presenta el inconveniente de ser muy poco selectivo, pues absorbe casi por igual aniones, cationes e incluso algunos compuestos neutros.

 - **Minerales:** Algunas familias minerales²² como los feldespatos, las arcillas y las zeolitas han demostrado poder de adsorción del cianuro libre y sus

²¹ Merrill-Crowe, 1890.

²² Chatwin, 1990.

complejos metálicos, así como algunos minerales como: hematita (Fe_2O_3), la ilmenita (FeTiO_3), y la bauxita ($\text{AlO}\cdot\text{OH}/\text{Al}(\text{OH})_3$).

- **Resinas:** Son polímeros con zonas superficiales que albergan gran cantidad de grupos funcionales de elevadas capacidades de intercambio iónico; pueden ser altamente selectivos, pero su eficacia depende de la forma en que la solución haya sido generada y tratada.
- **Proceso Noranda:** se lleva a cabo mediante la adición de sulfatos de hierro y de cobre al efluente cianurado. Al disociarse el sulfato, se forma hidróxido ($\text{Fe}(\text{OH})_3$): el ión ferroso es oxidado a férrico y el ión cúprico es reducido a cuproso. Este último se compleja con el cianuro libre disponible y precipita en forma de sal de cianuro.²³ La formación de los cianuros cuprosos insolubles agota todo el cianuro libre disponible desestabilizando los complejos solubles, que pueden ser eliminados en forma definitiva mediante oxidación.

8.3. SISTEMAS SEMI-PASIVOS

Este tipo de sistemas surgen para superar las debilidades que presentan la mayoría de los sistemas pasivos, las cuales en la mayoría de los casos pueden superarse mediante la aplicación de fuentes energéticas no naturales o mediante la adición de pequeñas dosis de ciertos reactivos. Los principales sistemas semi-pasivos son:

- **Aireadores.** Cuando se requiere introducir oxígeno a la solución a tratar, se emplean hidro-aireadores, los cuales por lo general requieren el uso de energía eléctrica o la propulsión mecánica.

²³ Königsmann et al., 1989.

- **Sistemas tipo RAPS con recirculación (ReRAPS).** Se trata de un sistema RAPS pero con recirculación de parte de la solución alcalina de salida, a una celda externa donde entra en contacto con la nueva solución a tratar y así, con la mezcla se consigue una subida en el pH que provoca la precipitación del Al fuera del RAPS, alargando así la vida útil de éste. El carácter de semi-pasivo deriva de la necesidad de utilizar energía eléctrica para bombear la solución a recircular.

- **Dosificadores de alcalinidad semi-pasivos (SPAD).** Consiste en un tanque que contiene algún compuesto generador de alcalinidad, generalmente caliza, carbonato sódico, hidróxido de sodio, cal viva o apagada. El tanque tiene incorporado un mecanismo que le permite dosificar el compuesto alcalino en función de caudal a tratar. El objetivo de estos sistemas es la eliminación de Fe y Al en forma de hidróxidos en una celda de decantación o un humedal aerobio situados a su salida.

8.4 SELECCIÓN DEL SISTEMA

Conocidos los sistemas de tratamiento pasivos y activos, mediante la aplicación de sus fundamentos técnicos, se puede lograr gran variedad de sistemas descontaminantes que cumplan con las exigencias de calidad al menor costo. Se recomienda tener en cuenta los siguientes puntos para su diseño:²⁴

- Decidir las unidades a incorporar en el sistema.
- Establecer las limitaciones de funcionamiento de cada una de las unidades.
- Establecer el orden y la ubicación de cada uno de los sistemas, buscando la sinergia en el proceso.
- Mantener las expectativas en rangos razonables.
- Utilizar criterios de dimensionamiento conservadores.

²⁴ Ibid.

8.5 MEDIDAS DE DESCONTAMINACIÓN DE EFLUENTES MINEROS EN COLOMBIA

En Colombia no es común encontrar sistemas de tratamiento de efluentes de minas auríferas debido que la mayoría de las explotaciones son de baja escala o de supervivencia, sin embargo, la minería organizada y en algunos casos las entidades ambientales aplican algunas técnicas de remediación, como las siguientes:

8.5.1 Recuperación del mercurio en efluentes líquidos. En este sistema hay varias alternativas cuyas variables de implementación tienen que ver con los costos y la eficiencia y eficacia. Dicho sistema consta de una columna de vidrio de un centímetro de diámetro, pasando la solución en contracorriente por medio de una bomba peristáltica, hay variación con la altura de la columna.

8.5.2 Recuperación del mercurio en efluentes líquidos con peróxido. Sistema empleado con éxito en la remediación de efluentes cianurados, pero con una eficiencia cercana al 90% en lo que respecta a la recuperación de mercurio.

8.5.3 Neutralización de efluentes de túneles exploratorios. Sistema de descontaminación que consta de un sistema de agitación y dosificación de carbonato de calcio (CaCO_3) y sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$), permanentemente se alimenta al efluente del túnel y es conducido a una piscina de floculación, seguida de otra piscina de sedimentación. El efluente de estas piscinas pasa a un proceso de filtración y su posterior vertimiento a la fuente hídrica.

8.5.4 Degradación del cianuro en efluentes líquidos. Consiste en el lavado de las arenas y posterior tratamiento de la solución de lavado con hipoclorito de sodio y/o peróxido de hidrógeno, para evitar excesos de reactivos en las descargas.

8.5.5 Recuperación del mercurio en efluentes líquidos con carbón activado y bentonita. Es una alternativa muy llamativa ya que además de recuperar mercurio, también se recupera oro en las soluciones de descarga; el uso de la bentonita requiere la implementación de tanques agitadores. Sistema adaptado también para tratamiento de lodos contaminados con mercurio.

8.5.6 Biorremediación. Sistema moderno con escasas aplicaciones en Colombia, que consiste en introducir especies vegetales, hongos y especies microbianas para eliminación o captura de sustancias tóxicas como el mercurio y el cianuro. El procedimiento es adaptable a diversas composiciones del efluente y de bajo costo.

- **Recuperación de mercurio en efluentes líquidos con Bromeliáceas-Tillandsia.** Una medida aplicada para la recuperación de vapor de mercurio, aunque su eficiencia no es muy buena.

- **Recuperación de mercurio en efluentes líquidos con Sargassum sp.** Sistema para la recuperación de mercurio por medio de estas algas, cuya principal ventaja es que no requiere de cuidados especiales para la conservación de las algas, ya que éstas también cumplen su labor incluso muertas, la desventaja del método es su baja eficiencia, por lo que debe ser utilizado en combinación con otros métodos.

9. PRODUCCIÓN MAS LIMPIA (PML), EN LA MINERÍA AURÍFERA

La producción más limpia PML es una herramienta para alcanzar un desarrollo sostenible, se basa en la implementación de una serie de técnicas y procedimientos que aumentan la eficiencia de los procesos y disminuye los impactos causados al medio ambiente y a la salud humana. Mediante la implementación de esta herramienta es posible lograr:

- Mayor beneficio económico del material extraído mediante optimización de los procesos, haciendo un uso racional de los recursos (materias primas, insumos y energía).
- Mayor eficiencia de los procesos, operaciones y equipos, obteniendo productos de mejor calidad al menor costo.
- Menores los impactos al medio ambiente, eliminando o aprovechar los residuos y/o subproductos del proceso.
- Mejor imagen institucional de la empresa ante clientes, autoridades ambientales, comunidad y entidades financieras.

9.1 PML EN LA ETAPA DE EXTRACCIÓN

La PML en esta primera etapa está orientada a la adecuada planeación de la explotación del mineral, cuyo objetivo es la formulación de una minería de transferencia, que se basa en aprovechar los espacios creados en la explotación, para disponer el material estéril producido en las etapas de beneficio del mineral.

9.1.1 En la minería aluvial. Este tipo de explotaciones se realizan por diferentes métodos dependiendo de las condiciones del yacimiento, por lo general a cielo abierto.

- **El barequeo.** Explotación de subsistencia mediante el lavado de arenas en bateas, normalmente en condiciones amigables para el ambiente, pues no utilizan químicos para la recuperación del oro y el área intervenida es imperceptible.
- **Explotaciones con motobombas.** Se requiere una canalización adecuada del material extraído y aplicar un tratamiento óptimo, cuidando que no hayan vertimientos de colas y sedimentos del proceso hacia los cuerpos de agua.
- **Explotación con bulldozeros y retroexcavadoras.** Al igual que en la minería de filón, se requiere una adecuada planeación de la explotación, cuyo fin es alcanzar una minería de transferencia, que permita emplear el material estéril como material de relleno de explotaciones anteriores.

9.1.2 En yacimientos de filón. Este tipo de explotaciones, realizadas bajo tierra, requiere una adecuada planeación y diseño de sistemas de desagüe, iluminación, ventilación y transporte del mineral, así como el estricto cumplimiento de las normas de seguridad. Se debe implementar las medidas necesarias para evitar la entrada de agua a la mina, lo cual se puede lograr mediante el uso de canales perimetrales de boca de mina, así como contar con un sistema de bombeo dentro de la mina, para evacuar el agua, pero solo como una medida de emergencia.

9.2 PML EN LA ETAPA DE BENEFICIO

9.2.1 PML en la trituración y molienda. Esta etapa es propia de la explotación minera de filón, la cual tiene por objetivo darle al mineral un adecuado tamaño para las subsiguientes etapas de beneficio; se debe tener presente las siguientes recomendaciones:

- **Evitar la emisión de material particulado.** Esto se puede lograr mediante la implementación de un sistema de molienda en húmedo, la cual además ayuda a desarrollar procesos oxidativos del mineral benéficos para el proceso.
- **No sobre moler.** La sobre molienda deja el oro demasiado fino, produciendo láminas, que son difíciles de recuperar, y además se genera despilfarro de energía, que en algunos casos puede representar hasta un 50% de los gastos totales del proceso.
- **Amalgamación en circuito cerrado.** Si se realiza amalgamación junto con la molienda, ésta se debe desarrollar en circuito cerrado, lo cual produce una mayor eficiencia de recuperación y sobre todo evita muchos de los problemas ambientales derivados del uso del mercurio.

9.2.2 PML en la concentración gravimétrica. La concentración gravimétrica es una técnica sencilla de alta capacidad, bajo costo y eficacia razonable, para separar minerales pesados valiosos. La PML en este proceso se puede aplicar mediante el uso de las siguientes tecnologías:

- **El hidroseparador.** Tecnología que permite separar la amalgama de arenas negras y piritas después de la amalgamación del oro; es un proceso rápido y seguro que no demanda energía eléctrica, sino agua a presión y por lo menos a 5 m de altura además es de bajo costo.
- **Las mesas concentradoras.** Son equipos de concentración gravimétrica con flujo laminar sobre una superficie inclinada con un movimiento longitudinal vibratorio. Entre sus principales ventajas destacan: un bajo consumo de agua y energía, un alto índice de recuperación y enriquecimiento de mineral y la posibilidad de recuperar otros minerales acompañantes; la principal desventaja es que requiere una atención constante del proceso.

- **Las canaletas o canalones.** Es un canal generalmente en madera por el cual se hace fluir la mezcla arenosa, se tiene una serie de trampas para la sedimentación de minerales pesados, mientras el agua saca arrastra los sólidos livianos: Son de fabricación local y de bajo costo, no requieren ningún tipo de energía y presentan buenos niveles de recuperación.

- **Trampa Cónica.** Es un cono invertido en cuya parte superior posee una entrada de agua más la carga y una salida de agua y colas. Recomendado para procesos de beneficio con alto flujo de agua, presentan una buena recuperación de oro, amalgama y mercurio; no requiere el uso de energía eléctrica.

- **El Jig.** Equipo que permite la separación de minerales de acuerdo a su peso específico, en un medio acuoso que alterna la sedimentación libre y la sedimentación obstaculizada. Entre sus principales ventajas se destaca su versatilidad (adaptable a todo tipo de materiales) y no requiere energía eléctrica, su principal desventaja es que requiere personal experto en su manejo.

- **Concentradores de espiral.** Es una canaleta helicoidal que tiene entre cuatro a seis vueltas. Pueden ser utilizadas para una variación de tamaño de grano desde 1 mm hasta 30 μm . Y se caracteriza por su alta recuperación de mineral. Las principales ventajas de este equipo son: no requiere energía eléctrica, su operación es simple y con buena recuperación de oro; sus desventajas son: requieren una altura mínima de 4m, una alimentación continua y con densidad del alimento controlada.

- **Concentradores centrífugos.** Son los mejores equipos para la recuperación de oro fino y ultra fino, con los cuales se puede lograr altos factores de

enriquecimiento; pero presenta la desventaja de ser muy costosos y requiere energía eléctrica.

9.2.2.1 Algunos factores que influyen en la concentración gravimétrica.

- **La granulometría:** Se puede lograr un aumento en la concentración gravimétrica mediante una previa clasificación del mineral por tamaño; esto es fácil de lograr mediante la instalación de cribas a la salida del molino.
- **La forma de la partícula:** Cuando el mineral es sobre molido, adquiere forma de lámina, las cuales son muy difícil de concentrar, una molienda óptima garantiza el mayor aprovechamiento del mineral al menor costo.
- **El contenido de sólidos finos dispersos.** Altos contenidos de lodo afectan la recuperación de oro fino o de las láminas, por lo tanto en este caso es necesario lavar (deslamar) antes de concentrar.

9.2.2.2 Manejo de colas contaminadas. Las colas contaminadas se pueden limpiar para recuperar el mercurio pero los métodos existentes son complicados, costosos y de baja eficiencia. Lo más recomendable para la pequeña minería es la acumulación en depósitos controlados en los que se deben tomar las medidas pertinentes para evitar el contacto con aguas subterráneas, lo cual se puede lograr mediante la impermeabilización de paredes y bases con materiales como arcilla, bentonita, caolinita y preferiblemente limonita (material con alto contenido de hidróxido ferroso), debido a su alta capacidad de absorción de mercurio.

9.2.2.3 Recuperación de oro de la amalgama. Para evitar las pérdidas de mercurio en el proceso de calentamiento de la amalgama, se debe utilizar un sistema de retortas con calentamiento en circuito cerrado.

- **La retorta.** Es un equipo sencillo para fundir la amalgama en forma segura, el cual está compuesto por el crisol con tapa de cerradura hermética, un tubo de escape de condensación con un cuello descendente conectado al recipiente de recuperación del mercurio líquido. Este equipo permite recuperar más del 95% del mercurio evitando que se evapore libremente
- **Depurador en seco de mercurio en la quema de amalgama.** Es un equipo de PML con el que se logra recuperar hasta un 98% del mercurio que se volatiliza en la quema de la amalgama, con lo cual se logra una protección de la salud y se evita la contaminación del medio ambiente.

9.2.2.4 Reutilización del mercurio. En la pequeña minería que utiliza mercurio que realizan amalgamación y molienda simultáneamente, se pueden perder entre 5 y 10 kg de mercurio para recuperar 1 kg de oro. Pérdidas que se deben evitar al máximo por sus implicaciones sobre la salud humana y el medio ambiente. De otra parte, el mercurio disminuye su capacidad de amalgamación a medida que se reutiliza, lo que hace necesaria su limpieza frecuente; algunas de las formas de limpiar y reactivar el mercurio son:

- Destilándolo en una retorta o en un depurador en seco para dejar atrás los contaminantes que no sean volátiles.
- Lavándolo con cenizas de madera y agua, puesto que el carbonato de potasio ayuda a atrapar los contaminantes.
- Lavándolo con algún reactivo, como cal, ácido clorhídrico diluido, ácido nítrico diluido, etc.

10. CONCLUSIONES

1. Colombia es un país con una gran riqueza aurífera, pero a la vez con grandes falencias en su explotación. Se tiene identificadas 15 Regiones auríferas con explotaciones en 18 departamentos, siendo la mayoría explotaciones de pequeña escala, bajo nivel tecnológico y altos impactos ambientales principalmente por la generación de efluentes ácidos, residuos sólidos y vapores de mercurio y cianuro.
2. El sector minero es uno de los pilares para el desarrollo de la economía del país; el cual temporalmente se haya en un limbo jurídico, luego de haber sido declarada inexecutable la *Ley 1382 de 2010* que modificaba el Código Minero (*Ley 685 de 2001*). Actualmente el Ministerio de minas y energía está elaborando un proyecto de ley que busca poner fin a esta problemática.
3. La minería aurífera es una actividad generadora de grandes impactos ambientales; en general, se causa impacto sobre el recurso hídrico con los vertimientos ácidos de mina, sobre el aire con la emisión de material particulado, gases y vapores tanto de mercurio como de ácido cianhídrico, y sobre el suelo con la remoción de grandes volúmenes de tierra.
4. El tipo y la intensidad de los impactos ambientales de la minería aurífera, así como las medidas de mitigación y/o remediación adoptadas varían en función del grado de organización y tecnificación de la explotación minera. De un lado, las empresas legalmente constituidas con explotaciones de mediana escala hacen tratamientos activos a sus efluentes y en algunos casos aplican técnicas de producción más limpia PML. De otro lado, en las explotaciones a pequeña escala generalmente ilegales, se adolece completamente de medidas de remediación.

11.RECOMENDACIONES

- 1.** Promover programas de capacitación a las comunidades que practican la minería a pequeña escala, a fin de entrenarlos en la aplicación de principios de producción más limpia tendientes a la protección de la salud y el medio ambiente.
- 2.** Fomentar la aplicación de las tecnologías de producción más limpia en las explotaciones mineras de mediana escala.
- 3.** Desarrollar un marco jurídico estable, que priorice la protección medioambiental, y propenda por la implementación de tecnologías de producción más limpia PML con el objetivo de alcanzar una minería sustentable en el país.
- 4.** Formular alternativas de desarrollo para las comunidades que ejercen la minería ilegal como única forma de supervivencia, mediante la capacitación en labores agrícolas, artesanales u otras que le permita gozar de mejores condiciones de vida sin detrimento del medio ambiente.

12. BIBLIOGRAFÍA

ACOSTA J, Cielo. Tesis: Guía minero ambiental para el beneficio del oro en el distrito minero Vetas-California. UIS. 2010.

ALVAREZ G, Rodrigo. Tesis: Aplicación de sistemas pasivos para el tratamiento de soluciones residuales de procesos de cianuración en minería de oro, Universidad de Oviedo. 2005.

CHATWIN, T.D. Cyanide attenuation/degradation in soil. Final report: Resource Recovery and Conservation Company, 1990

Colombia, Ley 1382 de 2010.

Diagnóstico y proyecciones de la gestión minero ambiental para las regiones auríferas de Colombia. Ministerio del medio ambiente, 2002.

Estado de los recursos naturales y del medio ambiente, Contraloría general de la República, Colombia. 2011.

Guía para la gestión de las autoridades locales de pueblos y distritos mineros de américa latina y el caribe. CEPAL/UNCTAD. Chile, 2003.

HEM, J.D., Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. U.S. Geological Survey Water Supply Paper 1985.

HUIATT, J.L. et al. Cyanide from Mineral Processing. Proceedings of Workshop, Salt Lake City, UT, The National Science Foundation, Washington 1983.

KONIGSMANN, E. GOODWIN, E. y LARSEN C. Water management and effluent treatment practice, golden giant mine, hemlo gold mines. "Canadian Mineral Processors". 1989.

MARSDEN, J. y HOUSE, I. The chemistry of gold extraction. Ed. Ellis Horwood. 1993.

MENNE, D. Managing Cyanides in Waste Discharges. 1997.

MUDDER, T. et al, Biological treatment of cyanidation wastewaters: design, startup, and operation of a full scale facility. Mining Journal Books Limited, Londres. 1998.

OLIVERO, Jesús y JOHNSON, Boris. El lado gris de la minería del oro: la contaminación con mercurio en el norte de Colombia, Editorial universitaria, Universidad de Cartagena. Cartagena, 2002.

PIRAMID Consortium: Engineering guidelines for the passive remediation of acidic and/or metalliferous mine drainage and similar wastewaters. Comisión europea. 2003.

Plan Nacional de Desarrollo Minero, gestión para propiciar la actividad minera. UPME, Bogotá, 2007.

Producción más limpia en la minería de oro en Colombia: Mercurio, Cianuro y otras sustancias. UPME, Bogotá. 2007.

SANCHO, J., VERDEJA, L. y BALLESTER, A. Metalurgia extractiva. Volumen II. Procesos de obtención. Ed. Síntesis. 2000.

SCOTT, J. y. ENGLES, J. An Overview of Cyanide Treatment, Ottawa, Ontario. 1981.

WATZLAF, G. La caracterización del drenaje de mina para un diseño adecuado de un sistema de tratamiento pasivo. Universidad de Oviedo. 1998.

WEATHINGTON, B. Project Summary Destruction of Cyanide in Waste Waters: Review and Evaluation. US EPA Report 1988.

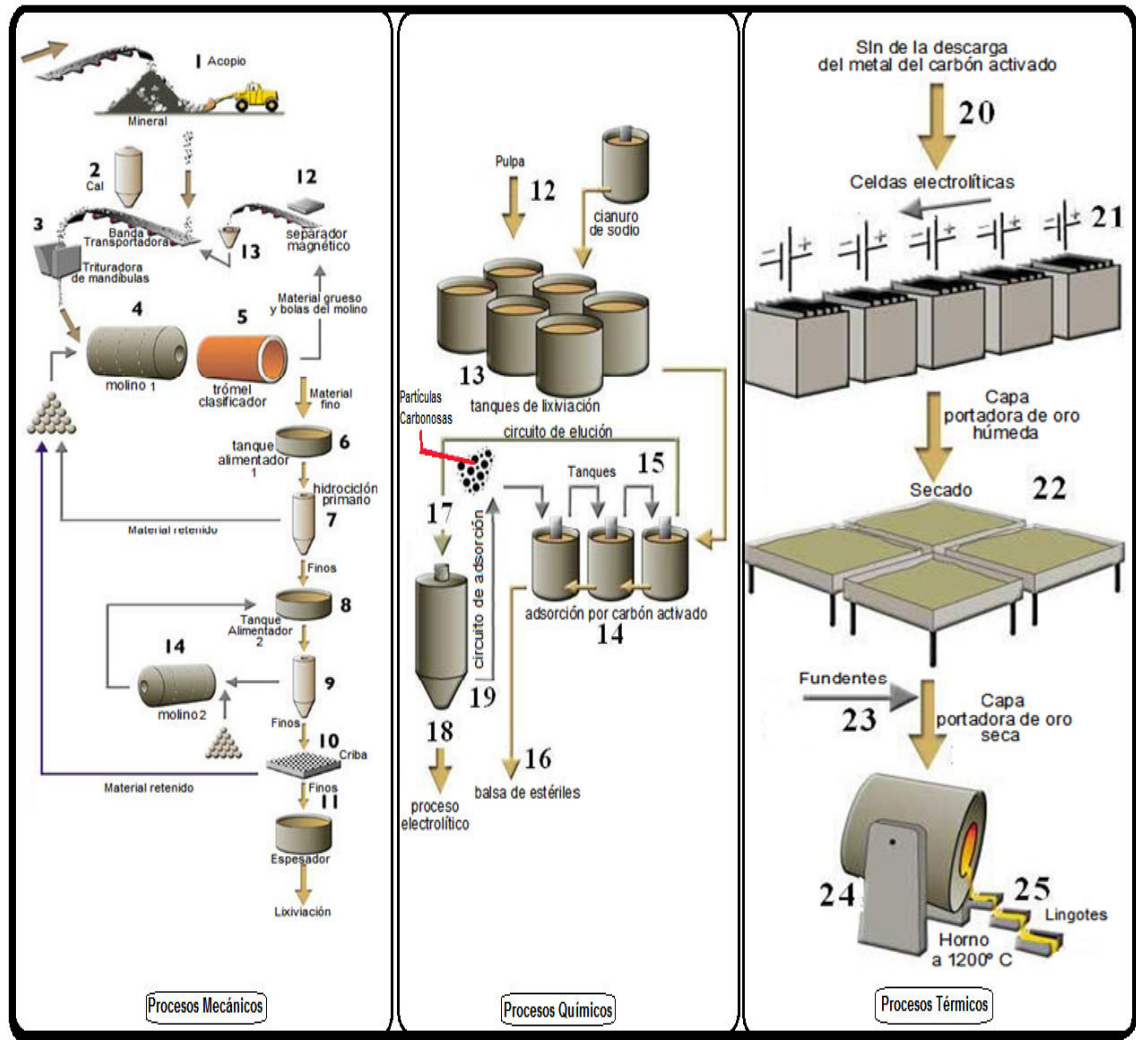
YOUNG, C., CASHIN, S y JORDAN, T Remediation technologies for the separation and destruction of aqueous cyanide species. 1995.

YOUNG, C. y JORDAN, T. Cyanide remediation; current and past technologies. Proceedings of the 10th annual Conference on Hazardous Waste Research, 2000.

YOUNGER, P., BANWART, S y HEDIN, R. Mine water, hydrology, pollution, remediation. kluwer academic Publishers, 2002.

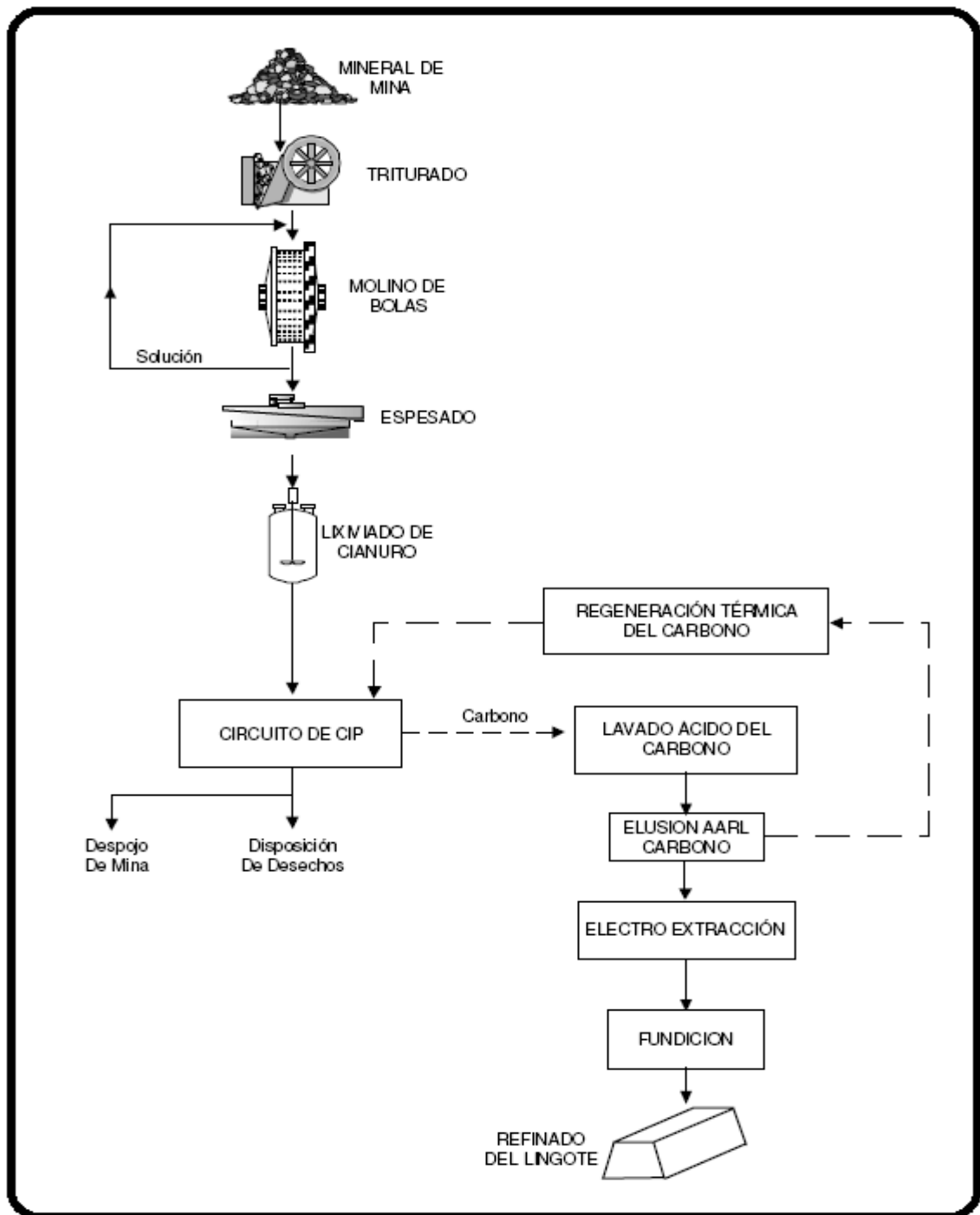
ANEXOS

Anexo 1. Diagrama de flujo: Refinación técnica del oro



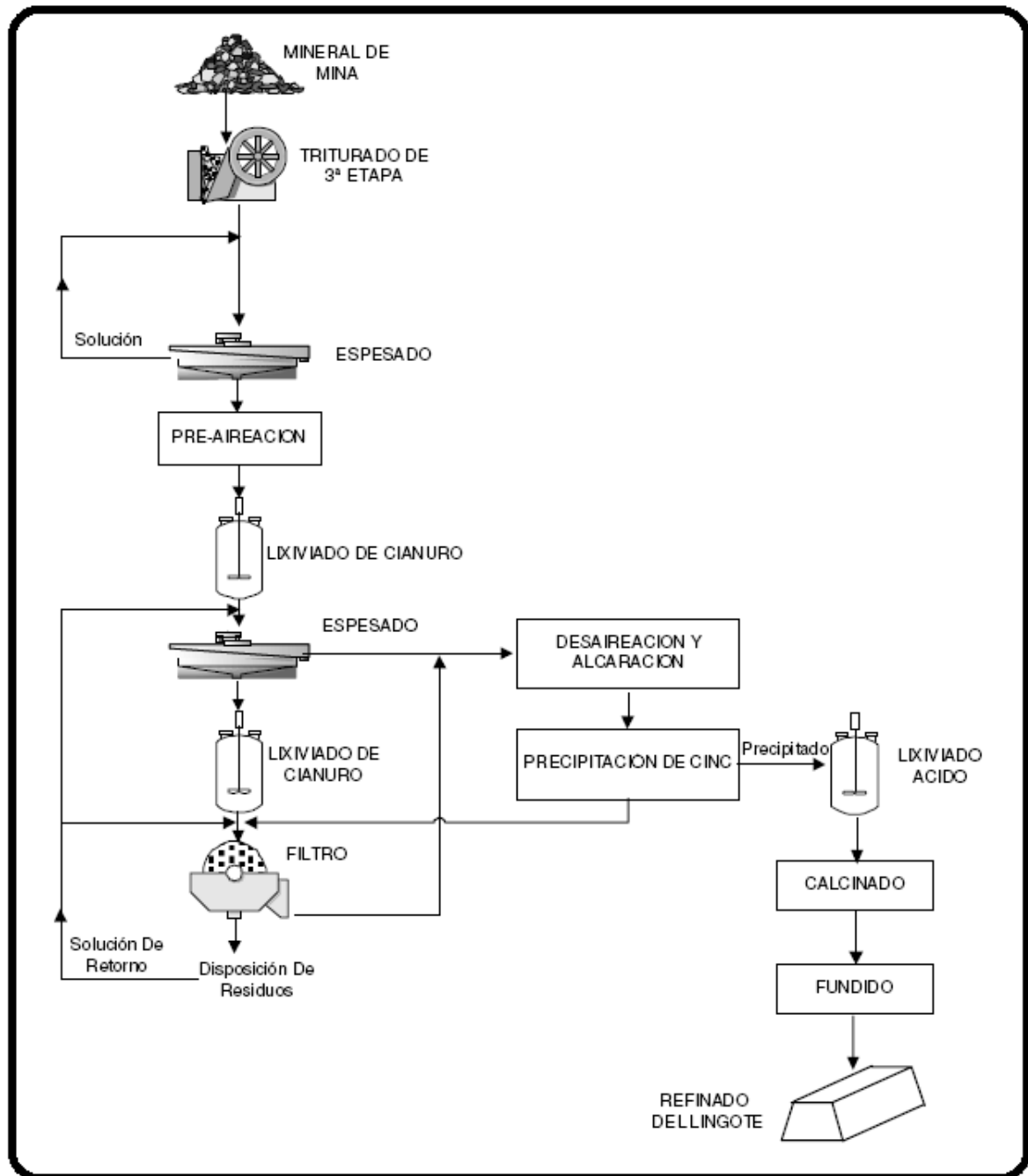
Fuente. ALVAREZ, Rodrigo. 2005.

Anexo 2. Recuperación de oro con carbón en pulpa



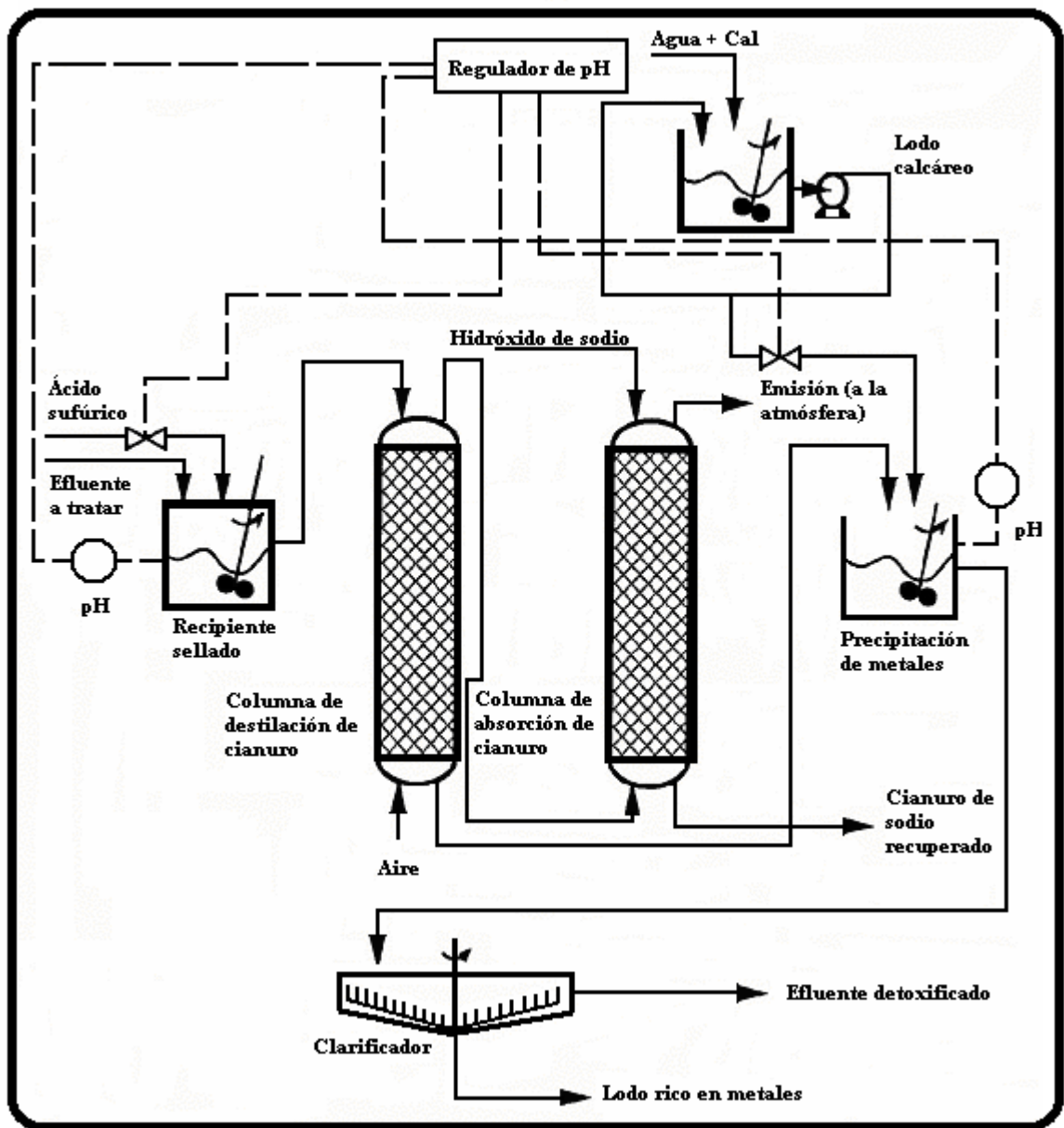
Fuente. Guía minero-ambiental: Beneficio y transformación. Ministerio de minas y energía-Ministerio del medio ambiente. Colombia 2002.

Anexo 3. Flujograma Merrille Crowe para recuperación de oro.



Fuente. Guía minero-ambiental: Beneficio y transformación. Ministerio de minas y energía-Ministerio del medio ambiente. Colombia 2002.

Anexo 4. Diagrama de flujo del proceso AVR



Fuente. Higgs, 1992.