



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**Biorremediación en aguas residuales contaminadas con cianuro y mercurio generadas
en el proceso de la minería aurífera en Colombia, a partir de una revisión
bibliográfica entre los años 2008 -2018**

Mónica Isabel Cartagena David

**Universidad de Antioquia
Facultad Nacional de Salud Pública
“Héctor Abad Gómez”
Medellín, Colombia
2019**



**Biorremediación en aguas residuales contaminadas con cianuro y mercurio generadas
en el proceso de la minería aurífera en Colombia, a partir de una revisión
bibliográfica entre los años 2008 -2018**

Mónica Isabel Cartagena David

**Monografía para optar al título de Administradora en Salud con Énfasis en Gestión
Sanitaria y Ambiental**

**Asesor
Luis Ariel Trejos Melchor
Ingeniero Sanitario
Especialista en Gestión Ambiental**

**Universidad de Antioquia
Facultad Nacional de Salud Pública
“Héctor Abad Gómez”
Medellín
2019**

Gracias

A la vida... por la oportunidad de vivirla.

A mi abuelo Nepo... por enseñarle a mi Madre la importancia de la educación de las mujeres.

En especial gracias a mi madre, hermana, hija, prima, a las mujeres de mi familia, a las amigas, a las que han hecho o hicieron parte de mi vida, a las que habitan los territorios de Santa Fe de Antioquia, Liborina, Caicedo y Uramita (vereda La Meseta), a ellas mis eternos agradecimientos por sus abrazos, sus enseñanzas, aprendizajes, apoyo y cariño.

A mi hija...porque cree que todo puede ser posible cuando comienzas a soñarlo.

A mi hijo, quien me enseñó que las ampollas hacen parte de perseguir y realizar los sueños.

A mis hermanos por su apoyo e incondicionalidad.

A Mauro, porque cada vez que sentía decaer o dudaba en lograrlo, tuvo una palabra de aliento y unos sabrosos alfajores para endulzar las noches de desvelo.

A mi asesor, porque durante estos meses y con su acompañamiento he ido aprendiendo que la biorremediación podría ayudar a mejorar la calidad de vida de la gente y el impacto al ambiente.

A las y los profesores de la Facultad Nacional de Salud Pública, de la Universidad de Antioquia, por compartir sus conocimientos, por las conversaciones, asesorías y regaños alrededor de una taza de café.

¡A mí... por atreverme y lograrlo!

Tabla de contenido

Lista de cuadros	5
Lista de figuras	6
Resumen	7
1. Introducción.....	9
2. Planteamiento del problema	10
2.1 Antecedentes	10
2.2 Descripción del problema.	11
3. Justificación.....	14
4. Objetivos	15
4.1 General	15
4.2 Específicos	15
5. Marco legal.....	16
5.1 Marco normativo	16
6. Marco conceptual.....	18
6.1 Minería	18
6.1.1 Tipos de minería.	18
6.2 Cianuro.....	20
6.2.1 Impacto al ambiente.....	21
6.2.2 Impacto a la salud humana.....	21
6.3 Mercurio.....	21
6.3.1 Impacto al ambiente.....	22
6.3.2 Impacto a la salud humana.....	22
6.4 Aguas residuales	23
6.4.1 Aguas de destilación ácida.	23
6.4.2 Aguas de purificación de oro.	24
6.5 Biorremediación	24
6.5.1 Tipos de biorremediación.....	25
7. Metodología.....	27
7.1 Tipo de Estudio.....	27
7.2 Caracterización de artículos viables:	28
7.2.1 Selección de artículos potenciales:	28
7.2.2 Criterios de inclusión y de exclusión.	28
7.3 Variables de estudio.....	29
7.4 Gestor de referencia.	31
7.5 Aspectos éticos	31
8. Resultados	32
9. Análisis y discusión de los resultados.....	42
10. Conclusiones	46
11. Recomendaciones	49
12. Referencias Bibliográficas	50

Lista de cuadros

Cuadro 1 Legislación colombianas para protección y conservación de los recursos naturales y el recurso hídrico, vigentes al año 2019.	16
Cuadro 2 Legislación colombiana vigentes sobre el mercurio, para el año 2019	17
Cuadro 3 Legislación colombiana vigentes sobre vertimientos a cuerpos de agua, para el año 2019	17
Cuadro 4 Filtros empleados en la búsqueda bibliográfica realizada en las bases de datos Science Direct y Springer Link.	28
Cuadro 5 Variables de estudio (adaptación para un constructo propio).	29

Lista de figuras

Figura 1 Flujograma de la metodología.	30
---	----

Resumen

El cianuro y el mercurio han sido empleados durante años en la explotación minera para la obtención de algunos metales preciosos tales como el oro, dejando consecuencias en los ecosistemas, especialmente en el recurso hídrico, a donde son descargadas las aguas residuales provenientes del desarrollo de esta actividad, en los lugares donde se lleva a cabo, por tanto; el objetivo los métodos biorremediadores se convierten en una alternativa para reducir las cargas contaminantes de estos compuestos químicos, en las aguas generadas en la explotación minera aurífera. **Metodología:** la revisión bibliográfica utilizó motores de búsqueda, con descriptores claves: mercury, cyanide, fitorremediation, etc. La búsqueda se hizo más exhaustiva en bases de datos indexadas (science direct, ebscos, cochrane library), el acervo documental inicialmente estuvo constituido por 138 artículos científicos, y luego se procedió a filtrar con descriptores más específicos, consolidándose 25, después de esto se definió el criterio de selección por año, obteniéndose 12 documentos, de donde se excluyeron cinco, quedando así 7 que describieron mejor el fenómeno de estudio. **Resultados:** sobre las investigaciones que permitieron identificar los procesos biorremediadores utilizados para el tratamiento de estas aguas, producto de la explotación minera aurífera, mostraron que algunas bacterias, (*seudomonas*, *cianobacterias*) y algunas especies de plantas, [lenteja de agua (*lemna minor*), Jacinto de agua (*eichornia crassipes*) y Elodea (*elodea canadiensis*)], tienen alta eficiencia para remover el mercurio, y degradar el cianuro, existentes en los efluentes mineros originados en las diferentes etapas a las que se somete el mineral para la obtención del metal. **Conclusión:** La literatura revisada, muestra limitantes en lo concerniente a los parámetros de medición establecidos a las cargas contaminantes de cianuro y/o mercurio antes del tratamiento del caudal de agua y después del mismo lo que dificulta cuantificar el beneficio económico, ambiental y social de la aplicación de los métodos biorremediadores.

Palabras claves: cianuro, mercurio, biorremediación, minería aurífera, aguas residuales, contaminación.

Abstract

Cyanide and mercury have been used for years in mining to obtain some precious metals such as gold, leaving consequences in ecosystems, especially in water resources, where they are discharged wastewater from the development of this activity, in places where it takes place, therefore, the objective bioremediation methods become an alternative to reduce the pollutant loads of these chemicals in the waters generated in gold mining. **Methodology.**

The literature review used search engines, with key descriptors: mercury, cyanide, bioremediation, etc. The search became more exhaustive in indexed databases (science direct, ebsco, cochrane library), the documental collection was initially constituted by 138 scientific articles, and then we proceeded to filter with more specific descriptors, consolidating 25, after this we defined the selection criteria per year, obtaining 12 documents, from where five were excluded, leaving 7 that better described the phenomenon of study.

Results. On the investigations that allowed to identify the bioremediation processes used for the treatment of these waters, product of the gold mining, they showed that some bacteria, (pseudomonas, cyanobacteria) and some species of plants, [water lentil (lemna minor), Jacinto de agua (eichornia crassipes) and Elodea (elodea canadiensis)], have high efficiency to diminish or remove the mercury and cyanide existing in the mining effluents originated in the different stages to which the ore is submitted to to obtain the metal. **Conclusion.**

The literature reviewed shows limitations concerning the measurement parameters established for cyanide and/or mercury pollutant loads before and after water flow treatment, which makes it difficult to quantify the economic, environmental and social benefits of the application of bioremediation methods.

Keywords: cyanide, mercury, bioremediation, gold mining, wastewater, pollution.

1. Introducción

La actividad minera, a pesar de ser una actividad productiva y rentable, ha dejado en el ambiente y en los recursos naturales daños irreversibles, entre estos se encuentran la contaminación del aire, del suelo y del agua, la destrucción de la capa vegetal, el levantamientos de terrenos, la emisión de gases y partículas al aire, la contaminación con combustibles de las maquinarias utilizadas, el deterioro de la flora y fauna, las afectaciones a la salud de la población trabajadora, así como de las comunidades aledañas (1). Según las investigaciones documentadas por CORANTIOQUIA, uno de los impactos al ambiente más significativos es la contaminación del recurso hídrico, especialmente con mercurio y cianuro, estas dos sustancias son utilizadas específicamente en la etapa del beneficio del oro. En la minería a gran escala existen más controles técnicos que permiten el tratamiento de las aguas residuales contaminadas, a diferencia de la pequeña minería o minería informal, en donde los controles pueden ser menores o incluso nulos. El tratamiento de las aguas residuales provenientes de la minería aurífera es mayoritariamente químico, lo que puede generar efectos adversos al ambiente, sin embargo, se han realizado investigaciones en las cuales se evidencia que los procesos biológicos pueden llegar a ser igual de eficientes, y traer consigo otros beneficios (2)

Los tratamientos biorremediadores o tratamientos biológicos, han surgido como una de las alternativas para el tratamiento de los residuos generados por las actividades productivas humanas, a través de los años en diferentes áreas industriales, tales como la extracción de hidrocarburos y la minería, los estudios realizados con estos tratamientos, han logrado demostrar su eficiencia en la remoción de diferentes contaminantes, ofreciendo una alternativa en la reducción de químicos, como es el caso del cianuro y el mercurio, al tratamiento de las aguas residuales generadas en los diferentes procesos de la explotación ,minera aurífera, en donde estas sustancias son utilizadas.

Los microorganismos y las enzimas han sido el foco principal de los esfuerzos para mejorar la capacidad de biorremediación, de la misma manera, el uso de las plantas en la fitorremediación. Los procesos de biorremediación se han establecido para el tratamiento de suelos y aguas contaminadas, tanto in situ (en el lugar), como ex situ (fuera del sitio). Se ha demostrado, en las diferentes experiencias, algunas de ellas citadas en esta revisión bibliográfica, que cuando se adapta correctamente a las condiciones del medio a intervenir, la biorremediación puede ofrecer disminución significativa de costes y beneficios ambientales, en comparación con otras alternativas químicas y/o tecnológicas. Por otra parte, a pesar de que la biorremediación es a menudo considerada como un tratamiento efectivo, económico y amigable del ambiente, enfrenta un reto: convencer a las grandes compañías y a los organismos oficiales de su alto potencial, por cuanto se ha venido convirtiendo, a través de los años, en una verdadera posibilidad, que puede llegar a tener connotaciones industriales, para sanear el ambiente de las afectaciones generadas por las actividades humanas y la industrialización.

2. Planteamiento del problema

2.1 Antecedentes

Colombia, es un país rico en recursos minerales, debido a los procesos geológicos que formaron sus valles, cordilleras y costas. En Colombia los 10 departamentos con mayor producción de oro son: Antioquia, Chocó, Bolívar, Caldas, Córdoba, Huila, Tolima, Cauca, Valle del Cauca y Nariño. (1). Según el último censo minero, realizado en el año 2011 (3), el 72% de las minas en el país eran informales y el 30% de la producción de éstas correspondía a la minería extractiva aurífera. Para el año 2013, la participación en el producto interno bruto (PIB) de la minería en Colombia y otros países, osciló entre el 8% y 15%. Para el año 1993 la producción de oro estuvo alrededor de los 27.469 kilogramos, presentando un incremento para el año 2012, equivalente al 41,6% con una producción de 66.178 kilogramos. (4)

Si bien la minería aurífera es de gran importancia, ya que incentiva el desarrollo territorial, los impuestos que son recaudados, las regalías, la generación de empleo, el mejoramiento de la economía nacional e igualmente la utilidad que representa el oro para aplicaciones tecnológicas y médicas. Definitivamente el daño y deterioro ambiental son unos de los aspectos más delicados y sensibles en la ejecución de esta actividad. Las malas prácticas de extracción, el uso de sustancias tóxicas para la obtención de oro, han influido, desde siglos de historia, en la salud ambiental y de las comunidades en donde se desarrolle la actividad minera. (5)

Uno de los recursos naturales que se ha visto más afectado por la minería aurífera es el hídrico, generalmente para el tratamiento de aguas residuales resultantes de esta actividad productiva se han utilizado métodos convencionales como el proceso INCO¹ (International Nickel Company's), el tratamiento con peróxido de hidrógeno, la cloración alcalina, la precipitación con metales, la acidificación-volatilización-recuperación (5), la adsorción, la conversión química y el tratamiento electrolítico, sin embargo estos procesos pueden generar productos tóxicos, pueden ser corrosivos, pueden implican una alta inversión, una adecuada dosificación y manipulación, además pueden llegar a producir desechos más contaminantes que los iniciales, lo que supone para el ambiente un impacto negativo significativo. (6).

Debido a lo mencionado en el párrafo anterior y los altos índices de contaminación en agua, en los últimos años, han llevado a los científicos a realizar intensas investigaciones para encontrar nuevas formas de recuperar los ecosistemas degradados, es así como en la década de los 80, en que fue acuñado el término biorremediación (7), el cual está basado en la acción de microorganismos autóctonos y modificaciones ambientales de gran sencillez, tales como la aplicación de nutrientes y la aireación, este no requiere de reactivos químicos, además, no necesita de personal experto para el manejo y operación del sistema de tratamiento (6), a

¹ Se utiliza una fuente de SO₂ y aire en presencia de un catalizador de cobre soluble para oxidar el cianuro (CN⁻) a cianato (CNO⁻)

diferencia de los tratamientos físicos y químicos, los cuales son usados convencionalmente, siendo así procesos más costosos (8).

2.2 Descripción del problema.

La biorremediación no es el problema... problema son las aguas contaminadas con cianuro y mercurio generadas en la explotación minera aurífera, la ausencia de tratamientos y/o los tratamientos químicos para la degradación y remoción de estas sustancias. La biorremediación es la solución. M.I.C.D.

La minería además de ser de gran importancia para proporcionar materias primas mundialmente, y más allá de ser una fuente de desarrollo económico, conlleva una serie de variables que deben analizarse continuamente, tales como: los aspectos de regularización normativa, la conservación de los recursos naturales, el cuidado de las comunidades, los controles de seguridad y las prácticas laborales seguras (4), en Colombia a pesar de que existen regulaciones administrativas para la adecuada explotación minera, esta actividad ha dejado daños al ambiente, afectaciones a la salud de la población, ha perturbado el equilibrio social e incluso la seguridad nacional; ha provocado la proliferación de explotaciones informales de oro, lo que ha generado la destrucción de tierras fértiles, reservas naturales y forestales, y la contaminación de fuentes de agua, pues en la mayoría de los casos, se llevan a cabo de manera poco adecuada. (1)

Otros de los daños causados son la formación de grandes huecos, la destrucción de la capa vegetal del suelo y subsuelo en las minas y terrenos circundantes, la perforación y levantamiento del terreno, el deterioro de la flora y fauna; el enlodamiento de las fuentes de agua, la producción de residuos sólidos y líquidos, la contaminación con grasas, aceites y combustibles de las máquinas mineras utilizadas (retroexcavadoras, motobombas, dragas de succión, molinos de pisones, barriles amalgamadores, etc.), y finalmente la contaminación del recurso hídrico con sustancias tóxicas y peligrosas (3), a continuación se ahondará en esta problemática enfocada en el uso del mercurio y el cianuro para el beneficio del oro.

Actualmente, Colombia es uno de los países del mundo que usa mercurio para la extracción de minerales, especialmente el oro, debido al uso de este metal en el 2010, el país ocupó el segundo lugar (75,0 Ton/año) en la lista de los países que más contaminan. En el 2011 Colombia fue el sexto país latinoamericano con mayor producción de oro, esto se debió en gran parte a la minería informal. (10). La afectación de las comunidades donde se utiliza mercurio para la extracción de oro es notable, estudios realizados en la región del sur del Bolívar – Colombia, demuestran que un porcentaje significativo de la población se encontraba contaminada por mercurio, especialmente el grupo de pescadores y mineros, además se evidencio que existía una correlación con el consumo de pescado (9).

Según la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), en lo que respecta a las áreas de explotación minera de oro de la región de Antioquia, se ha detectado que, en el municipio de Segovia, se emiten grandes cantidades de mercurio a la atmosfera debido a que

aproximadamente el 50 % de los compradores de oro, así como los mineros, no utilizan recuperadores de mercurio por considerar a estos aparatos costosos y poco útiles. Igualmente, en los entables, lugares para el beneficio de oro, se estima que se pierde alrededor del 46 % de mercurio utilizado para la recuperación, lo que genera vertimientos altamente contaminados y contaminantes (10). En los ríos de la región, especialmente el río Nechí, que recibe vertimientos de la explotación minera de los municipios de Segovia, Remedios, el Bagre y Zaragoza, se han encontrado altas concentraciones de metilmercurio en los peces, según reportes del sistema de vigilancia epidemiológica de Antioquia para el periodo 1998-2001, se encontró que la contaminación e intoxicación por mercurio en habitantes de esta región alcanzó un promedio del 87 % (2).

Para el año 2013 la producción de oro, en el Bajo Cauca y Puerto Nare, fué de 88.747 kg, como es de esperar al ser Antioquia el mayor productor, se ubica en el primer puesto en consumo de mercurio, con un promedio de 129,22 Toneladas/año que representan el 67 % del consumo del país. Según el informe de la Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia (Corantioquia), la carga contaminante se desconoce dado que no hay valores de referencia de carga de los sólidos suspendidos totales (SST) y DBO₅, sin embargo, las cargas que fueron más representativas en la muestra, fueron las de mercurio y cianuro, en donde, uno de los entables monitoreados reportó una carga de 620 gramos/día de mercurio, con una concentración de 7,84 mg/L de Hg, una de las minas reportó una carga de 961,81 gramos día de cianuro, con una concentración de 3,99 mg/L de cianuro (2).

Según la legislación colombiana se establece que las fuentes hídricas podrán ser destinadas para consumo humano siempre y cuando su concentración de mercurio sea menor a 2,0 µg/L. Desafortunadamente, según la información publicada en el año 2013 por el diario **El Espectador**, se han detectado niveles de mercurio de hasta 5,0 µg/L en la ciénaga de Ayapel (ubicada en el departamento de Córdoba); igualmente, análisis de laboratorio del año 2010 mostraron que las aguas del río Cabí (departamento del Chocó), las cuales sirven como fuente de abastecimiento para el acueducto de Quibdó, presentaban concentraciones superiores a 3,0 µg/L de mercurio. (9)

En consecuencia, por los impactos generados, a causa de la explotación minera aurífera en Colombia, descritas anteriormente, se hace necesaria la búsqueda y aplicación de métodos que sean reparadores y amigables con el ambiente, tales como la biorremediación, que permitan economías sustentables. La literatura reporta que el 35% de los estudios realizados en la búsqueda de métodos eficaces, conservadores y cuidadores del ambiente, corresponden a métodos de adsorción, seguidos con el 20% de estudios en biorremediación, el 15% en investigaciones con nanotecnologías y el 10% con electrocoagulación. (11).

De igual forma, se destaca que desde hace décadas se han desarrollado investigaciones, relacionadas con la biorremediación bacteriana de mercurio y cianuro; sin embargo, la aplicación de hongos y algas, para este fin constituyen áreas menos exploradas. Se están estudiando nuevas áreas dentro de la remediación biológica, tales como la rizorremediación y el uso de plantas transgénicas, mismas que necesitan ser más estudiadas, con el objetivo de explotar aún más su potencial biotecnológico. Por otra parte, se debe profundizar en los

aspectos de aplicación de estos sistemas al tratamiento de efluentes contaminados con mercurio/o cianuro, especialmente lo concerniente a los procesos de extracción y explotación minera (11).

Por las razones anteriores, el presente trabajo tiene como objetivo recopilar información asociada a la biorremediación aplicada al tratamiento de las aguas residuales, contaminadas con cianuro y mercurio, generadas en el proceso de la minería aurífera, mediante una revisión bibliográfica, en la cual se dé cuenta de las características funcionales de los microorganismos asociados a los ecosistemas naturales, su papel ecológico y su variación frente a cambios locales, relacionando los posibles métodos de la biorremediación favorable a las condiciones de los territorios y sus comunidades. Logrando así, dar respuesta a la pregunta:

¿Cuáles con los procesos de biorremediación en aguas residuales contaminadas con cianuro y mercurio, generadas en el proceso de la minería aurífera, a partir de una revisión bibliográfica entre los años 2008 -2018?

3. Justificación

En la actualidad la protección y cuidado del ambiente, se ha vuelto un tema al cual se le debe dar prioridad. El agua es uno de los recursos más importantes, pues este es indispensable para la vida en el planeta, el acceso a él y su tratamiento cada día se hacen más difícil y costoso. Así mismo es un recurso que se ha visto afectado notablemente por la minería aurífera, una de las razones se debe a la contaminación con mercurio y cianuro, los cuales son utilizados para la extracción del mineral.

Debido a los grados de contaminación por mercurio y cianuro en las aguas residuales, se hace necesario el tratamiento de los efluentes, sin embargo, estos tratamientos son principalmente con procedimientos químicos, lo que puede generar grandes costos, además de efectos negativos adversos al ambiente.

Por lo mencionado anteriormente se hace necesaria la búsqueda de alternativas que sean amigables con el ambiente, que puedan mitigar este impacto negativo de forma efectiva, mediante la realización de una revisión bibliográfica sobre los métodos biotecnológicos o biorremediadores, con potencial para el tratamiento de aguas residuales, contaminadas con cianuro y mercurio, provenientes del proceso de extracción minera aurífera, recopilando experiencias realizadas y documentadas, en Colombia.

Con esta revisión se pretendió contribuir al planteamiento de opciones para la degradación del mercurio y el cianuro que impactan negativamente los cuerpos de agua, así como la salud ambiental y humana. Además de servir como insumo que posibilite la investigación y aplicación de las tecnologías de biorremediación en nuestro país; e igualmente crear un soporte teórico sobre el tratamiento de aguas residuales a través de este método y permita a los próximos investigadores, conocer más herramientas que puedan ser aplicadas y potencializadas.

Esta revisión bibliográfica además de poseer en sí misma una relevancia social y de impacto práctico, pretende identificar las posibilidades biorremediadoras o biotecnológicas con potencial para ser empleadas en el tratamiento de las aguas residuales provenientes de la explotación minera aurífera.

4. Objetivos

4.1 General

Identificar los procesos de biorremediación en aguas residuales contaminados con cianuro y mercurio generadas en el proceso de la minería aurífera, en Colombia, a partir de una revisión bibliográfica entre los años 2008 -2018.

4.2 Específicos

- Describir los diferentes métodos o procesos de biorremediación referenciados en la literatura para el tratamiento de aguas residuales, contaminadas con mercurio o cianuro, generadas en el proceso de la minería aurífera.
- Enunciar las características en la cuales los métodos biorremediadores han sido eficaces en la remoción de contaminantes como el mercurio o cianuro, en aguas residuales, generadas en el proceso de la minería aurífera.
- Identificar las ventajas y desventajas de los métodos de biorremediación de aguas residuales, contaminadas con mercurio o cianuro, generadas en el proceso de la minería aurífera en Colombia.

5. Marco legal

5.1 Marco normativo

En este capítulo se expone la normatividad vigente con relación a la protección del ambiente, lo relacionado a la minería en Colombia y lo concerniente al manejo de vertimientos de aguas residuales, con respecto al mercurio y el cianuro.

Cuadro 1 Legislación colombianas para protección y conservación de los recursos naturales y el recurso hídrico, vigentes al año 2019.

Requisito legal	Descripción	Exigencia
Constitución de Colombia (12)	Artículo 80. El Estado planificará el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución. 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 (...)	Artículos 80, 332, 334 y 360
Ley 99 de 1993 (13)	Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA	Se crea el Ministerio del Medio Ambiente como organismo rector de la gestión del medio ambiente y de los recursos naturales renovables, encargado de impulsar una relación de respeto y armonía del hombre con la naturaleza y las CAR
Política nacional para la gestión integral del recurso hídrico (PNGIRH) 2010 (14)	Establece los objetivos, estrategias, metas, indicadores y líneas de acción estratégica para el manejo del recurso hídrico en el país.	Orientar la planificación, administración, seguimiento y monitoreo del recurso hídrico a nivel nacional bajo un criterio de gestión integral del mismo.
Decreto 1076 de 2015(15)	Capítulo 3, Licencias ambientales. Capítulo 11 Departamento de Gestión ambiental de las empresas a nivel industrial.	Se reglamenta el Título VIII 2de la Ley 99 de 1993 sobre Licencias Ambientales. Reglamenta el departamento de gestión ambiental de las empresas a nivel industrial. Compila el decreto 1299 de 2008.

Cuadro 2 Legislación colombiana vigentes sobre el mercurio, para el año 2019

Requisito legal	Descripción	Exigencia
Ley 1658 de 2013. (16)	Reglamentación en todo el territorio nacional para el uso, importación, producción, comercialización, manejo, transporte, almacenamiento, disposición final y liberación al ambiente del mercurio en las actividades industriales, cualquiera que ellas sean.	Artículo 3: Erradíquese el uso del mercurio en todo el territorio nacional, para la minería en un plazo máximo de cinco (5) años.

Cuadro 3 Legislación colombiana vigentes sobre vertimientos a cuerpos de agua, para el año 2019

Requisito legal	Descripción	Exigencia
Resolución 0631 de 2015. (17)	Parámetros fisicoquímicos y valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas (ARnD) y domésticas a cuerpos de aguas superficiales de actividades de minería.	Capítulo VI, artículo 10: Los parámetros fisicoquímicos que se deberán monitorear y sus valores límites máximos permisibles, para la extracción de oro, son: Cianuro (CN ⁻): 1.00 mg/L Mercurio (Hg): 0.002 mg/L
Decreto 1076 de 2015 (15)	Capítulo 7 - tasas retributivas por vertimientos puntuales al agua.	Por el cual se reglamentó la tasa retributiva por la utilización directa e indirecta del agua como receptor de los vertimientos puntuales, y se toman otras determinaciones.

6. Marco conceptual

6.1 Minería

La minería es la actividad económica que se dedica a la exploración y explotación del potencial minero en, lo que permite el aprovechamiento y la obtención de recursos para el beneficio de la nación, de las y los ciudadanos. Es de gran importancia debido a la generación de divisas y recursos para la inversión pública. Además, proporciona la materia prima con la cual se construyen edificios, infraestructura vial, se fabrican pinturas, electrodomésticos, automóviles, fertilizantes y muchos otros objetos que son utilizados diariamente. (18)

6.1.1 Tipos de minería. La explotación minera en Colombia se realiza de dos formas: informal, en la cual se carece de títulos mineros y licencias ambientales; además se incumplen los requerimientos de seguridad social, de seguridad y salud en los sitios de trabajo; y formal, que se da cuando se cumple con la normativa minera, la ambiental, la de trabajo y también es solidaria y responsable en el pago de impuestos y regalías. (1)

Igualmente, la minería formal e informal se pueden realizar de forma artesanal, que es según El Banco Mundial “la explotación de depósitos minerales a pequeña escala, cuyos métodos utilizados son de tipo manual o inclusive el uso de equipos muy simples” (1), o explotación industrial en las cual las tecnologías utilizadas son más complejas y los procesos se realizan a mayor escala.

Por otro lado, de acuerdo a como sea la forma de explotación la minería se denomina subterránea o de socavón, (en la cual se realizan actividades y operaciones mineras desarrolladas bajo tierra o subterráneamente), y minera a cielo abierto, en esta las actividades y operaciones mineras son desarrolladas en la superficie (19)

- **Minería subterránea o de socavón.** Para la extracción del oro, mediante la minera subterránea o de socavón, inicialmente se debe realizar un proceso de exploración, el cual consiste en ubicar zonas donde exista la presencia de minerales cuya explotación sea económicamente rentable (18). En la etapa de beneficio del oro es donde se generan la mayoría de los vertimientos. Está consta de una serie de actividades realizadas con el fin de obtener el metal, sin ningún tipo de desperdicio, inicialmente se realiza un proceso de trituración, en esta se busca reducir el tamaño inicial de la roca hasta que tenga el tamaño óptimo para pasar por la etapa de molienda, generalmente se opera con tamaños de partícula grueso superiores a 2. (20)

Al terminar la etapa de trituración, se realiza la molienda, dónde se pretende reducir el tamaño de partículas, generalmente alrededor del rango de $\frac{1}{2}$ " - $\frac{3}{8}$ ", esta operación se hace con el fin de aumentar el grado de liberación de los minerales de interés, los equipos utilizados en esta etapa están trabajando en vía húmeda. Luego de esto, se realiza una clasificación en donde se separan las partículas de tamaños más gruesos y las más finas, esto para garantizar que las

operaciones siguientes se realicen de forma óptima, al igual que la etapa anterior la maquinaria usada trabaja en vía húmeda. Luego de esto se realiza la operación en la cual se eleva la concentración o mineral determinado mediante equipos de separación produciendo la segregación de dos o más especies mineralógicas y extraer el mineral de interés. En esta etapa es donde se demanda una gran cantidad de agua generando por tanto un mayor vertimiento, hay que resaltar que esta agua no contiene cantidades significativas de sustancias peligrosas. (20)

Posterior a esto se puede realizar el proceso de cianuración o la amalgamación con mercurio, que se describen a continuación:

➤ **Proceso de cianuración:** este se lleva a cabo por medio de una operación dinámica: el material se somete a agitación en una serie de tanques, en los que el oro se disuelve formando un complejo con el cianuro, luego esta solución pasa al proceso de Merrill Crowe, dónde se recupera el oro, el vertimiento de aguas generado en esta parte de los procesos es de cuidado, debido a que su principal contaminante es el cianuro (20)

El proceso de Merrill Crowe, consiste en (20):

- Clarificación: eliminar las partículas sólidas de la solución, en esta la maquinaria utilizada consume agua, pero es la utilizada en el proceso de cianuración.
- Desoxigenación: el oxígeno que fue útil en el proceso de cianuración debe ser anulado, mediante unas bombas de vacío.
- Precipitación de oro: la solución cianuro-oro, es bombeada a tanques herméticamente cerrados en donde se adiciona zinc en polvo y acetato de plomo para la precipitación y sedimentación del mineral. Las descargas se dividen en dos productos un precipitado de oro y una solución estéril de cianuro.
- Filtrado: se realiza la recuperación del concentrado rico en oro y el polvo de zinc en exceso.
- Recirculación: La solución estéril que aún contiene cianuro es recirculada al proceso y se le ajusta a la concentración de entrada al proceso
- Fundición: En este proceso el precipitado de oro y otros minerales, se funde para obtener el lingote.

➤ **Proceso de amalgamación:** consiste en un proceso de concentración basado en la adherencia preferencial del oro por el mercurio, en presencia de agua y aire. (20)

A diferencia de la mediana o pequeña escala, la recuperación se realiza en entables, donde el material es colocado en máquinas trituradoras (cocos) con la adición de mercurio hasta obtener un lodo fino, el cual es llevado a un mezclador con más mercurio para amalgamar el oro y separarlo de elementos menos valiosos. Esta amalgama es separada del resto del material por densidad y es llevada a las compras de oro donde se somete a calcinación evaporando el mercurio y dejando el oro libre. Durante la amalgamación y la calcinación el mercurio es liberado al ambiente en forma de vapores que entran en un ciclo global y

contaminan todo el ecosistema, con impactos en la salud ambiental y humana no solo de los mineros sino de las comunidades (1).

El material restante del lodo fino, que queda en el mezclador luego de extraída la amalgama de mercurio-oro, es llevado a pozos de cianuración por una semana para permitir que el cianuro amalgame el oro, posteriormente esta es mezclada con viruta de níquel que es llevada a fundición para liberar el oro acumulado. Debido a las altas temperaturas y por ser un proceso abierto se liberan al ambiente cianuro, mercurio, plomo, níquel y otros metales pesados, causantes igualmente de efectos negativos a la salud humana y ambiental (21).

6.2 Cianuro

El cianuro es una sustancia química, conformada por carbono y nitrógeno, puede ser un gas incoloro, muy tóxico -potencialmente letal- y corrosivo, que se descompone en contacto con agua. Se conocen varias formas: cianuro de hidrógeno (HCN), cloruro de cianógeno (ClCN), en forma de cristales como el cianuro de sodio (NaCN) o el cianuro de potasio (KCN), éste es soluble, tiene una densidad relativa de 1,52 kg/m³, su punto de fusión es de 653 °C y su peso molecular es 65,108 kg/kg mol. (10)

El cianuro es utilizado en la minería para extraer oro (y plata) del mineral, en particular el que no puede tratarse fácilmente mediante procesos físicos simples como la trituración y la separación por gravedad. Ha sido utilizado en minería desde hace más de un siglo (22)

La industria moderna del oro, utiliza esta sustancia casi exclusivamente como agente lixiviador del oro, debido a que su utilización es más rentable que la de otros agentes y no necesita de otras sustancias químicas para realizar la recuperación del oro. Las soluciones, denominadas lixivaciones, utilizadas a base de agua para extraer y recuperar metales como el oro se denominan hidrometalurgia. Las operaciones de minería del oro utilizan soluciones muy diluidas de cianuro de sodio (NaCN), típicamente entre 0,01% y 0,05% de cianuro (100 a 500 partes por millón) (22).

Los límites permisibles de cianuro en el agua apta para el consumo humano, según la Organización Mundial de la Salud (OMS), tiene como valor referencial 0,07 mg/l, y para la administración de seguridad y salud ocupacional (OSHA), el límite de exposición para el cianuro de hidrógeno (HCN) y para la mayoría de sales de cianuro es de 10 ppm u 11 mg/m³, para una jornada de trabajo de 8 horas diarias (7).

6.2.1 Impacto al ambiente. Para las plantas y los animales, el cianuro es extremadamente tóxico. Derrames de cianuro pueden matar la vegetación e impactar la fotosíntesis y las capacidades reproductivas de las plantas. En cuanto a los animales, el cianuro puede ser absorbido a través de la piel, ingerido o aspirado. Concentraciones en el aire de 200 partes por millón (ppm) de cianuro de hidrógeno son letales para los animales, mientras que concentraciones bajas como 0,1 miligramos por litro son letales para especies acuáticas sensibles. Concentraciones subletales también afectan los sistemas reproductivos, tanto de los animales como de las plantas (23).

6.2.2 Impacto a la salud humana. El impacto y severidad de los efectos causados por la exposición al cianuro depende, en parte, del tipo de compuesto de cianuro (cianuro de hidrógeno gaseoso o sales de cianuro). La exposición a niveles altos de cianuro durante un período breve causa daño al cerebro y al corazón, puede producir estados de coma e incluso la muerte. Las personas que respiran niveles bajos de cianuro durante varios años pueden sufrir dificultades para respirar, dolores del pecho, vómitos, alteraciones en la sangre, dolores de cabeza y dilatación de la glándula tiroides (24).

Algunos de los primeros indicios de envenenamiento por cianuro son: respiración profunda y rápida y falta de aliento, seguido por convulsiones y pérdida del conocimiento. Estos síntomas pueden ocurrir rápidamente, dependiendo de la cantidad de cianuro ingerida. Los efectos a la salud luego de respirar, ingerir o beber grandes cantidades de cianuro son similares. El cianuro entra al cuerpo a través de la piel más lentamente que cuando se respira o ingiere. El cianuro de hidrógeno y las sales de cianuro pueden causar irritación y ampollas en la piel (24).

6.3 Mercurio

El mercurio es un metal noble pesado del grupo IIB, su símbolo Hg, peso atómico de 200,59u. Es el único metal que a temperatura ambiente se encuentra líquido; es de color blanco plateado (10). Es inoxidable, con una gravedad específica de 13,6 g/cm³; su punto de fusión es bajo, 357 °C, y es un muy buen conductor del calor y de la electricidad; su presión de vapor es de 2x10⁻³ mm de Hg 25°C, por ello cuando el mercurio eleva su temperatura por encima de 40°C, produce vapores corrosivos, tóxicos y más pesados que el aire; adicionalmente, es muy soluble en ácido nítrico concentrado, acetileno, amoníaco y cloro (1).

El mercurio, en el medio natural lo podemos encontrar de diferentes formas, las cuales se clasifican en tres, la primera es conocida como mercurio elemental (Hg⁰) o mercurio metálico es un metal brillante de color plateado, es la presentación más pura del mercurio, es utilizado en los termómetros o algunos interruptores eléctricos. El mercurio metálico a temperatura ambiente se evaporará en alguna cantidad, a medida que aumenta la temperatura, más vapores son liberados, estos son inoloros e incoloros (25).

Esta también el mercurio inorgánico (Hg^+ , Hg^{2+}), se da cuando el mercurio se mezcla con elementos como el cloro, azufre y oxígeno; a estos compuestos formados se les conoce como sales de mercurio, se presenta en forma de polvos blancos o cristales y el sulfuro de mercurio es de color rojo, con exposición de luz se vuelve negro (25).

El tercer tipo es el mercurio orgánico, se da cuando éste se mezcla con carbono, en el ambiente se forman el metilmercurio (HgCH_3) o el dimetilmercurio ($\text{Hg}(\text{CH}_3)_2$), estos son altamente perjudiciales para las personas y los animales (9).

6.3.1 Impacto al ambiente. El mercurio afecta al ambiente mediante liberaciones sólidas, como arenas y lodos, escorias de fundición; liberaciones líquidas, tales como: aguas mercuriosas, aguas de destilación ácida, aguas de purificación de oro; también se pueden generar emisiones gaseosas, por evaporación de mercurio metálico, destilación de amalgamas al fuego, destilación de amalgamas en disolución de ácidos, fundición de amalgamas, etc. (1), uno de los efectos más importantes que el mercurio genera al ambiente es su capacidad para acumularse en organismos y ascender por la cadena alimentaria (26).

6.3.2 Impacto a la salud humana. Las principales manifestaciones por intoxicación con mercurio en el organismo humano son: daños al sistema nervioso y daños cerebrales, causando efectos tales como irritabilidad, retrainimiento, temblores, cambios en la agudeza visual, en la audición y problemas con los procesos de la memoria. De igual forma puede causar daño a la cadena del ADN y a los cromosomas, reacciones alérgicas, cansancio, dolor de cabeza, defectos de nacimiento e incluso el aborto(1).

Otros de los síntomas característicos son: las alteraciones del sistema gastrointestinal en donde pueden presentarse náuseas, vómito, diarrea y la llamada “estomatitis mercurial” cuyo principal síntoma es la salivación excesiva (sialorrea), posteriormente pueden aparecer: gingivitis, ulceraciones en la mucosa oral, caída prematura de los dientes y formación de un ribete grisáceo- azulado en las encías (27).

La exposición a mercurio se ha relacionado con el aumento en la mortalidad por insuficiencia renal (nefritis), por los trastornos renales que hacen que el cuerpo excrete demasiadas proteínas en la orina (síndrome nefrótico o nefrosis), en mineros y trabajadores de metalurgia. Adicionalmente, estudios realizados en mineros, en países tales como Eslovenia y China, que tuvieron contacto con el mercurio, evidenciaron una correlación positiva entre las concentraciones urinarias con trazas de mercurio y las alteraciones en la función tubular renal (28).

Se ha evidenciado que los niños y las niñas que viven en áreas con alta explotación minera de oro y uso extensivo de mercurio, tienen alteraciones en el neurodesarrollo, en la respuesta evocada a estímulos auditivos, alteraciones del sistema nervioso vegetativo (acrodinia), que se manifiesta por irritabilidad, fotofobia, eritema de palmas y pies, e hipertensión (29).

La exposición por poco tiempo a altos niveles de vapores de mercurio metálico puede causar efectos como daño pulmonar, náuseas, vómitos, diarrea, aumento de la presión arterial o de la frecuencia cardiaca, sarpullido e irritación de los ojos (30).

6.4 Aguas residuales

Los residuos líquidos generados de la minería aurífera, se pueden dividir en cuatro tipos, estos son:

6.4.1. Aguas mercuriosas. Son las aguas que provienen de los procesos de amalgamación de minerales primarios y de aluvi6n. El mercurio y parte de las amalgamas son arrastrados por la fuerza del agua, igualmente este se encuentra en los lodos formados, dado que el mercurio i6nico (Hg^{+}) presenta alta atracci6n con los lodos (arcillas en forma ani6nica), por su carga el6ctrica opuesta. Una parte del mercurio que se encuentra en los lodos es atrapada en los desarenadores y pozos de sedimentaci6n, sin embargo, otra se escapa a las corrientes de agua natural (1).

6.4.2. Aguas ci6nicas. Estas se forman cuando se neutralizan las colas de cianuraci6n; para realizar este proceso las arenas y lodos residuales son sometidos al lavado y neutralizaci6n mediante el uso de reactivos qu6micos, tales como el hipoclorito y el per6xido de hidr6geno, que no solo neutralizan el cianuro residual presente en esas colas, sino que adicionalmente forman nuevos complejos como son: el cloruro mercurioso ($HgCl$) y el cloruro mercur6ico ($HgCl_2$). Si el compuesto de neutralizaci6n es el hipoclorito de sodio o de calcio y el hidr6xido de mercurio ($Hg(OH)_2$), y si la sustancia neutralizante es el per6xido de hidr6geno, los compuestos de mercurio formados en la cianuraci6n y en la neutralizaci6n, y un poco del mercurio metálico que a6n subsiste, son arrastrados por el flujo de las aguas de lavado a los suelos y a las corrientes de agua (1).

6.4.1 Aguas de destilaci6n ácida. Este es generado cuando las amalgamas obtenidas no se destilan, sino que son disueltas en ácido nítrico o en mezclas de ácido nítrico, ácido clorhídrico y ácido sulfúrico; esta combinaci6n de ácidos en caliente disuelve el oro, el mercurio y otros metales presentes; posteriormente los metales son precipitados y finalmente fundidos. El mercurio disuelto en la soluci6n se recupera por cementaci6n (precipitaci6n), con cobre o hierro, de esta manera se recuperan entre el 95 % y el 98 % del mercurio; luego a las soluciones empobrecidas se les agrega agua y cal para la neutralizaci6n del pH, finalmente se arrojan a los suelos y a las fuentes de agua. En este tipo de residuos el mercurio se encuentra principalmente en Estado metálico y en compuestos como nitratos, cloruros y sulfatos de mercurio (1).

6.4.2 Aguas de purificación de oro. Cuando se realiza el proceso de purificación de oro, también se generan residuos líquidos, esta es su última etapa y permite reducir o eliminar todos los metales acompañantes para aumentar su pureza; el botón de oro obtenido en la fundición y que es una mezcla de metales como cobre, hierro, zinc, plomo, plata y oro, entre otros, se diluye en ácido nítrico y algunos complejos de mercurio son disueltos. Posteriormente el oro es precipitado y la solución pobre se neutraliza con una mezcla de agua – cal; el mercurio en este fluido se presenta en muy poca cantidad en estado metálico y en forma de nitratos, cloruros, cloratos y sulfatos; la solución una vez neutralizada es arrojada a suelos y a corrientes de agua superficial. (1)

6.5 Biorremediación

La biorremediación es una tecnología que utiliza el potencial metabólico de los microorganismos y plantas para limpiar terrenos o aguas contaminadas, también puede definirse como el uso de organismos vivos, componentes celulares o enzimas libres con el fin de realizar una mineralización, transformación parcial o humificación de residuos o agentes contaminantes. Así mismo la Academia Americana de Microbiología define la biorremediación como “la utilización de organismos vivos para reducir o eliminar riesgos medioambientales resultantes de la acumulación de compuestos químicos tóxicos y otros residuos peligrosos”. Según estudios realizados, algunos de ellos consultados en esta revisión bibliográfica, se ha demostrado que los tratamientos por biorremediación, a través del empleo de la actividad biológica natural de los organismos vivos como las plantas, los hongos y las bacterias pueden aplicarse en suelos, sedimentos, lodos, aguas superficiales y subterráneas, logrando efectividad en la remoción de diferentes tipos de contaminantes. Debe tenerse en cuenta que el tipo de tratamiento biorremediador empleado, así como su éxito, dependerá de las condiciones del recurso afectado, de las capacidades de las tecnologías remediadoras, del proceso de tratamiento, del pH, de los tiempos de retención y de las concentraciones en el agua tratada, entre otros.(31)

Según (Lizcano, 2004), La biorremediación, dependiendo del organismo utilizado, se diferencia en fitorremediación, fitorremediación, rizorremediación y bioadsorción principalmente, expresa además en su investigación que los tratamientos biológicos, muestran una serie de ventajas y limitaciones, en comparación con otras tecnologías convencionales (métodos físico-químicos), tales como (11):

Ventajas:

- Son efectivos en cuanto a sus costos.
- Sus tecnologías no son dañinas para el medio ambiente y los contaminantes generalmente son eliminados.
- Se requiere un mínimo o ningún tratamiento posterior.

Desventaja:

- Los tiempos de los tratamientos son mayores, y no pueden emplearse si el tipo de agua – suelo (sustrato) no favorece el crecimiento microbiano.

6.5.1 Tipos de biorremediación

➤ **Biorremediación microbiana.** Existe la posibilidad del uso de bacterias con la propiedad de acumular o metabolizar metales pesados. La utilización de microorganismos que transforman diferentes compuestos nocivos en otros de menor impacto ambiental ha experimentado un gran desarrollo reciente. Aunque las bacterias son las más empleadas en el proceso de biorremediación, también se han empleado otros microorganismos tales como hongos, algas, cianobacterias y actinomicetes para la degradación de compuestos tóxicos en el suelo (32).

Un amplio rango de microorganismos puede metabolizar el cianuro. La bioadsorción es generalmente usada para el tratamiento de metales pesados en desechos, y podría ser empleada para el tratamiento de efluentes que contienen iones metálicos complejos. Un ejemplo de adsorción es la pared celular del hongo *Rhizopus arrhizus*, el cual posee esencialmente varios compuestos orgánicos que incluyen quitina, polisacáridos ácidos, lípidos, aminoácidos y otros compuestos celulares que podrían generar una superficie para la adsorción de complejos iónicos de cianuro y hierro (8).

En este método, las bacterias son las principales responsables de la degradación biológica, exhiben una amplia gama de funciones metabólicas y son capaces de degradar estructuras químicas como el cianuro. La degradación biológica o biodegradación de cianuro se da por la capacidad de ciertos grupos de microorganismos (en su mayoría bacterias), para utilizar compuestos cianurados como fuente de carbono y nitrógeno, este tipo de estrategia biológica se puede aplicar in situ, en medios aeróbicos y anaeróbicos, así como en los crecimientos en suspensión de forma activa y pasiva. Las especies microbianas pueden crecer en múltiples entornos que permitan la captación, el tratamiento, la adsorción y precipitación de cianuro, sus compuestos y metales (8).

Entre los microorganismos más conocidos están los hongos del género *Fusarium*, *Hasenula*, y las bacterias de los géneros *E.coli*, *Pseudomonas fluorescens*, *Citrobacter* y *Bacillus subtilis*. Se han identificado microorganismos que presentaron alto potencial de degradación del contaminante (hasta un 96 % de remoción), tales como: *Pseudomonas*, *Acinetobacter*, *Bacillus*, y *Alcaligenes*. Por otra parte, algunos estudios demuestran la desintoxicación de cianuro por algas, como es el caso de *Arthrospira maxima*, *Chlorella sp.* y *Scenedesmus obliquus* en aguas contaminadas, obteniendo un porcentaje que osciló entre el 86 % y el 90% de remoción del cianuro (8).

➤ **Fitorremediación.** La fitorremediación utiliza las plantas para remover, reducir, transformar, mineralizar, degradar, volatilizar o estabilizar contaminantes. Se han identificado una amplia diversidad de especies que se emplean para este fin. Las fitotecnologías se basan en los mecanismos fisiológicos básicos que tienen lugar en las plantas y en los microorganismos asociados a ellas, tales como: transpiración, fotosíntesis, metabolismo y nutrición (33).

Según **Delgadillo López AE, y otros**, (2011), dependiendo del tipo de contaminante, las condiciones del sitio y el nivel de limpieza requerido; las tecnologías de fitorremediación se pueden utilizar como medio de contención (rizofiltración, fitoestabilización y fitoinmovilización) o eliminación (fitodegradación, fitoextracción y fitovolatilización) (33). Debido a que estas tecnologías pueden ser utilizadas tanto en suelo como en agua, y pueden eliminar diferentes tipos de contaminantes, a continuación, se mencionan solamente las tecnologías que sirven para el tratamiento de aguas residuales contaminadas con mercurio, provenientes de la minería aurífera.

La **rizofiltración**, utiliza las plantas para eliminar del medio hídrico contaminantes a través de la raíz. En la rizofiltración las plantas se cultivan de manera hidropónica. Cuando el sistema radicular está bien desarrollado, las plantas se introducen en el agua contaminada con metales, en donde las raíces los absorben y acumulan. A medida que las raíces se van saturando, las plantas se cosechan y se disponen para su uso final. Algunas de las plantas con capacidad de acumulación de mercurio son: *Azolla caroliniana*, *Polygonum punctatum* y *Myriophyllum aquaticum* (33).

La fitoextracción o fitoacumulación, emplea la capacidad de las plantas para absorber y extraer el contaminante del suelo o agua, especialmente metales, y acumularlo en sus tallos y hojas, en este proceso se elegirá la especie apropiada que será cultivada. Tras haberse llevado a cabo la extracción del contaminante por la planta, se retirará la cosecha, ahora convertida en biomasa enriquecida por el metal pesado que contaminaba el suelo. Posteriormente, se llevará a cabo el tratamiento de la cosecha; por compostaje, compresión o tratamientos termales, por ejemplo, para reducir el volumen y/o el peso de biomasa. Por último, ésta materia prima se procesará como si se tratara de un residuo peligroso, o se reciclará para recuperar los elementos que podrán tener valor económico (33) (34)

La fitovolatilización, se produce a medida que los árboles y otras plantas en crecimiento absorben agua junto con contaminantes orgánicos e inorgánicos. Algunos de estos pueden llegar hasta las hojas y evaporarse o volatilizarse en la atmósfera. Mediante este proceso se han eliminado contaminantes como: compuestos orgánicos volátiles (benceno, nitrobenceno, tolueno, etilbenceno y m-xileno), arsénico (As), selenio(Se) y mercurio (Hg). Una de las plantas que ha sido utilizada para la biorremediación del mercurio es la *Arabidopsis thaliana* (33).

7. Metodología

7.1 Tipo de Estudio.

Se llevó a cabo una revisión sistemática, tipo estado del arte.

Para la construcción de la presente revisión bibliográfica se hizo el planteamiento de la estructura base, que debía contener y así formar los apartados: antecedentes, planteamiento del problema, marco normativo y teórico, por último, la revisión de los artículos y casos de estudio, y el análisis final.

En primera instancia se delimitaron los temas a abordar y las palabras claves, esencialmente se buscó realizar entonces la contextualización temporal y teórica de la contaminación por cianuro y mercurio, principalmente la causada por las aguas residuales generadas por la explotación minera aurífera.

El rastreo inicial, de la información, se realizó a través de los motores de búsqueda Google, Google Académico, así como en bases de datos bibliográficas a las que se logró acceder a través la colección digital de la Universidad de Antioquia, empleando los descriptores: biorremediación de aguas residuales de la explotación minera aurífera, biotecnologías para aguas contaminadas por mercurio y cianuro, y estudios sobre el uso de la biorremediación para la degradación de cianuro y mercurio en aguas residuales provenientes de la minería.

Se realizó entonces la búsqueda de artículos científicos y material académico de diferentes países en donde se presenta explotación minera aurífera, y se utiliza mercurio y cianuro para la obtención del metal, estos artículos debían contener fundamentalmente casos de estudio o revisiones documentales sobre los métodos o procesos de biorremediación utilizados para reducción de estas sustancias químicas, cianuro y mercurio, presentes en las aguas residuales provenientes o generadas, antes de ser descargadas a los cuerpos de agua.

El siguiente rastreo se realizó únicamente a través de los motores de búsqueda Google y Google Académico, empleándose los descriptores: biorremediación de aguas contaminadas con cianuro y mercurio con el primero y, estudio sobre el uso de las biotecnologías en la biorremediación de mercurio y cianuro en aguas residuales provenientes de la minería aurífera, con el segundo.

Posteriormente se realizó una consulta más específica en las bases de datos Science Direct, Springer Link, ACS Publications, Ebsco, Redalyc, Web of Science, Cochrane Library, y en el metabuscador ScienceDirect. La búsqueda se limitó a artículos con respaldo científico, tesis de pregrado, posgrado, maestría y doctorado, comprendidos entre enero de 2008 y enero de 2018. Los descriptores empleados con las bases de datos, antes mencionadas, fueron mercury detoxification, cyanide biosorption, mercury and cyanide phytoremediation; adicionalmente, a lo anterior, en la base de datos Scielo se emplearon los descriptores,

bioadsorción, fitorremediación, rizorremediación de mercurio y /o cianuro, bioremediation of water contaminated with cyanide and mercury. La búsqueda fue efectuada con los criterios establecidos.

Para filtrar aún más la búsqueda se emplearon los filtros suministrados por cada base de datos (Cuadro 4).

Cuadro 4 Filtros empleados en la búsqueda bibliográfica realizada en las bases de datos Science Direct y Springer Link.

Base de datos	Filtros aplicados
Science Direct	Topic: cyanuride and mercury Content type: Journal Date published: 2008-2018
Springer Link	Content type: Article Discipline: Environment Sub-discipline: Pollution and remediation Language: English Date published: 2008-2018

Luego de obtener los reportes con cada descriptor, se verificó a través de los resúmenes de los artículos, la correspondencia con la temática base de esta revisión del tema de biorremediación de aguas residuales contaminadas con cianuro y mercurio provenientes de la explotación minera aurífera.

7.2 Caracterización de artículos viables:

- Decidir sobre impedimentos en relación con el idioma de publicación.
- Decidir sobre las fuentes de obtención de los estudios primarios.
- Elaboración de los títulos y resúmenes de los potenciales estudios primarios.

7.2.1 Selección de artículos potenciales:

- Emplear los criterios de inclusión y exclusión a los títulos y resúmenes obtenidos.
- Obtención de los artículos potenciales a partir de los títulos y resúmenes elegibles y aplicar los criterios de inclusión y exclusión.
- Valorar la concordancia en la selección de los estudios.

7.2.2 Criterios de inclusión y de exclusión.

Criterios de inclusión

- Textos completos.
- Textos académicos (artículos; tesis de pregrado, maestría y doctorado; libros; artículos de periódicos, informes institucionales).
- Publicaciones del año 2008 al 2018
- Escritos en inglés, portugués o español.

Criterios de exclusión

- Textos incompletos
- Publicaciones antes del 2008
- Escritos en idiomas diferentes al inglés, portugués o español.

7.3 Variables de estudio.

Para las variables del estudio se realizará un cuadro que ya ha sido propuesta por otros investigadores, esta fue el insumo principal para los objetivos específicos.

Cuadro 5 Variables de estudio (adaptación para un constructo propio).

Variable	Descripción
Título	Nombre del texto
Autor (es)	Investigador(es) participantes en cada texto o artículo
Fuente	Medio donde fueron publicados los artículos
Criterio de búsqueda	Estrategia de búsqueda utilizada
Año de publicación	Año en que se publicó el texto o artículo de investigación
País de publicación	País en donde fue publicado el texto o artículo de investigación
Idioma	Idioma en que fue publicado el texto
Tipo de documento	Tipo de documento publicado (artículo, trabajo de grado, tesis, entre otros)
Base de datos de origen	Base de datos en donde fue publicado el artículo
Filiación institucional	Vínculo que tiene el investigador(es) del estudio con la institución adscrita
Objetivo	Objetivo de la investigación del documento

Análisis de la información: Se realizó por etapas: al inicio de la búsqueda se encontraron 138 documentos que hablaban sobre la biorremediación en aguas contaminadas, se procedió entonces a filtrar por medio de los criterios de inclusión y exclusión cuales específicamente hablaban sobre la bioremediación de aguas residuales generadas en los procesos de explotación minera aurífera, quedando así 25 documentos, de los cuales al ser filtrados nuevamente, teniendo en cuenta la temporalidad y tomando las publicaciones más recientes quedaron los 7 que se describen en esta revisión de la bibliografía.

Se realizó una síntesis descriptiva de los principales hallazgos encontrados en los siete artículos que conformaron el acervo documental final, a fin de contrastar la información recolectada según los objetivos planteados dentro de la revisión, los cuales se centraron en identificar los métodos de biorremediación en aguas residuales, contaminadas con cianuro y mercurio y las características ambientales que permiten que los métodos biorremediadores sean eficaces en su propósito, además de identificar las ventajas y desventajas de dichos métodos; por tanto, se tuvieron como categorías de análisis a priori las que estaban constituidas implícitamente dentro de los objetivos propuestos y como se mencionó anteriormente, sin embargo la revisión permitió develar algunas categorías emergentes que

también se convirtieron en objeto de análisis de esta revisión identificando otros métodos de biorremediación alternos al método de biorremediación tradicional que refería la evidencia documentada, tales como: la bioacumulación, la bioaumentación y el compostaje. Se resalta además que para el proceso de análisis se contrastaron los diferentes autores para mirar las convergencias y divergencias conceptuales, metodológicas y teóricas frente al fenómeno de estudio. Los resultados igualmente, se compararon a la luz del estado del arte revisado inicialmente.

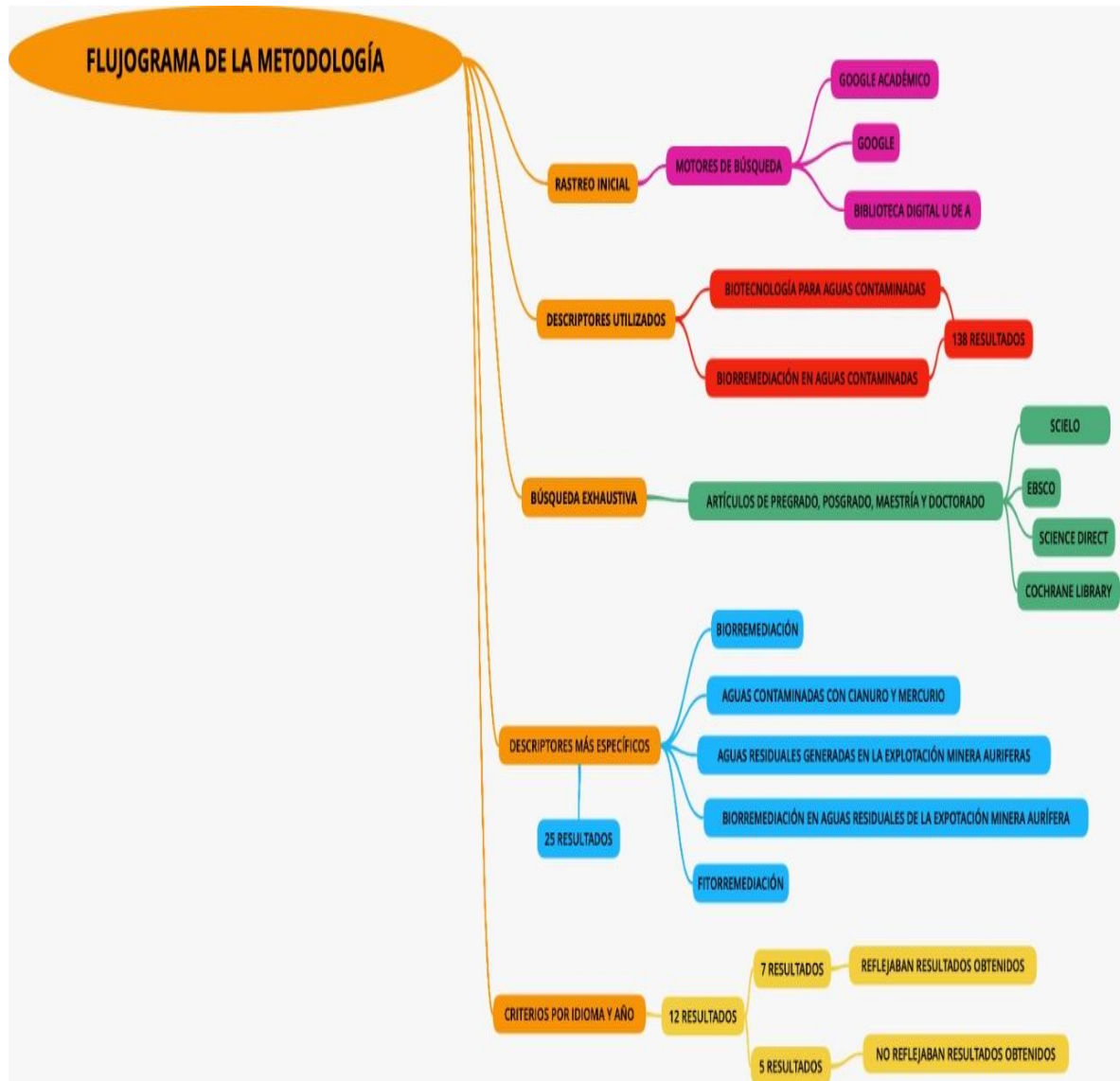


Figura 1 Flujograma de la metodología.

7.4 Gestor de referencia.

Para lograr dicho estudio descriptivo se utilizó, la herramienta “Mendeley”, un gestor bibliográfico documental de información científica, esta herramienta posee ciertas ventajas tales como: el manejo de la documentación, la importación y exportación de fuentes, la posibilidad de compartir documentos entre diferentes personas, entre otras. Este gestor, además, ayuda a crear ecuaciones, gráficas, galaxias de información y tablas de datos que hacen mucho más fácil analizar la información encontrada en los motores de búsqueda.

7.5 Aspectos éticos

De acuerdo con la Resolución 8430 de 1993 creada por el Ministerio de Salud de Colombia, en su Artículo 11, esta investigación es considerada como un trabajo que no lleva consigo riesgo alguno debido a que hace parte del Grupo de Estudios que usan técnicas y métodos de investigación documental retrospectivos, que no realiza ninguna intervención o modificación intencionada de las variables biológicas, fisiológicas, psicológicas o sociales de las personas que participan en el estudio (35).

En esta investigación existe una interrelación entre los principios, los valores y los conocimientos producidos con respecto a un tema específico, es claro que el estudio de la moral, la ética y su filosofía ayudan a resolver conflictos de toda índole e implican un planteamiento de una sociedad organizada y que dialoga con lo que sucede a su alrededor.

De la misma forma, esta investigación científica intervino en la investigadora y en cómo condujo su trabajo de una manera organizada, con un interés social y no particular, con reglas claras para prevenir momentos conflictivos o situaciones que indiquen corrupción. Esta investigación, por tal motivo, no es la excepción, a continuación, se presentarán los valores éticos que se tuvieron en cuenta durante el trabajo.

- ✓ Respeto a los derechos de autor: En este trabajo se mostró respeto por las y los autores que han realizado las diferentes investigaciones.
- ✓ Veracidad: Existió un claro compromiso con la reproducción veraz de todos los trabajos que se mencionen a lo largo de esta investigación teniendo en cuenta que los resultados de las investigaciones pueden ser positivos o negativos.
- ✓ Compromiso: Hubo una obligación a trabajar el tema a investigar y a terminar con los objetivos propuestos en esta Revisión.
- ✓ Responsabilidad social y científica: Se planteó un trabajo que conduzca a mejoras en las condiciones de vida y bienestar de la población o que, en su defecto produzca conocimiento que ayude a superar problemas sociales o científicos.
- ✓ Validez científica: Este trabajo solo tuvo en cuenta investigaciones que generen un conocimiento válido.
- ✓ Elección cuidadosa de las investigaciones: Se realizó una discriminación de las investigaciones que fueron elegidas por razones que tienen correspondencia con la pregunta de investigación (36).

8. Resultados

Para dar cuenta del primer objetivo correspondiente a los métodos de biorremediación existentes, en la revisión de la literatura se encontró que de los siete artículos tomados para el análisis final, tres de ellos describían como método la fitorremediación, para la remoción del mercurio, (así también siete de los autores consultados por los investigadores), tres de los documentos hablaban de la macrofita acuática lenteja de agua (entre el 28 y 30% de remoción), cuatro documentos sobre el Jacinto de agua (30% de remoción), tres documentos sobre elodea canadienses (99% de remoción), uno sobre *typha dominguensis* (99% de remoción), y uno sobre la macroalga *sargassum muticum* (92% de remoción); además, se encontró que los cuatro artículos restantes, también en los autores consultados por las y los investigadores, describían como método la **biorremediación microbiana**, para la degradación del cianuro, una de las investigaciones hablaba sobre los microorganismos liofilizados (97% de remoción), tres de ellas sobre *pseudomonas* sp, una investigación sobre *pseudomonas fluorescens* (ATCC49838, 92% de degradación del cianuro), *streptococcus* sp (C33 con el 91% de porcentaje de degradación), y *bacillus* sp (A74 que presentó el 86,3% degradación), un estudio sobre microorganismos nativos y *pseudomonas pseudoalcaligenes* para la degradación del cianuro; y un inóculo bacteriano para la remoción del mercurio (en una solución de 2 y 5 ppm de mercurio y a una temperatura ambiente se obtuvo una reducción del 97%)

Dentro de los métodos de biorremediación encontrados y descritos fue la fitorremediación, donde **Castrillón Trujillo Vanessa K. y Navarro Aguirre Leydi J.(37) en su tesis de grado denominada** “Evaluar a partir de una revisión bibliográfica la fitorremediación como alternativa remediadora de aguas residuales con presencia de mercurio (Hg), proveniente de la actividad minera aurífera (artesanal y pequeña escala), tomando como referente la minería en el Municipio de Marmato, Caldas”, encontraron que la fitorremediación es un método en el mejoramiento de las aguas contaminadas con contenidos de mercurio, donde las especies vegetales, tiene capacidad de absorción de metales pesados, entre ellos el mercurio, es así como describen como algunas especies de plantas entre ellas la Lenteja de agua (*Lemna minor*), Jacinto de agua (*Eichornia crassipes*) y Elodea (*Elodea canadienses*) (37).

Los resultados mostraron la capacidad de biorremediación de estas, puesto que en concentraciones de mercurio entre los 0,01 mg/l y 0,1 mg/l, no afectó el crecimiento y desarrollo de las plantas. Lo contrario sucedió en concentraciones de mercurio más elevadas entre 1,0 mg/l y 10,0 mg/l donde estas plantas sufrieron una alta tasa de mortalidad y su crecimiento presentó una importante disminución; estos hallazgos demostraron la capacidad de biorremediación de estas plantas, según los pre ensayos de laboratorio, realizados por Posada y Arroyave, (2006) y consultados por Castrillón Trujillo Vanessa K. y Navarro Aguirre Leydi J (37).

En este mismo estudio los autores citan una investigación denominada “Capacidad biorremediadora de la *Lemna minor* en aguas que fueron contaminadas con mercurio”,

basándose en una investigación experimental, según los autores, (Arenas, Meru y Torres, 2011), se tomaron como variables dependientes (concentración de nitrógeno, fósforo, potasio y mercurio foliar; y mercurio en el agua en función del tiempo), las cuales estuvieron sujetas a la acción de las variables independientes (concentración inicial de mercurio en el agua, concentración y cantidad de la solución nutritiva agregada diariamente y tiempo de exposición). Lo que develo como resultado que la concentración de mercurio en (0,133 mg/L) no presentó daños por toxicidad en la planta, al contrario, presentó ser tolerable y no se afectó en su crecimiento y desarrollo. Además, presentó un 30 % de remoción de mercurio en el agua, donde su mayor eficiencia se presentó en los primeros 6 días, lo que la hace una buena alternativa para tratar las aguas contaminadas por mercurio en niveles de 0.13 mg/L (37).

Continuando con el análisis de los métodos de biorremediación, se describe otra investigación realizada por Jaramillo y Flores (2012), donde analizaron la acción fitorremediadora de la Lenteja de agua (*Lemna minor*), en aguas contaminadas por mercurio producto de la actividad minera. Para realizar el experimento, iniciaron con aguas en una concentración de mercurio de 1.2 ppm (Hg) y al final se obtuvo una concentración de 0,366 ppm (Hg) dando una variación de 24% a 26 %. (37). Estos autores resaltan que una de las ventajas que tiene esta planta es su rápida reproducción y que en condiciones adecuadas para su desarrollo pueden absorber altas cantidades de mercurio.

Con respecto a la especie Jacinto de agua, Poma y Valderrama (2014)(37), Hicieron unos estudios donde midieron la capacidad de adsorción de cadmio y mercurio por esta planta (*Eichornia crassipes*), donde se observó la remoción de 5 mg/L de iones metálicos en un litro de solución; se obtuvo un 15,6% de absorción de mercurio en 7 días, lo que demuestra la eficiencia de la fitorremediación, a lo que estos autores concluyeron que esta planta es muy eficiente en la absorción de mercurio en aguas contaminadas. En otra investigación con características similares, Jaramillo y Flores (2012), analizaron la acción fitorremediadora de Jacinto de agua (*Eichornia crassipes*), en aguas contaminadas por mercurio producto de la actividad minera. Para hacer el experimento iniciaron con aguas en una concentración de mercurio de 1.2 ppm (Hg) y al final se obtuvo una concentración de 0,366 ppm (Hg) presentando una absorción de un 28%. Los autores concluyeron que esta planta tiene una alta resistencia a las concentraciones de mercurio (37).

En este mismo sentido, los resultados de la investigación de la capacidad de biorremediación con Elodea (*Elodea Canadiensis*), según Jaramillo (2015) esta macrofitas fue sometida a varias concentraciones de mercurio: 0,39mg/ml, 1,55mg/ml a 6,25mg/ml, esta presentó porcentajes de remoción de 76,5% del 100% y 62,1%, donde la concentración de 1,55mg/ml de cloruro de mercurio ($HgCl_2$), fue removido a un 100%, lo que permite decir que son las mejores condiciones para que el mercurio pueda ser removido por esta planta. Debido a esta investigación se logró comprobar que la Elodea (*Elodea canadiensis*), puede descontaminar aguas con mercurio, debido a que tiene como mecanismos la absorción y adsorción de este metal en los cuerpos de agua (37).

De las anteriores especies de plantas estudiadas las investigaciones, citadas por las autoras, concluyen que las especies: Lenteja de agua (*Lemna minor*), Jacinto de agua (*Eichornia*

crassipes) y Elodea (*Elodea canadensis*), son aprovechables para el tratamiento de las aguas contaminadas con mercurio, claramente reflejado en los porcentajes de remoción obtenidos, teniendo en cuenta que, en los ensayos realizados, la planta *Elodea canadensis* fue la que mayor capacidad de absorción presentó, pues en una concentración de 1.55mg/ml de mercurio (Hg) se logró una remoción de un 100% (37), ellas concluyen que la técnica de fitorremediación es una alternativa para el tratamiento de las aguas contaminadas con mercurio, debido a que es eficaz y de bajo costo, siempre teniendo en cuenta para su eficiencia las especies y que las concentraciones de mercurio estén entre los rangos tolerantes de las plantas (37).

Continuando con los hallazgos en relación a los métodos de biorremediación se describe otra investigación **realizada por Benitez Caicedo, Yeison J (2017), donde se describe un estudio realizado por realizado por Gomes**, de Souza, Teles, & Araújo Méndez, en el año 2014, donde analizaron la capacidad fitorremediadora en aguas contaminadas con mercurio de la planta *Typha domingensis*, la cual redujo en un 99,6% la concentración de mercurio en aguas contaminadas, en comparación con otras especies esta planta tiene mayor capacidad de remoción de mercurio ($273.3515 \pm 0,7234$ mg/kg) (11)

También mencionan un estudio realizado por Carro, Barriada, Herrero, & Sastre de Vicente, (2015) en donde evaluaron la capacidad fitorremediadora de la macroalga *Sargassum muticum* nativa tratada con ácido, para analizar su capacidad de adsorción de mercurio, se tuvo en cuenta un pH 6 y una concentración inicial de mercurio y los tiempos de contacto, los resultados fueron fundamentales para conocer sobre el proceso de adsorción de esta macroalga, la cual la hace una alternativa como biotecnología para tratar las aguas contaminadas con mercurio, ya que tiene como ventaja ser económica en su implementación y no altera de manera negativa el medio donde se utilice (11).

Al hacer comparaciones entre la planta *typha domingensis* y la *elodea canadensis*, antes mencionada, se puede decir que su poder de remoción del mercurio oscila con porcentajes muy similares, entre el 80% y el 96%, en comparación con *la sargassum muticum*, aunque no se describe su poder de remoción destacan su ventaja por ser económica en la implementación y porque describen otras características experimentales a las cuales fue expuesta como el pH y los tiempos de contacto, que no fueron descritos en algunos de los estudios antes mencionados. Es relevante el aporte que señala a la biotecnología en el manejo de aguas contaminadas con metales pesados (11).

Como se puede evidenciar, las investigaciones analizadas anteriormente se enfocan en el mercurio, ninguna menciona la fitorremediación como tratamiento de aguas residuales contaminadas con cianuro generadas en el proceso de la minería aurífera.

Otro de los métodos de biorremediación encontrados fue la **biorremediación microbiana**, en la cual **Deloya M., A. (2012)**, en su investigación experimental desarrollo una forma de tratamiento biológico de desechos de cianuro, a través de un consorcio autóctono de microorganismos. La formación y obtención de estos se logró en periodos prolongados de tiempo, encontrándose los primeros microorganismos a los 72 días en la primera fase del

experimento, a los 66 días en la segunda réplica; a los 63 días en la tercera réplica, y a los 60 días en la cuarta y última. Se usaron como medios protectores, para los microorganismos liofilizados, caldo lactosado y gelatina a diferentes temperaturas (-35, -45, -55, y -65), durante todos los ensayos de liofilización, lográndose apreciar que, aunque con el caldo lactosado se obtuvieron buenos resultados de liofilización, este presentó la desventaja de que el producto final fue difícil de solubilizar durante la recuperación, sin embargo, al emplearse la gelatina, como medio protector, se obtuvo un producto final que presentó excelentes características de solubilidad. Para el tratamiento preliminar de los desechos del cianuro Se estableció, además, en el estudio que las condiciones o características ambientales en donde el proceso fue más efectivo para la remoción del cianuro fue aquel con un pH alcalino de 10,4 unidades de pH, un oxígeno disuelto de 2mg/l, lo que permitió asegurar las condiciones aerobias, pues una deficiencia en este puede disminuir la velocidad de lixiviación del cianuro. Se encontró que el tiempo de liofilización inicial para el secado primario osciló entre las 24 y 36 horas, y para el secundario entre 8 y 10 horas a 200C de temperatura en este. La autora encontró que, bajo estas condiciones, el consorcio de microorganismos liofilizados presentó una viabilidad entre el 70 al 80%, este puede conservarse activo por largo tiempo, aclara ella que incluso por años. Lo anterior le permitió concluir que, para la biorremediación del cianuro, en una muestra de 2500mg/l, en un medio acuoso, influyen factores determinantes para alcanzar una remoción del 95%, y que estos son: el pH, el oxígeno y la concentración del cianuro (6).

Por otro lado, en la tesis de grado de **Marín Vallejo Luz M. Ochoa Ruilova Johana A. Prado Farfán Karina V. (2010)** cuyo objetivo fue el de: “Realizar el análisis comparativo in vitro de bacterias del género *Pseudomonas sp.* Y microorganismos nativos para su uso en proceso de biorremediación *in situ* de sales de cianuro en efluentes mineros”, la cual tuvo lugar en cantón Zaruma, Ecuador; donde se realizó la toma de muestras en una empresa minera, que cuenta con una planta de procesamiento de arenas para la obtención de oro, una relavera para reducir las concentraciones de sales de cianuro por foto descomposición, una mini planta de tratamiento químico que emplea peróxido de hidrogeno y por ultimo dos relaveras para tratamiento físico por membranas (7). En esta investigación se analizaron cepas liofilizadas como las *Pseudomonas fluorescens ATCC 49838*, *C33 Streptococcus sp* y *A74 Bacillus sp.* en la metodología realizada se tomaron diferentes muestras en recipientes de vidrio de color ámbar con una previa esterilización, la primera contenía agua y cianuro, en la segunda muestra se mezclaron agua, arena y cianuro y en la tercera, pulpa. Todas estas muestras se etiquetaron y se conservaron en un cooler a una temperatura baja, a un pH muy alcalino para evitar pérdidas de cianuro en forma de HCN (ácido cianhídrico). Después de las 24 horas se enviaron las muestras a un laboratorio para su análisis dando como resultado en promedio una concentración de cianuro de 121,62 ppm. Para la siembra de las muestras se utilizaron 39 cajas petri, con 12 ml de Tryptic Soy Agar (TSA) (7).

Según los datos suministrados por la investigación, las pseudonomas pueden desarrollarse normalmente a 42°C, sin embargo, de acuerdo a los resultados que este arrojó se determina que la mayor eficiencia para la remoción del cianuro se logra a una temperatura de 32°C. Otra de las variables analizadas fue el tiempo, en donde se considera que el periodo de vida, de formación de colonias y fase de latencia de los microorganismos, influye en el rendimiento siendo el tiempo óptimo de 0 a 4 días con un rango de degradación que oscila entre 80 y 100

ppm, y finalmente el pH óptimo en el proceso de biodegradación de sales de cianuro es de 10 (alcalino). Además, los resultados de la investigación muestran que la capacidad de biorremediación de las cepas estudiadas, fueron las *Pseudomonas fluorescens* (ATCC49838) con un 92%, siguiéndole la cepa correspondiente a la bacteria nativa C33 (*Streptococcus sp*), con un 91%, por último, la cepa correspondiente a la bacteria A 74 (*Bacillus sp*) con un 86,3% (7).

Las autoras concluyen que estas bacterias, tienen como ventaja, que son muy eficientes para la degradación de compuestos tóxicos, desde que se cumplan con las condiciones adecuadas, que se mencionan en los párrafos anteriores, para su desarrollo; igualmente uno de los autores consultados en esta investigación, Glovleva (1990), dice que las pseudomonas son las bacterias más eficientes en la degradación de compuestos tóxicos, que depende de las condiciones ambientales óptimas para su desarrollo, del tiempo de contacto con el contaminante y su versatilidad fisiológica (7). Asimismo, se comprobó que la adición de glucosa fue la fuente energética inicial, que permitió el que las bacterias se adaptarían al medio, y que posteriormente utilizarán en su proceso metabólico al cianuro como una fuente de carbono e hidrógeno, lo que permitió, además, incrementos en el crecimiento bacteriano (7).

En los dos estudios realizados y analizados por **Deloya M., A., y Marín Vallejo Luz M., Ochoa Ruilova Johana A., y Prado Farfán Karina V.**, se evidencia que ambos coinciden en que los microorganismos que fueron estudiados, utilizan en su proceso metabólico el cianuro como una fuente de carbono, logrando así que los compuestos tóxicos del cianuro sean menos contaminantes, o puedan degradarse (6)(7).

Continuando con las investigaciones relacionados con la **biorremediación microbiana**, se analiza la tesis de maestría, realizada por **Cardona Giraldo Edwin A (2015)**, cuyo objetivo fue “Evaluar el efecto de la biorremediación mediante el uso de residuos contaminados con cianuro subproducto de la minería de oro en el establecimiento de especies vegetales” la metodología realizada fue: tomar cinco muestras de aguas y sedimentos de efluentes de minería de oro tratada con cianuro, en cinco puntos diferentes localizados en el Municipio de Marmato, (Caldas-Colombia). Cada muestra fue colocada en un recipiente ámbar de 250 ml, esterilizados en autoclave a 121 °C, y a una atmósfera de presión (15 psi) por 15 minutos, luego fueron refrigerados a una temperatura de 4°C, para luego ser procesados en el Laboratorio de Microbiología Ambiental de la Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín (8).

La investigación fue realizada en 3 etapas, inicialmente en la etapa de aislamiento y purificación, se utilizaron 4 medios de cultivos Agar Nutritivo (AN), medio King A, medio King B y medio para microorganismos Fijadores de Nitrógeno (FN). Cada medio fue preparado por separado, esterilizado en la autoclave a 121 °C 15 psi por 15 min y servido en cajas Petri de acuerdo a la metodología de Ackil (2003). Se realizó tinción de gram para la identificación de las bacterias, en los resultados de esta etapa se observó el crecimiento de 6 tipos de bacterias Gram positiva: Blanca (B). Gram negativa las siguientes: Amarilla (A), Rosada (RS), Cremosa (C), Blanca rugosa (BR), Roja (R) (8).

Posteriormente se realizó la etapa de ensayo experimental *in vitro*, en donde se preparó un medio líquido compuesto por glucosa (1g/L), y cianuro (NaCN) como única fuente de nitrógeno (N), en dos concentraciones las cuales fueron: 100 ppm (0,188 g/L) y 200 ppm (0,376 g/L), el medio se ajustó a un pH de 11 para evitar la formación de HCN (Ácido Cianhídrico) pues este es volátil y puede afectar el desarrollo de los microorganismos, por último, el medio fue esterilizado en la autoclave a 121 °C, y una atmósfera de presión (15 psi) por 15 min (8).

La tercera etapa, degradación del cianuro bajo condiciones *in vitro*, se utilizó un Erlenmeyer de 250 mL, se sirvió el medio con un volumen final de 100 mL, se adicionó 10% de inóculo v/v de cada bacteria que creció y presentó tolerancia al cianuro en el medio sólido, con una concentración de 10⁷ cel/mL. Los tratamientos se agitaron a 100 rpm durante 9 días a 28°C con sus respectivos controles; todos se hicieron con 3 repeticiones. Los resultados obtenidos fueron: Bacteria cremosa con una reducción de 85 ppm, Bacteria blanca rugosa con 79 ppm, la rosada con 33 ppm, la Bacteria blanca con 30 ppm, la amarilla con 11 ppm y la roja con 10 ppm de degradación. Al concluir el ensayo, el conteo bacteriano fue de 10⁷ células/mL mostrando una buena concentración bacteriana, donde se puede observar que el cianuro no inhibió el crecimiento de estas (8).

Continuando con los resultados encontrados, se determina, según el investigador, que la tolerancia del cianuro se presenta de acuerdo al microorganismo, en esta misma investigación se cita a **Luque-Almagro (2005)** donde se halló una amplia gama de tolerancias de cianuro con *Pseudomonas pseudoalcaligenes*, hasta en 780 ppm de CN, con un pH inicial de 11.5, el autor **Boucabeille (1994)** investigo en un medio enriquecido con glucosa *Pseudomonas sp.* tolerando 228 ppm de cianuro y Khamar y colaboradores (2015) encontraron dos cepas bacterianas que pueden tolerar una concentración de 350 ppm de CN (8).

En cuanto al pH, se mantuvo en valores cercanos a 11, como en lo encontrado en otras investigaciones citadas, como: Boucabeille (1994) y Khamar (2015) usan estos valores básicos para evitar la volatilización del cianuro. Khamar (2015) mostro que a un pH de 10 estos microorganismos pueden crecer y así efectuar funciones degradadores (8).

De acuerdo a las ventajas que la *Pseudomonas fluorescens* (ATCC49838) y la bacteria cremosa presentan, se puede concluir que son los dos microorganismos con mayor capacidad para la remoción del contaminante en este caso específicamente el cianuro y que pueden ser implementados al momento de tratar aguas residuales provenientes de la minería aurífera (7)(8).

Así bien, de acuerdo a la información analizada 3 de las investigaciones, coinciden que la degradación del cianuro es más efectiva en medios alcalinos, debido a que en este predomina la forma soluble del cianuro, evitando así que la forma gaseosa HCN (Cianuro de hidrógeno), pase al ambiente (6) (7) (8).

Por otra parte en el trabajo realizado por la profesora principal de la facultad de ciencias y filosofía, **Jasmín E. Hurtado**, de la universidad Peruana Cayetano Heredia (UPCH), sobre la biotecnología al servicio de la minería, caso del mercurio (Hg), que tuvo como objetivo principal “Presentar avances de biotecnologías desarrolladas en el laboratorio de Biotecnología Ambiental de la Universidad Peruana Cayetano Heredia, UPCH, que podrían ser aplicadas para el tratamiento de ambientes donde se realiza minería informal” (38).

La metodología utilizada en el estudio realizado, fue el aislamiento de microorganismos presentes en suelos, aire y ambientes en donde se desarrollarían las pruebas y la resistencia al mercurio de los microorganismos aislados (“crecimiento en medio sólido con diferentes concentraciones de mercurio”). Se probó la capacidad biorremediadora de las cepas seleccionadas, empleando muestras de suelos con 10, 50 y 100 ppm de mercurio y el inóculo bacteriano formado. Después de una semana del proceso biorremediador, a temperatura ambiente, se midió la concentración del contenido final de mercurio en las muestras de suelos comparándolo entonces con un control sin airear y un control aireado. Para probar la capacidad biorremediadora en aguas, se trabajó con solución de 2 y 5 ppm de mercurio y un inóculo bacteriano. Se pudo obtener la reducción del 97%, de mercurio presente, en una hora (38). De acuerdo a la información suministrada en la investigación, se puede definir como condiciones adecuadas para la remoción del mercurio, estar a una temperatura ambiente y de acuerdo con esto llegaría a reducir en 97%, Hg, en una hora. Una de las conclusiones a las que llegó la investigadora es que se ha podido demostrar que los microorganismos aislados, trabajando en conjunto, son capaces de biorremediar los suelos y las aguas contaminadas con mercurio en las condiciones ensayadas. Puede entonces, considerarse a la biorremediación como una alternativa de tratamiento y de mejoramiento, que debe continuar siendo investigada (38).

En la revisión bibliográfica de **Arenas Rodríguez Carlos Alberto, Jaramillo Londoño Mateo Alejandro** (2015), los investigadores se plantean, a través de una recopilación teórica de distintas fuentes, artículos técnicos, tesis de grado, investigaciones realizadas a nivel nacional e internacional, como objetivo “Identificar las tecnologías disponibles para el tratamiento biológico de aguas contaminadas con cianuro, definir sus características técnicas y seleccionar entre ellas la más apropiada para el tratamiento de aguas residuales del proceso de minería aurífera”. estableció los criterios de selección para el tratamiento de las aguas residuales provenientes de la actividad minera, así como la remoción del cianuro y otros compuestos presentes en ellas, teniendo en cuenta entre otras: costos de inversión, eficiencia en la remoción, el uso y disposición final del agua tratada, así como las ventajas y desventajas de los sistemas de tratamiento (39).

El tratamiento planteado por el investigador es biológico aerobio, realizado a través de microorganismos de los géneros *Pseudomonas*, *Alcaligenes*, *Achromobacter*, para formar cianato en la oxidación del cianuro libre, [según Environmental Protection Agency- EPA (1994)]. Como tratamiento biológico secundario propone un sistema biodiscos, utiliza la capacidad de los microorganismos para la remoción de compuestos cianurados existentes en las aguas residuales provenientes del proceso de cianuración. Encontró en su revisión de la literatura que las enzimas que degradan el cianuro son comúnmente generadas por

microorganismos mesófilos, según el investigador, los determinantes en la actividad metabólica bacteriana y en la degradación son la aclimatación progresiva del microorganismo a los niveles de concentración del cianuro, el pH, la humedad, el tipo de nutrientes y la temperatura; después de la obtención de los resultados, comparo diseños experimentales para el tratamiento de aguas cianuradas provenientes de minería aurífera, y determino que es el Contactor Biológico rotatorio (RBC), el que tomaría para su diseño experimental, las ventajas de este son, la aplicabilidad del proceso en efluentes de minería, remoción de compuestos cianurados >95%. Acota, que una desventaja podría ser las temperaturas menores a 100C, en el agua residual, pues puede afectarse la biopelícula, y que si llegasen a presentarse procesos de congelación puede ocasionarse la muerte de los microorganismos. Según el investigador los biodiscos ha demostrado su éxito tanto en laboratorio como en operaciones a gran escala por ejemplo, en la mina Homestake Mining Co. En Dakota del Sur. Concluye en su revisión que los sistemas de tratamiento biológico no solamente tratan cianuro, Tiocianato y Cianato sino también Amoniaco y Nitrato, lo que los hace una opción para el tratamiento de aguas contaminadas con dichas sustancias (39).

Para dar cumplimiento al segundo objetivo correspondiente a las características en las cuales los métodos biorremediadores han sido eficaces en la remoción de contaminantes como mercurio y cianuro, se encontró que de los siete estudios, analizados, y teniendo en cuenta los consultados por las y los autores, habían tres que describían la fitorremediación como método remediador para la remoción del mercurio, indicaron que para el éxito del método, se debían tener en cuenta, **las variables dependientes** (concentración de nitrógeno, fósforo, potasio, mercurio foliar y mercurio en el agua en función del tiempo), **están sujetas a variables independientes** (concentración inicial del mercurio en el agua, concentración y calidad de la solución nutritiva agregada diariamente y el tiempo de exposición), contemplaron la concentración de mercurio para mirar la afectación del crecimiento y mortalidad de las plantas y la efectividad en la remoción, presentando el Jacinto de agua y la lenteja de agua una capacidad de remoción hasta del 30% en **condiciones de PH alcalino**, así lo describen en su investigaciones Arenas, Meru y Torres “Capacidad biorremediadora de la Lemna minor en aguas que fueron contaminadas con mercurio”; Castrillón T. Vanessa K. y Navarro A. Leydi J., en su tesis de grado denominada “Evaluar a partir de una revisión bibliográfica la fitorremediación como alternativa remediadora de aguas residuales con presencia de mercurio (Hg), proveniente de la actividad minera aurífera (artesanal y pequeña escala), tomando como referente la minería en el Municipio de Marmato, Caldas”; Poma y Valderrama (2014), midiendo la capacidad de adsorción del cadmio y el mercurio”.

Igualmente, en los cuatro estudios concernientes a **bioremediación con microorganismos**, para la degradación del cianuro, se indica que para una mayor eficiencia en la degradación del este se debe tener en cuenta, **un pH alcalino** (10,4 unidades de pH), el **periodo de vida de formación de las colonias** (de 0 a 4 días) y **la temperatura** (32⁰C), tal como lo indican estudios hechos por Deloya M., A., sobre los microorganismos liofilizados (97% de remoción), Vallejo Miriam, Arenas Rodríguez Carlos, sobre pseudomona sp, y una investigación realizada por Cardona Giraldo Cdwinn sobre pseudomonas fluorescens (ATCC49838, 92% de degradación del cianuro), streptococcus sp (C33 con el 91% de porcentaje de degradación), y bacillus sp (A74 que presentó el 86,3% degradación); un

estudio sobre microorganismos nativos, en la investigación de Luque-Almagro (2005) sobre las pseudomonas pseudoalcaligenes para la degradación del cianuro; cabe resaltar que en el trabajo realizado por la profesora de la universidad Peruana Cayetano Heredia (UPCH), sobre un inóculo bacteriano para la remoción del mercurio se encontró que en una solución de 2 y 5 ppm de mercurio y a una temperatura ambiente, se obtuvo como resultado una reducción del 97% de la sustancia química.

Para dar cumplimiento al objetivo número 3, correspondiente a las ventajas y desventajas de la biorremediación, en los siete estudios y/o investigaciones, que se analizaron, las y los investigadores consultados, así como a su vez los y las consultados en sus estudios, dan cuenta de los ventajas y desventajas de la biorremediación, según **Lizcano** (2004), consultado en esta revisión bibliográfica, expresa principalmente, además en su investigación, que los tratamientos biológicos, muestran una serie de ventajas y limitaciones, en comparación con otras tecnologías convencionales (métodos físico-químicos), tales como (11): Son efectivos en cuanto a sus costos, sus tecnologías no son dañinas para el medio ambiente y los contaminantes generalmente son eliminados, Se requiere un mínimo o ningún tratamiento posterior, para él, la biorremediación necesita de tiempos de tratamiento mayores, además considera que no puede emplearse este método si el tipo de agua o suelo es desfavorable para el crecimiento microbiano.

Hurtado Jasmin E., también destaca las ventajas de los tratamientos con biorremediación, “Se ha podido demostrar que los microorganismos aislados, trabajando en conjunto, son capaces de biorremediar los suelos y las aguas contaminadas con mercurio en las condiciones ensayadas; muestras de suelos comparadas entonces con un control sin airear y un control aireado, para probar la capacidad biorremediadora en aguas, trabajó con soluciones de 2 y 5 ppm de mercurio y un inóculo bacteriano, logrando obtener la reducción del 97%, de mercurio presente en una hora”, asevera la investigadora que puede entonces, considerarse a la biorremediación como una alternativa de tratamiento y de mejoramiento, que debe continuar siendo investigada. (38). De la misma manera, Arenas Rodriguez Carlos A., y Jaramillo L., Mateo Alejandro, describen ventajas de los tratamientos biorremediadores, y concluyen en su revisión “que los sistemas de tratamiento biológico no solamente tratan cianuro, Tiocianato y Cianato sino también Amoniaco y Nitrato, lo que los hace una opción para el tratamiento de aguas contaminadas con dichas sustancias” (40).

En el artículo publicado de María Isabel Arroyave (2004), sobre la lenteja de agua como una planta promisoría, indica que según (Olguín y Hernández 1998 “la principal ventaja de los sistemas de tratamiento con plantas acuáticas es su bajo costo de construcción y mantenimiento, así como su simplicidad de operación. Además, se utiliza un recurso disponible, hasta ahora no aprovechado en muchos lugares y que puede tener diversos usos. Señala la investigadora que una de las desventajas de esta tecnología, hablando sobre la fitorremediación, es que requiere un área considerable para la construcción de los canales para el tratamiento, y que adicionalmente, se necesita instalar plantas piloto para evaluar variables de diseño específicas para cada región, cada planta y cada tipo de efluente (40).

En el estudio realizado por Restrepo Oscar Jaime, et al., llamado “Degradación Microbiana De Cianuro Procedente De Plantas De Beneficio De Oro Mediante Una Cepa Nativa De *P.fluorecens*” se indica comparativamente que los tratamientos convencionales para degradación de cianuro, suelen ser muy comunes y eficientes, sin embargo presentan desventajas por el alto costo que conlleva la compra de los reactivos necesarios, y que los tratamientos microbianos por su parte, demuestran eliminar grandes cantidades de cianuro de una manera eficiente y económica (41).

9. Análisis y discusión de los resultados.

Analizando los tres artículos, de los siete que finalmente quedaron como acervo documental y que dan cuenta de los métodos bioremediadores: fitoremediación y bioremediación microbiana se puede decir, que para la fitoremediación en particular la concentración de mercurio entre 0.01 mg/l y 0.133 mg/l, utilizando las tres especies en conjunto de forma experimental (lenteja de agua, Jacinto de agua y elodea), no representa daños en el crecimiento de estas y se logra un proceso biorremediador, sin embargo cuando se aumenta la concentración por encima de 1.00mg/l de mercurio las plantas lenteja de agua y Jacinto de agua, afectan su crecimiento y mueren, se destaca entonces que en el estudio experimental solo con lenteja de agua se muestra el porcentaje de remoción del mercurio del 30% describiendo su eficacia en los primeros seis días, lo que no se evidencia en el estudio donde se utilizaron conjuntamente las tres especies, ya que no describe ni porcentaje de remoción, ni temporalidad de la eficacia (37).

El estudio de biorremediación con la planta macrofita Jacinto de agua tiene un diferenciador con respecto a los otros estudios mencionados, que fue la medición de la capacidad de absorción del cadmio, este es un metal pesado relativamente poco abundante pero uno de los más tóxicos, se usa en aleaciones para la fabricación de extintores, alarmas de incendio y fusibles; posiblemente el proceso industrial del cadmio tiene como depósito final las fuentes hídricas, por esto es relevante que esta especie haya sido utilizada para remover otro metal diferente y altamente contaminante, distinto al mercurio (37).

Al hacer el análisis comparativo de la remoción del mercurio entre las tres especies de plantas fitorremediadoras se puede decir que la *elodea canadiensis* tiene un poder mayor de remoción de mercurio cuyo porcentaje supera el 90%, máxime cuando las concentraciones de este metal fueron más altas, con respecto a las otras dos plantas, en este sentido es así como la planta Jacinto de agua alcanza una remoción de mercurio solo del 30%, se explicita que no se evidencio en el estudio experimental con lenteja de agua el porcentaje de remoción, sin embargo; es relevante aclarar que las concentraciones de mercurio utilizadas fueron diferenciales según la especie fitorremediadora.

Al hacer comparaciones con otra especie llamada *typha domingensis*, referenciada en uno solo de los artículos, con la *elodea canadiensis*, antes mencionada, se puede decir que su poder de remoción del mercurio oscila con porcentajes muy similares, entre el 80% y el 96%, en comparación con *la sargassum nativa*, aunque no se describe el poder de remoción de esta última, destacan su ventaja por ser económica en la implementación del tratamiento, describen, además, otras características experimentales a las cuales fue expuesta como el pH y los tiempos de contacto, que no fueron descritos en algunos de los estudios antes mencionados. Es relevante el aporte que señala a la biotecnología en el manejo de aguas contaminadas con metales pesados

Como se identificó en los resultados, la biorremediación microbiana fue el otro método remediador que se encontró, este se diferencia de la fitorremediación por las condiciones o

características relacionadas específicamente con su eficiencia, se da para la remoción del cianuro a una temperatura óptima de 32⁰C, la temperatura en algunos diseños experimentales es controlada a través de laboratorio, mientras que en otros diseños se realiza a temperatura ambiente; sumado a esto, otras características como el pH, el medio protector, es decir; el medio en el que son cultivados, son importantes para el éxito del tratamiento. Si se compara entonces el método microbiano con la fitorremediación se podría decir que existen diferencias ya que este último utiliza las plantas como acción remediadora; para la remoción del mercurio en el agua, el éxito de la remediación dependerá de las concentraciones iniciales de mercurio en el agua, más específicamente a las variables dependientes e independientes, ya escritas en un apartado de esta revisión bibliográfica. Sin embargo, se destacan similitudes en cuanto al poder de remoción del cianuro o mercurio en las aguas contaminadas con estas sustancias químicas, pues los porcentajes de remoción oscilan entre el 95 y el 99% para ambos métodos.

Llama la atención en ambos métodos biorremediadores que no se evidenció en los artículos descritos, el registro del porcentaje de caudal de entrada y salida del agua, es decir cuánto agua contaminada con cianuro y mercurio puede tratarse a través de dichos métodos, tampoco se evidenció cual es la cuantificación de plantas y o microorganismos para biorremediar, aunque en los dos métodos se registra claramente el porcentaje de remoción de mercurio, solo en tres de las investigaciones se refleja el porcentaje de degradación,. No se definen algunas características fisicoquímicas como humedad relativa, geografía del terreno, etc., propiedades estas que son diferentes, puesto que existen varias tecnologías de remoción de mercurio tal y como lo muestra un estudio denominado “Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales”. Realizada por Caviedes Rubio Diego I., y colaboradores (42), estos son la precipitación química, coagulación, osmosis inversa, intercambio iónico y adsorción en carbón activado, tecnologías estas que no se describieron en ninguno de los dos métodos, mientras que la degradación de cianuro incluye diferentes alternativas con métodos de oxidación química o por degradación natural, se emplea actualmente para detoxificar desechos y/o efluentes contaminados, entendiéndose los altos costos que Genera La Utilización De Productos Químicos Tal Y Como Lo Muestra Un Artículo Denominado Degradación Microbiana De Cianuro Procedente De Plantas De Beneficio De Oro Mediante Una Cepa Nativa De *P.fluorecens*, realizado por Oscar Jaime Restrepo y colaboradores (41), al analizar las características que facilitan la remoción de mercurio y degradación de cianuro a través de los diferentes procesos bioremediadores (fitorremediación y bioremediación microbiana) se encontró que un pH alcalino (9,4-11 unidades de pH), favorece tanto la remoción como la degradación, esta característica, es una de las propiedades más importantes del agua ya que esta disuelve casi todos los iones. El pH sirve como un indicador que compara algunos de los iones más solubles en agua. Es así como también otras características tales como la cuantificación y concentración de dichos metales pesados descritas en las fases experimentales muestran que concentraciones mayores de mercurio afectan el crecimiento de las plantas, que condiciones favorables de temperatura por encima de los 20 grados favorece el crecimiento de los microorganismos y las plantas, y si la temperatura está por debajo de los 10 grados los microorganismos tienden a morir, de ahí la importancia que en los estudios se controle la temperatura.

Las principales ventajas de la biorremediación, planteadas por los diferentes autores en los artículos analizados coinciden en que ambos métodos (fitoremediación y bioremediación) microbiana tienen bajos costos en su implementación y ejecución, que es una biotecnología favorable al medio ambiente, que no se necesita mano de obra calificada para llevar a cabo el proceso bioremediador en aguas o suelos esto coincide con una tesis realizada en la universidad de los andes donde se destacan ventajas similares a las descritas en los artículos analizados , “El mayor atractivo de la fitoremediación radica en que se llevan a cabo procesos de descontaminación con una relativa baja inversión”, el autor cita además un estudio realizado por (Pilón, Smits, 2005) (43) quienes en su estudio sobre fitoremediación indicaron “Este mismo efecto se genera cuando se aplica a cuerpos de agua, haciendo que la tecnología, genere adicionalmente procesos de mejoramiento de las características ambientales del mismo, probando ser un proceso que se puede implementar en un marco de desarrollo sostenible”.

igualmente los autores de los artículos analizados resaltan algunas de las desventajas de ambos procesos de bioremediación tales como los tiempos de tratamiento extensos, estos dependen de si el agua o el suelo tienen condiciones para el crecimiento microbiano, esto coincide con el estudio realizado por la universidad de los andes y referenciado anteriormente donde describen como desventajas, el tiempo pues los procesos fitoremediadores dependen de las características de las plantas y del medio en donde crecen o se encuentran, así también el transporte y/o degradación de los contaminantes puede llevarse en periodos de tiempo muy variables (43).

Además un artículo denominado Fitorremediación: fundamentos y aplicaciones, se muestran otras ventajas y desventajas adicionales, tales como que es una tecnología sustentable, eficiente para tratar diversos tipos de contaminantes in situ, no requiere personal especializado para su manejo, ni consumo de energía, no produce contaminantes secundarios y por lo mismo no hay necesidad de lugares para desecho, tiene una alta probabilidad de ser aceptada por el público, ya que es estéticamente agradable , evita la excavación y el tráfico pesado, tiene una versatilidad potencial para tratar una gama diversa de materiales peligrosos, se pueden reciclar recursos (agua, biomasa, metales) (44).

En cuanto a las desventajas de la fitoremediación, en el artículo antes consultado los autores enuncian las siguientes; Es un proceso relativamente lento (cuando las especies son de vida larga, como árboles o arbustos), es dependiente de las estaciones, en los países en donde se presenta, el crecimiento de la vegetación puede estar limitado por extremos de la toxicidad ambiental, los contaminantes acumulados en las hojas pueden ser liberados nuevamente al ambiente durante el otoño (especies perennes), los contaminantes pueden acumularse en las maderas para combustión, no todas las plantas son tolerantes o acumuladoras, la solubilidad de algunos contaminantes puede incrementarse, resultando en un mayor daño ambiental o migración de contaminantes, se requieren áreas relativamente grandes, además pudiera favorecer el desarrollo de mosquitos (en sistemas acuáticos) (44).

las ventajas y desventajas analizadas de dichos procesos de bioremediación dan cuenta de la relevancia de estudiar estos métodos bioremediadores , puesto que el aporte a la salud pública

es inminente entendiendo tal y como lo plantea la FAO, consultado en el artículo “Aporte de la biorremediación para solucionar problemas de contaminación y su relación con el desarrollo sostenible” donde se señala con vehemencia que existe la necesidad de transferencia de tecnologías limpias a las industrias a escala local, regional y global, para el tratamiento de los medios que han sido contaminados por las actividades productivas sin ningún control, contribuyendo así en el corto, mediano o largo plazo, a la búsqueda del objetivo de desarrollo sustentable de reducir sustancialmente el número de muertes causadas por productos químicos peligrosos, la contaminación del agua y el suelo, incluso en las regiones más marginadas, que resultan ser las más afectadas por estas problemáticas (45).

Cada vez más las consideraciones de sostenibilidad en la gestión ambiental se dirigen hacia el desarrollo tecnológico, que involucre la dimensión ambiental, social, económica, política y cultural, para definir los límites de lo aceptable. La aplicación de la biorremediación en la descontaminación de diversos medios afectados por las crecientes actividades productivas, abre nuevos espacios de intercambio público-privado a nivel científico, tecnológico y productivo.

10. Conclusiones

En la actualidad los métodos para el tratamiento de las aguas residuales, resultantes de la explotación minera aurífera, contaminadas con cianuro y mercurio, son físico- químicos, asunto que logra incrementar y aumentar los costos, generando además desechos que son descargados a las fuentes hídricas. La eliminación por métodos biológicos, para el cianuro, se ha realizado con la ayuda de bacterias que se encuentran en la naturaleza, descubriendo que estas lo utilizan como fuente de carbono o nitrógeno, lo asimilan, lo metabolizan y posteriormente lo degradan, en porcentajes hasta del 97%, lo que podría indicar su efectividad y beneficio ambiental para este tipo de tratamientos.

Según las conclusiones de los estudios experimentales realizados, analizados en esta revisión bibliográfica, las biotecnologías o tratamientos biológicos, aplicados a las aguas residuales provenientes del proceso de minería aurífera, podrían ser aplicados, además, en otras actividades productivas. Lo que permite entonces sugerir, que debe tenerse en cuenta que los procesos naturales, son tecnologías económicas y ecológicas, que lograrían proporcionar una alternativa sencilla, con bajos costos, comparativamente con los tratamientos químicos; así también pueden ayudar a prevenir, mitigar, minimizar los impactos y consecuencias en el ambiente y en la salud humana.

Se encontró en la literatura revisada, dos métodos biorremediadores, uno de ellos la biorremediación microbiana, que utiliza las bacterias, hongos y microorganismos, y la fitorremediación, que es el método que utiliza las plantas para el proceso remediador, al hacer la comparación de los dos métodos de biorremediación, identificados en este análisis de la literatura documentada, se destaca que existen diferencias en las condiciones o características relacionadas específicamente a la temperatura cuando se utiliza la biorremediación con microorganismos, puesto que está en algunos diseños experimentales es controlada a través de laboratorio; sumado a esto otras características como el pH, el medio protector, es decir; el medio en el que son cultivadas, deben ser claros y tenidos en cuenta para el éxito del proceso, si se compara entonces el método microbiano con la fitorremediación se podría decir que existen diferencias, ya que la segunda utiliza las plantas como acción remediadora; sin embargo se destacan similitudes en cuanto al poder de remoción del cianuro o mercurio en las aguas contaminadas, con dichas sustancias, pues los porcentajes de remoción oscilan entre el 93% y el 99% en ambos métodos, la fitorremediación (elodea) y la biorremediación microbiana (*streptococcus* sp).

De 25 artículos que hablaban sobre aguas residuales generadas en la minería aurífera contaminadas con cianuro o mercurio, en páginas indexadas, al establecer el criterio por año de publicación se reflejaron 12 artículos, de los cuales 3 mostraban los resultados obtenidos, las características de pH, temperatura, medio protector utilizado, para la biorremediación microbiana, que eran necesarios para el éxito de la remoción o reducción de las sustancias contaminantes, sin embargo, en cuanto al método fitorremediador, la literatura no da cuenta, incluso en los aquí consultados, las variables dependientes e independientes, así mismo tampoco se reflejan el tiempo de crecimiento de las plantas utilizadas en el proceso, y la

edad de estas, si estas características influyen en su eficiencia biorremediadora, cual es el periodo de vida útil de las mismas y cuantas serían las cantidades necesarias (expresada en kilogramos de peso o en unidades de planta), para lograr el mayor porcentaje de efectividad en el tratamiento de las aguas residuales provenientes de la explotación minera aurífera.

Partiendo de los procesos de contaminación de aguas, especialmente aquellas provenientes de la explotación minera aurífera, que en Colombia como en muchos países latinoamericanos y europeos, son generadas en minería subterránea y a cielo abierto, en donde se utiliza cianuro o mercurio para el proceso del mineral y la obtención del metal, las investigaciones sobre biorremediación en aguas residuales con contenido de mercurio y cianuro han sido objeto de investigación desde el siglo pasado, en los 138 artículos que hablaban sobre biorremediación en aguas contaminadas, 75 hacían referencia a las aguas residuales de minería aurífera, 64 artículos hablaban de la macrófita acuática lenteja de agua, para la fitorremediación de aguas residuales y solo 5 de estos hablaban de la planta para la biorremediación de cianuro y mercurio; entre las pesquisas además se encontró que 7 de los artículos hablaban sobre la macrofita Jacinto de agua para la biorremediación de aguas residuales, y solo 5 de ellos hablaban sobre biorremediación para aguas contaminadas con cianuro y mercurio.

Aunque se ha escrito sobre la biorremediación de las aguas residuales, producto de la explotación aurífera, contaminadas con cianuro o mercurio, dentro de las pesquisas realizadas, considero que no existen suficientes documentos con respaldo científico, que reflejen claramente los parámetros de medición de las cargas contaminantes antes del tratamiento y después del mismo, los requerimientos en cuanto a cantidades de plantas o microorganismos, condiciones y características ambientales, para el caudal de agua a tratar o tratado, logrando así cuantificar el beneficio económico, ambiental y social de la aplicación de los métodos biorremediadores. La realización de la revisión bibliográfica, estableció que, las investigaciones sobre biorremediación en Latinoamérica y Colombia, referentes al tema específico (biorremediación en aguas residuales, contaminadas con cianuro y/o mercurio), pusieron en contexto que varios de las investigaciones realizadas en campo, se quedaron en el reflejo de las experiencias y no fueron registrados en documentos con respaldo científico. En la literatura pesquisada, no se encontraron elementos que permitan afirmar o decir, que se puedan usar o no los métodos de biorremediación a gran escala, en grandes empresas de la industria minera por ejemplo; la bibliografía encontrada reporta investigaciones a escala de laboratorio, que no otorgan los elementos técnicos o las herramientas necesarias (caudal, área, temperatura ambiente, geografía, etc.), para diseñar o construir un sistema biorremediador para aguas residuales, contaminadas con cianuro y/o mercurio para la industria extractiva aurífera.

Aunque se vienen haciendo estudios muy interesantes sobre la resistencia de las bacterias *Sudomonas* al cianuro y los microorganismos existentes en la yuca, (bacterias capaces de crecer y vivir en un medio en donde la única fuente de carbono y nitrógeno es el cianuro, adaptadas para vivir en las condiciones climáticas y de ambiente en los territorios colombianos), más precisamente en la extracción de almidón, implementarlo en los procesos biorremediadores de las aguas residuales provenientes de la explotación aurífera no tiene un costo elevado, indican las y los investigadores que sí en cambio depende de las voluntades y

políticas gubernamentales y de quienes desarrollan actividades mineras, pues se necesita apoyo económico para continuar las investigaciones realizadas por el laboratorio de investigación en biocatalizadores, con énfasis en la biorremediación, que viene realizando la Universidad ICESI de la ciudad de Cali, mismo que no pudo plasmarse en esta revisión bibliográfica, debido a que no se obtuvo un documento escrito con respaldo científico.

La actividad minera, en general, debe contemplar alternativas que de alguna manera beneficien a la comunidad y el ambiente, esto definitivamente influye directamente en la sociedad, en el desarrollo sostenible de los territorios mineros y del país en general, considero que la clave del desarrollo sostenible del país, es la búsqueda del beneficio y cuidado de los recursos naturales, es por ello que creo que los métodos biorremediadores se presentan como alternativas económicas que pueden ser utilizadas para la preservación y mejora del recurso hídrico.

Debe tenerse en cuenta estudiar si el tiempo de crecimiento de las plantas utilizadas en los procesos biorremediadores, y la edad de estas, influyen o no en su eficiencia biorremediadora, cual es el periodo de vida útil de las mismas y cuantas serían las cantidades necesarias (expresada en kilogramos de peso o en unidades de planta), para lograr el mayor porcentaje de efectividad en el tratamiento de las aguas residuales provenientes de la explotación minera aurífera.

11. Recomendaciones

Se recomienda a la academia.... implementar dos plantas pilotos de comparación de tratamientos, en una la fitorremediación y en otra la biorremediación microbiana, en lo posible en un mismo sector minero, en Antioquia, por ejemplo, que tenga presente las propiedades de la mineralización y que permita definir los procesos de beneficio adecuado y la limpieza de los contaminantes para las aguas residuales generadas en la obtención del metal de oro; con caudales de entrada y salida medidos y que den cuenta del porcentaje real de las cantidades requeridas de las plantas o microorganismos para el logro de una remoción efectiva, entre el 95% y 99%, como lo muestran las pruebas experimentales en laboratorio.

Al gobierno y dependencias...Se requiere crear alianzas entre la academia, las empresas mineras, incluso los mineros artesanales y a pequeña escala, para lograr construir métodos biológicos que permitan encaminar el trabajo hacia la recuperación biológica y descontaminación de las fuentes hídricas impactadas por la explotación aurífera en Colombia.

A las comunidades académicas, científicas y Corporaciones Autónomas Ambientales...Es importante continuar investigando, plasmar los resultados y adquirir más conocimiento en cuanto a la biorremediación como una alternativa natural, económica y de fácil acceso para las comunidades, los mineros artesanales e incluso las multinacionales. Es fundamental entender que debemos comenzar a realizar más estudios y caracterizaciones que permitan encontrar la viabilidad de utilizar este proceso en las aguas residuales provenientes de la explotación minera aurífera en Latinoamérica y Colombia.

12. Referencias Bibliográficas

1. Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Acuerdo No. MC/4030-09-04-2203 sinopsis Nacional de la Minería Aurífera Artesanal y de Pequeña Escala [Internet]. [consultado 2019 Sep 10]2012. Disponible en: http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/mercurio/Sinopsis_Nacional_de_la_ASGM.pdf
2. Corantioquia. Manual de Produccion y Consumo Sostenible Gestión del Recurso Hídrico [Internet]. [consultado 2019 Sep 10]2016. Disponible en: http://www.corantioquia.gov.co/SiteAssets/PDF/Gestión_ambiental/Producción_y_Consumo_Sostenible/Manuales_GIRH/Mineria_Oro.pdf
3. Pantoja Timarán FH, Pantoja Barrios SD. Problemas y Desafíos de la Minería de Oro Artesanal y en Pequeña Escala en Colombia. Scielo [Internet]. [consultado 2019 Sep 10] 2016;24. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/rfce/v24n2/v24n2a09.pdf>
4. Chadid Díaz A, Molina Barón OY, Palacio Gamboa I, Ruiz Arrighi LM, Serna Correa LP. El entorno laboral minero a nivel Internacional y Nacional: sus efectos en la salud y propuesta de abordaje integral desde lo conceptual [Protocolo presentado como requisito para optar al Título de Especialista en Salud Ocupacional para Médicos] [Internet]. [consultado 2019 Sep 10]. Universidad CES; 2014. Disponible en: http://bdigital.ces.edu.co:8080/repositorio/bitstream/10946/3784/1/Entorno_Laboral_Minero.pdf
5. Gaviria López GH. Tratamiento de aguas residuales del proceso de lixiviación de oro con cianuro a través de oxidación electroquímica [Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de: Magister en Ingeniería – Ingeniería Química] [Internet]. [consultado 2019 Sep 10] Universidad Nacional de Colombia; 2016. Disponible en: <http://bdigital.unal.edu.co/55060/1/1053810926.2016.pdf>
6. Deloya Martínez A. Tratamiento de desechos del cianuro por biorremediación. Tecnología en marcha. 2012 Abril-Junio;25(2):61-72.
7. Marín Vallejo LM, Ochoa Ruilova JA, Prado Farfán KV. Análisis comparativo in vitro de la actividad biodegradadora de bacterias del género Pseudomonas sp. y microorganismos nativos, para su uso en un proceso de biorremediación in situ de sales de cianuro [Tesis previa a la obtencion del Titulo de Ingeniero Ambiental] Universidad Politécnica Salesiana; 2010.
8. Cardona Giraldo EA. Microorganismos Potenciales degradadores de Cianuro en residuos de minería de oro [Tesis como requisito parcial para optar al título de: Magister en Medio Ambiente y Desarrollo] [Internet]. [consultado 2019 Sep 10] Universidad Nacional de Colombia; 2015. Disponible en:

<http://www.bdigital.unal.edu.co/51440/1/75108346.2016.pdf>

9. Diaz Arriaga FA. Mercurio en la minería del oro: impacto en las fuentes hídricas destinadas para consumo humano. *Revista de Salud Pública* [Internet]. 2015 [consultado 2019 Sep 10];16(6):947–57. Disponible en: <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/revsaludpublica/article/view/45406>
10. Unidad de Planeación Minero Energética. Producción mas limpia en la minería de oro en Colombia [Internet]. [consultado 2019 Sep 10] Bogotá; 2007. Disponible en: http://www.corpocaldas.gov.co/publicaciones/1380/Mineria_limpia.pdf
11. Benitez Caicedo, JY. Estado del arte en métodos biotecnológicos potenciales a ser empleados para el tratamiento de aguas o suelos contaminados con mercurio, provenientes de la minería en zonas con antecedentes de explotación minera aurífera [Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Ambiental]. Universidad catolica de Manizales; 2017.
12. Colombia. Constitución Política de Colombia. 1991. [Internet]. [consultado 2019 Sep 10] Disponible en: <https://www.ramajudicial.gov.co/documents/10228/1547471/CONSTITUCION-Interiores.pdf>
13. Colombia. El Congreso de Colombia. Ley 99 de 1993 por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan [Internet]. [consultado 2019 Sep 10] 1993. Disponible en: <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=297>
14. Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico | Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [Internet]. [consultado 2019 Sep 10]. Disponible en: <http://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article/1932-politica-nacional-para-la-gestion-integral-del-recurso-hidrico>
15. Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Decreto 1076 de 2015 por el cual se expide el Decreto Único [Internet]. [consultado 2019 Sep 10] 2015. Disponible en: https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma_pdf.php?i=78153
16. Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Ley 1658 de 2013 por medio de la cual se establecen disposiciones para la comercialización y el uso de mercurio en las diferentes actividades industriales del país, se fijan requisitos de incentivos para su reducción y eliminación y se dictan otras dispos [Internet]. [consultado 2019 Sep 10] 2013. Disponible en:

- <http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/mercurio/https://www.ambienteysociedad.org.co/ley-1658-del-15-de-julio-de-2013/.pdf>
17. Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Resolución 631 de 2015 por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. [Internet]. [consultado 2019 Sep 10] 2015. Disponible en: https://docs.supersalud.gov.co/PortalWeb/Juridica/OtraNormativa/R_MADS_0631_2015.pdf
 18. Colombia. Ministerio de Educación Nacional. Sector minero minerales oro y carbono [Internet]. [consultado 2019 Sep 10] Bogotá D.C; 2017. Disponible en: https://www.mineducacion.gov.co/1759/articles-362826_recurso.pdf
 19. Colombia. Ministerio de minas y energía. Glosario Técnico Minero [Internet]. [consultado 2019 Sep 10] Bogotá D.C; 2003. Disponible en: <https://www.anm.gov.co/sites/default/files/DocumentosAnm/glosariominero.pdf>
 20. Colombia. Ministerio de Minas y Energía, Unidad de Planeación Minero Energética. Guía de orientación para el minero sobre el correcto manejo de vertimientos para la minería de metales preciosos y de carbón [Internet]. [consultado 2019 Sep 10] Bogotá D.C; 2015. Disponible en: http://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/EstudiosPublicaciones/Guia_orientacion_correcto_manejo_vertimientos.pdf
 21. Arias-Lafargue T, Fernández-Compta D, Sánchez-Rodríguez Y, Lasserra-Portuondo A. Influencia de la lixiviación en la recuperación de oro en la Mina Oro-Barita de Santiago de Cuba. Scielo [Internet]. [consultado 2019 Nov 5] 2017;37(3). Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852017000300008
 22. Logsdon MJ, Hagelstein K, Mudder TI. El Manejo del Cianuro en la Extracción de Oro [Internet]. [consultado 2019 Sep 10] Ottawa, Ontario; 2001. Disponible en: <http://www.panoramaminero.com.ar/ICMME.pdf>
 23. Ruiz Caro A. Situación y tendencias de la minería aurífera y del mercado internacional del oro [Internet]. [consultado 2019 Sep 10] Santiago de Chile; 2004. Disponible en: https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/6438/1/S045359_es.pdf
 24. Agencia para sustancias tóxicas y el registro de enfermedades (ATSDR). Cianuro (Cyanide) [Internet]. [consultado 2019 Sep 10] 2006. Disponible en: https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts8.pdf
 25. Agencia para sustancias tóxicas y el registro de enfermedades (ATSDR). Resumen de

Salud Pública: Mercurio (Azogue) (Mercury) | PHS | ATSDR [Internet]. [consultado 2019 Sep 10]. Disponible en: https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs46.html

26. Vera Rodriguez JA. Remoción de mercurio en aguas contaminadas mediante microorganismos tolerantes, una aproximación a la Biorremediación microbiana [Proyecto de grado para obtener el título de: Ingeniero Ambiental]. Universidad Santo Tomas; 2016.
27. Escuela Nacional de Medicina del Trabajo. Agentes químicos en el ámbito Sanitario [Internet]. [consultado 2019 Nov 5] 2010. Disponible en: <http://publicaciones.administracion.es>
28. Organización Mundial de la Salud. Prevención de enfermedades mediante la creación de ambientes saludables [Internet]. [consultado 2019 Nov 5]. Disponible en: https://www.paho.org/col/index.php?option=com_docman&view=download&category_slug=publicaciones-ops-oms-colombia&alias=1594-mercury-asgm-es&Itemid=688
29. Colombia. Ministerio de Salud y Protección Social. Evaluación del grado de contaminación por mercurio y otras sustancias tóxicas, y su afectación en la salud humana en las poblaciones de la cuenca del Río Atrato, como consecuencia de las actividades de minería [Internet]. [consultado 2019 Nov 5] Bogotá; 2018. Disponible en: <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/VS/PP/SA/protocolo-sentencia-t622-vcolciencias.pdf>
30. Agencia para sustancias tóxicas y el registro de enfermedades (ATSDR). ToxFAQs sobre el Mercurio [Internet]. [consultado 2019 Sep 10] 1999. Disponible en: https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts46.pdf
31. González Rojas EH. Concepto y estrategias de biorremediación. *Inge@uan*. 2011;1(1):20–9.
32. Torres Rodríguez D. El papel de los microorganismos en la biodegradación de compuestos tóxicos. *Redalyc* [Internet]. [consultado 2019 Sep 10] 2003;12(2):1–5. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=54012219>
33. Delgadillo López AE, González Ramírez CA, Villagómez Ibarra JR, Acevedo Sandoval O. Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* [Internet]. [consultado 2019 Sep 10] 2011;14(2):597–612. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-04622011000200002&lng=es
34. Bayón Sanz S. Aplicación de la fitorremediación a suelos contaminados por metales

- pesados [Trabajo fin de grado. Departamento de Edafología] . Universidad Complutense Facultad de Farmacia.
35. Colombia. Ministerio de Salud. Resolución número 8430 de 1993 por la cual se establecen las normas científicas, técnicas y administrativas para la investigación en salud. [Internet]. 1993. Disponible en: <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/DE/DIJ/RESOLUCION-8430-DE-1993.PDF>
 36. Avila MG. Aspectos Éticos de la Investigación Cualitativa [Internet]. Disponible en: <https://www.oei.es/historico/salactsi/mgonzalez5.htm>
 37. Castrillon Trujillo VK. Evaluación de la Fitorremediación como Alternativa para el Tratamiento de Aguas Residuales Contaminadas con Mercurio Producto de la Minería Aurífera (artesanal y pequeña escala) [Monografía para optar al título de Ingeniero Ambiental]. Universidad Nacional Abierta y a Distancia; 2016.
 38. Hurtado JE. La Biotecnología al servicio de la Minería: caso del mercurio [Internet]. [consultado 2019 Sep 10]. Disponible en: <http://conferencia2013.consortio.edu.pe/wp-content/uploads/2014/09/3.-Minería-Hurtado.pdf>
 39. Arenas Rodríguez CA, Jaramillo Londoño MA. Planteamiento y evaluación de un tratamiento biológico para agua residual proveniente de proceso de minería aurífera [Trabajo de grado de pregrado para participar como asistente de investigación en un macro proyecto] [Internet]. [consultado 2019 Sep 10] Universidad Católica de Manizales; 2015. Disponible en: <http://repositorio.ucm.edu.co:8080/jspui/bitstream/handle/10839/1322/MateoAlejandroJaramilloLondoño.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
 40. Arroyave M del P. La lenteja de agua (lemna minor l.): una planta acuática promisoría. Revista EIA. 2004;(1):33–8.
 41. Restrepo OJ, Montoya CA, Muñoz NA. Degradación microbiana de cianuro procedente de plantas de beneficio de oro mediante una cepa nativa de P.Fluorecens. Scielo. 2006;73:45–51.
 42. Caviedes Rubio DI, Muñoz Calderón RA, Perdomo Gualtero A, Rodríguez Acosta D, Sandoval Rojas IJ. Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. Una Revisión. Ingeniería y Región. 2015;13(1):73.
 43. González Gómez JD. Fitorremediación: una herramienta viable para la descontaminación de aguas y suelos. Universidad de los Andes; 2010.

44. Núñez López RA, Meas Vong Y, Ortega Borges R, Olguín EJ. Fitorremediación: fundamentos y aplicaciones. Ciencia. 2004;
45. Garzón JM, Rodríguez Miranda JP, Hernández Gómez C. Aporte de la biorremediación para solucionar problemas de contaminación y su relación con el desarrollo sostenible. Scielo [Internet]. 2017;19(2):309. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.22267/rus.171902.93>