



**BIORREMEDIACIÓN DE SUELOS Y AGUAS CONTAMINADAS POR LA  
MINERÍA, EN EL MUNICIPIO DE ISTMINA – CHOCÓ: UNA REVISIÓN  
DOCUMENTAL**

**JUSSY ZAHYR RÍOS OREJUELA**

**UNIVERSIDAD COLEGIO MAYOR DE CUNDINAMARCA  
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA SALUD  
PROGRAMA DE BACTERIOLOGÍA Y LABORATORIO CLÍNICO  
BOGOTÁ, D.C., DICIEMBRE 2019**



**BIORREMEDIACIÓN DE SUELOS Y AGUAS CONTAMINADAS POR LA  
MINERÍA, EN EL MUNICIPIO DE ISTMINA (CHOCÓ): UNA REVISIÓN  
DOCUMENTAL**

**Monografía requisito para optar por el título de Bacterióloga y Laboratorista  
Clínico**

**JUSSY ZAHYR RÍOS OREJUELA**

**Asesora**

**MARTHA LUCIA POSADA BUITRAGO Ph.D.**

**UNIVERSIDAD COLEGIO MAYOR DE CUNDINAMARCA  
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA SALUD  
PROGRAMA DE BACTERIOLOGÍA Y LABORATORIO CLÍNICO  
BOGOTÁ, D.C., DICIEMBRE 2019**

## DEDICATORIA

*El presente trabajo investigativo lo dedico principalmente a Dios, por haberme dado la vida, por ser el inspirador, por darme fuerza para continuar en este proceso y por permitirme llegar hasta este momento tan importante de mi formación profesional.*

*A la memoria de mi abuela materna, Elssy Mosquera Gutiérrez, quien me animó en este campo de estudio y, durante su paso por mi vida, siempre me educó y se sacrificó para lograr en mí un ser admirable.*

*A mi madre Zahyr Francis, por su amor, trabajo y sacrificio en todos los años, gracias a ella he logrado llegar hasta aquí y convertirme en lo que soy. Ha sido un orgullo y privilegio de ser su hija, es la mejor madre.*

*A mi hermano Justin Yair, por estar siempre presente, acompañándome y por el apoyo moral, que me brindó a lo largo de esta etapa de mi vida.*

*A todas las personas que me han apoyado y han hecho que el trabajo se realice con éxito, en especial a aquellos que me abrieron las puertas y compartieron sus conocimientos.*

## AGRADECIMIENTOS

*Agradezco infinitamente a Dios, porque sin él no fuera sido posible este logro, su bendición y su gracia siempre me acompañaron en cada instante de mi valiosa vida.*

*A mi madre, a mi hermano y a mi novio, por ser los pilares fundamentales, y por haberme apoyado incondicionalmente, pese a las adversidades e inconvenientes que se presentaron.*

*Gracias a mi asesora de tesis Martha Lucia Posada Buitrago, quien con su experiencia, conocimiento y motivación, me orientó y me acompañó, en este camino de formación.*

*A mis amigos que gracias a su apoyo moral me permitieron permanecer con empeño, dedicación y cariño.*

*A la Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca, a toda la facultad de Ciencias de la Salud, a mis profesores, quienes con la enseñanza de sus valiosos conocimientos, me hicieron crecer día a día como profesional.*

## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	10
INTRODUCCIÓN.....	12
OBJETIVOS.....	17
1. ANTECEDENTES.....	18
2. MARCO TEÓRICO.....	20
2.1 MINERÍA EN ISTMINA - CHOCÓ.....	20
2.2 MÉTODOS DE EXPLOTACIÓN DE ORO Y PLATINO.....	22
2.2.1 Minería Artesanal.....	22
2.2.1.1 Técnicas utilizadas en la Minería artesanal.....	23
2.2.2 Minería Mecanizada o con Maquinaria pesada.....	24
2.2.2.1 Técnicas utilizadas en la Minería Mecanizada.....	25
2.3 SUSTANCIAS TÓXICAS RESULTANTES DE LA ACTIVIDAD MINERA.....	28
2.3.1 Mercurio.....	29
2.3.1.1 Fisiopatología del Mercurio.....	30
2.3.1.2 Toxicidad del mercurio.....	32
2.3.1.3 Ciclo Biogeoquímico del Mercurio.....	35
2.3.1.4 Biotransformación en el Ciclo Biogeoquímico del Mercurio.....	36
2.4 BIORREMEDIACIÓN.....	38
2.4.1 Biorremediación de Mercurio.....	39
2.4.1.1 Remediación de mercurio utilizando bacterias.....	40
2.4.1.2 Remediación de mercurio utilizando hongos.....	43
3 DISEÑO METODOLÓGICO.....	46
3.1 Tipo de Investigación.....	46
3.2 Población de estudio.....	46
3.3 Métodos.....	46
4 RESULTADOS.....	48
5 DISCUSIÓN.....	57
6 CONCLUSIONES.....	65
7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	66

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Mapa de localización de las áreas contaminadas.....	<b>21</b>
<b>Figura 2.</b> Materiales de la Minería Artesanal.....	<b>22</b>
<b>Figura 3.</b> Motor de la Minería Mecanizada.....	<b>26</b>
<b>Figura 4.</b> Retroexcavadora de la Minería Mecanizada.....	<b>28</b>
<b>Figura 5.</b> Ciclo Biogeoquímico del mercurio.....	<b>36</b>
<b>Figura 6.</b> Biotransformación del ciclo del mercurio.....	<b>37</b>
<b>Figura 7.</b> Biorremediación de mercurio.....	<b>39</b>
<b>Figura 8.</b> Esquema general del <i>operón mer</i> .....	<b>41</b>
<b>Figura 9.</b> Selección de información.....	<b>49</b>
<b>Figura 10.</b> Temas de interés.....	<b>50</b>
<b>Figura 11.</b> Base de datos analizados.....	<b>51</b>
<b>Figura 12.</b> Documentos revisados.....	<b>57</b>

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla1.</b> Microorganismos en Biorremediación de Hg.....	<b>45</b>	<b>Tabla</b>
<b>2.</b> Material Documental Seleccionado.....	<b>51</b>	



## **BIORREMEDIACIÓN DE SUELOS Y AGUAS CONTAMINADAS POR LA MINERÍA, EN EL MUNICIPIO DE ISTMINA (CHOCÓ): UNA REVISIÓN DOCUMENTAL**

### **RESUMEN**

En el municipio de Istmina (Chocó, Colombia) la minería se ha llevado a cabo como una actividad productiva, que no garantiza la sostenibilidad ambiental, ocasionando cambios drásticos en la estructura del suelo, que incluyen la degradación del paisaje, la pérdida de cobertura vegetal, el aumento del material particulado, sedimentación, erosión, hundimientos e inestabilidad del terreno. En relación con el recurso hídrico, la minería en el municipio, ha afectado la dinámica de las aguas superficiales y subterráneas, la interrupción o redireccionamiento de flujos, la extracción y desecación de acuíferos, el cambio en la capacidad de almacenamiento y regulación del agua; y el incremento de la contaminación en el ambiente principalmente con mercurio. El problema esencial en este contexto tiene que ver con la falta de implementación de estrategias, mecanismos y acciones enfocadas a la recuperación de las áreas degradadas en el municipio, tanto de la Alcaldía local como de las comunidades u organizaciones locales, de la mano del incumplimiento de las directrices y normas legales relacionadas con el ordenamiento y el manejo apropiado del territorio. La biorremediación surge como propuesta de método para disminuir el impacto ambiental negativo de la minería, en los diferentes ambientes (agua y suelos) en el municipio de Istmina.

**Palabras Claves:** *Minería, contaminación, suelo, agua, áreas degradadas, mercurio, biorremediación.*



Estudiante: Jussy Zahyr Ríos Orejuela

Docente: Martha Lucia Posada Buitrago

Institución: Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca

Diciembre de 2019

## ABSTRACT

In the municipality of Istmina (Chocó, Colombia) mining has been carried out as a productive activity, which does not guarantee environmental sustainability, causing drastic changes in soil structure, which include landscape degradation, loss of vegetation cover, the increase of particulate material, sedimentation, erosion, subsidence and instability of the land. In relation to the water resource, mining in the municipality has affected the dynamics of surface and groundwater, the interruption or redirection of flows, the extraction and desiccation of aquifers, the change in storage capacity and water regulation; and the increase of pollution in the environment mainly with mercury. The essential problem in this context has to do with the lack of implementation of strategies, mechanisms and actions focused on the recovery of degraded areas in the municipality, both of the local mayor's office and of local communities or organizations, in the hands of non-compliance of the legal guidelines and norms related to the planning and proper management of the territory. Bioremediation arises as a proposed method to reduce the negative environmental impact of mining, in the different environments (water and soil) in the municipality of Istmina.

**Keywords:** *Mining, pollution, soil, water, degraded areas, mercury, bioremediation.*

## INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de revisión, está centrado en realizar una documentación sobre la biorremediación en los suelos y aguas contaminados por la minería en el municipio de Istmina (Chocó). La minería en Colombia se ha convertido en una actividad que afecta la calidad de vida, especialmente la relacionada con la extracción de oro y platino, ya que esta utiliza sustancias químicas con alto grado de toxicidad, siendo una de ellas el mercurio, con el cual de manera directa o indirecta contamina el medio ambiente, deteriora la salud de las personas que ejercen la actividad minera y de los demás seres vivos que utilizan estos recursos deteriorados para satisfacer sus necesidades básicas.

Aproximadamente la mitad de la población del municipio de Istmina, labora independiente en la minería de tipo artesanal o manual, que es de subsistencia, la cual se realiza en terrenos de superficie o en terrenos creados por aluvión de materiales y en pequeñas parcelas, en la que se utilizan materiales caseros de ornamentación y de construcción (batea, almocafres, barretones, mates y canalones), se separa el metal con mercurio. Se requiere de un mayor esfuerzo físico de las personas, con bajos índices de productividad y recuperación; además, no se tienen condiciones de seguridad, ni de técnicas, ni de salubridad para las personas que la ejercen. En contraste, se encuentra la minería de tipo mecanizada o semi industrializada, que la practican los foráneos, caracterizada por el uso de maquinarias pesadas como retroexcavadoras, dragas y motores, con las que extraen mayor cantidad de metales, e igualmente se utiliza mercurio y otras sustancias para separar el oro y platino de la arena; se logra obtener muy buena remuneración económica, razón por la cual algunos habitantes del municipio de Istmina, se interesan por trabajar como empleados de las empresas multinacionales presentes en la zona. Aunque las dos técnicas de extracción afectan negativamente

el medio ambiente, la minería tecnificada o mecanizada, es la más agresiva, pues es la mayor causante de la contaminación de las fuentes hídricas y de los suelos (1).

A partir de lo anterior, surge la necesidad de disminuir el impacto ambiental negativo de la minería, en los diferentes ambientes (agua y suelos), que se evidencia con el deterioro de la flora y la desaparición de la fauna, también con las transformaciones del estado natural de los ríos y quebradas, tales como: la sedimentación, el cambio del cauce, desbordamiento de sus aguas y la extinción de algunas especies. Se hace necesario realizar tratamiento a los suelos y aguas afectados por altos contenidos de mercurio, para lo cual se desarrollaron procesos de remediación químicos y físicos, que fueron eficientes al comienzo de sus operaciones, pero con el tiempo se identificaron desventajas como los altos costos y el uso de elementos químicos que contaminan aún más las fuentes naturales que se quieren remediar; por tal motivo las instituciones interesadas en disminuir la contaminación con sustancias químicas, implementaron el desarrollo de tecnologías limpias de remediación, como por ejemplo la biorremediación, en donde se hace el uso de microorganismos, enzimas degradadoras de mercurio y de algunos otros contaminantes presentes en el ambiente.

La biorremediación ya sea *in situ* o *ex situ*, ha demostrado ser una tecnología efectiva para el tratamiento de la contaminación con mercurio de suelos y aguas, el proceso se basa fundamentalmente en la capacidad de ciertos grupos biológicos de soportar altas concentraciones de mercurio presentes en los medios donde se encuentran. Los mecanismos de esta resistencia se encuentran codificados en genes que les permite modificar la forma contaminante, usualmente el metilmercurio, y transformarlo en una forma menos tóxica o en mercurio elemental. Adicionalmente, puede presentarse una acumulación o retención del químico en la

biomasa microbiana. De otro lado, en los últimos tiempos existe una tendencia a realizar mejoramiento genético a ciertas especies microbiológicas (transgénicas) para que presenten la capacidad de tolerar altas concentraciones de mercurio en el suelo y eliminar o disminuir su capacidad tóxica (2,3).

Para llevar a cabo el proceso de biorremediación de suelos y aguas, es necesario de la ayuda y acompañamiento de profesionales de diferentes áreas del conocimiento, además de determinar las características fisicoquímicas del ambiente a remediar, determinar el contaminante, identificar la comunidad microbiana que está en el ambiente y decidir cuál estrategia de biorremediación se va a utilizar. Vale la pena anotar que CODECHOCÓ, máxima autoridad ambiental en el departamento, ha identificado al mercurio como el contaminante más frecuente encontrado en agua y suelos, con valores de 25.3 mg/L y 136 mg/Kg respectivamente, donde se realiza la actividad minera en el municipio de Istmina; esto se explica porque en la minería se utiliza el mercurio, como método fácil, rápido y económico para el desarrollo de su actividad (1).

Según la resolución 631 de 2015, expedida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), los valores límites máximos permisibles de mercurio (Hg) en los vertimientos puntuales de Aguas Residuales no Domésticas (ARnD) a cuerpos de aguas superficiales de las actividades de minería, son de 0.002 mg/L(4); aunque en Colombia no hay normatividad ambiental que establezca los valores para definir suelos contaminados por mercurio (Hg), existen valores de referencia para niveles permisibles como los citados por Camargo y colaboradores en el 2014, los máximos permitidos en México son 23 mg/kg para uso agrícola y 310 mg/kg para uso industrial (NOM -147-SERNAT/SSA1 – 2004), y entre 0.08 y 1.40 mg/kg en suelo agrícola establecidos por Community Bureau of Reference (BCR) (SRM 2709 ) y de 0.07-0.3 mg/kg definidos en el marco del Convenio sobre la Contaminación

Atmosférica Transfronteriza a Larga Distancia de la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (4).

Para lograr la recuperación parcial o total de estos recursos naturales, se deberá aprovechar la capacidad metabólica de los microorganismos presente en los ambientes (agua y suelo) a biorremediar; los microorganismos ofrecen grandes posibilidades, y podrían resolver el problema de la contaminación por metales pesados, como el mercurio, ya que ellos son capaces de concentrarlos en su superficie (bioadsorción), o en su interior (bioacumulación). La aplicación a aguas ya es una realidad y aunque los estudios de biorremediación del suelo son escasos, se piensa que la utilización de microorganismos ubicuos o autóctonos es lo más adecuado (5).

Respecto a lo planteado anteriormente, surge la necesidad de preguntarse ¿Cuál es la estrategia de biorremediación adecuada, que se puede aplicar a las aguas y suelos contaminados con mercurio por causa de la minería, que permitirá disminuir o atenuar el peligro hacia la salud y al medio ambiente en el municipio de Istmina (Chocó)?, base para los estudios que deben realizarse en el laboratorio para identificar el proceso apropiado para dicha labor y las condiciones bajo las cuales tendría un desarrollo óptimo respecto a la eficiencia en la biorremediación; para después desarrollar el proceso adecuado a nivel de la industria minera, considerando las cargas contaminantes de los residuos, las características de las aguas y/o suelos a tratar y de donde podrían ser aislados los microorganismos o enzimas que de manera estratégica, lograrán restaurar la calidad ambiental, de acuerdo a las necesidades y dimensiones del problema en el pueblo Istmineño.

Finalmente, el documento presentado, desarrolla el tema descrito anteriormente haciendo uso de una metodología descriptiva en la cual se realiza una búsqueda de

información de procesos ya existentes en el mundo y en Colombia específicamente, identificando sus características, lugares de aplicación y resultados. Con esto se quiere generar un impacto positivo en el campo de la biorremediación aplicada en aguas y suelos contaminados con alto contenido de mercurio principalmente por causa de la minería.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Realizar un estudio documental sobre las estrategias microbiológicas utilizadas en la biorremediación de aguas y suelos contaminados por la minería de oro y platino, como alternativa para disminuir o atenuar el peligro hacia la salud y al medio ambiente en el municipio de Istmina (Chocó - Colombia).

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- ✓ Describir los métodos de minería de oro y platino empleados en el municipio de Istmina, Chocó.
- ✓ Explicar los eventuales efectos hacia la salud de las personas expuestas al mercurio.
- ✓ Analizar la información actual referente a biorremediación de aguas y suelos contaminadas por minería de oro.
- ✓ Aportar al progreso del municipio de Istmina (Chocó), con la investigación de las estrategias adecuadas para minimizar la contaminación de las áreas en donde se realiza la minería de oro y platino.

## 1. ANTECEDENTES

En Venezuela en el año 2006, se realizó un trabajo de investigación, en el que se evaluó la remoción de arsénico y mercurio en suelos contaminados con dichos elementos; utilizaron la lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*) como biorremediadora de los mismos. Se obtuvo una remoción de 94% para el mercurio y de 42% para el arsénico (5).

*Sinha et al.* En Japón, en el año 2012, inmovilizaron una cepa de *Bacillus cereus* con alginato de calcio, con la cual obtuvieron elevadas eficiencias de remoción de Hg (II) en el agua, a través de bioadsorción a la biomasa bacteriana (80% de remoción de 20 mg/L iniciales de Hg (II), en 120 h) (6).

En cuanto a la reducción enzimática de mercurio como estrategia para biorremediar sistemas acuáticos, *Pedrero et al* (2012), en Francia, indicaron que cepas de *Desulfovibrio desulfuricans* fueron resistentes a altas concentraciones de metilmercurio (MeHg), con la que se redujo el 95%, a través de la producción de sulfuro de dimetilmercurio, y el cual se volatiliza finalmente como dimetilmercurio y metano (7).

En la literatura se encuentra disponible la investigación que hizo en EE. UU *Lee et al* (2012) en donde se redujo el 97% de metilmercurio (MeHg) en mercurio inorgánico (20 µg/L) en 3 h con la utilización de la bacteria marina *Pseudomonas baleárica* (8). En el mismo año, *Cabral et al* indicaron que *Pseudomonas putida* V1 volatilizó un 77% de MeHg (2,5 µM) presente en suelos mineros contaminados, en sólo 24 h (9);

Mosquera Córdoba en el 2016, evaluó el desempeño de la técnica de lombricompostaje para descontaminar suelos con mercurio (Hg) procedentes de



minería a cielo abierto en el Municipio de Unión Panamericana, Chocó – Colombia. Para llevar a cabo el proceso se estableció un diseño experimental en bloques completos al azar con tres repeticiones. Los tratamientos empleados fueron: T1 (suelo contaminado con Hg (100%) + lombrices (*Eisenia foetida*), T2 (suelo contaminados Hg (50%) + compost no contaminado (50%) + lombrices (*E.foetida*), T3 (Compost contaminado conHg (100%) + lombrices (*E. foetida*), y T4 (Compost no contaminado + lombrices (*E. foetida*). Este proceso se llevó a cabo durante un periodo de 133 días para observar la evolución de la remoción de Mercurio, en el tratamiento 1, 2 y 3 a través de análisis de laboratorio. Los resultados a nivel de laboratorio permitieron determinar que en el tratamiento 3 se presentó la mayor remoción de mercurio Hg (65%), seguido del tratamiento 2 con el 43% y el tratamiento 1 con el 28% (10)

Los bioensayos con la bacteria *Lysinibacillus. sphaericus*, hechos por Bustos y colaboradores en el 2018, en donde se usaron cepas MCB1 y MCB2, también se mezclaron las cepas MCB1 y MCB2; obtuvieron mayor eficiencia en los ensayos en donde se mezclaron dichas cepas, se mostró los beneficios del comportamiento mutualista de los microorganismos. También es importante resaltar la recuperación de casi el 100% del oro por *L. sphaericus* MCB2, una cepa nativa del río Nechí en el Bagre (Antioquía - Colombia). Esta recuperación se obtuvo en menos de 50 h y con posible formación de nanopartículas de oro o coloides (11).

## 2. MARCO TEÓRICO

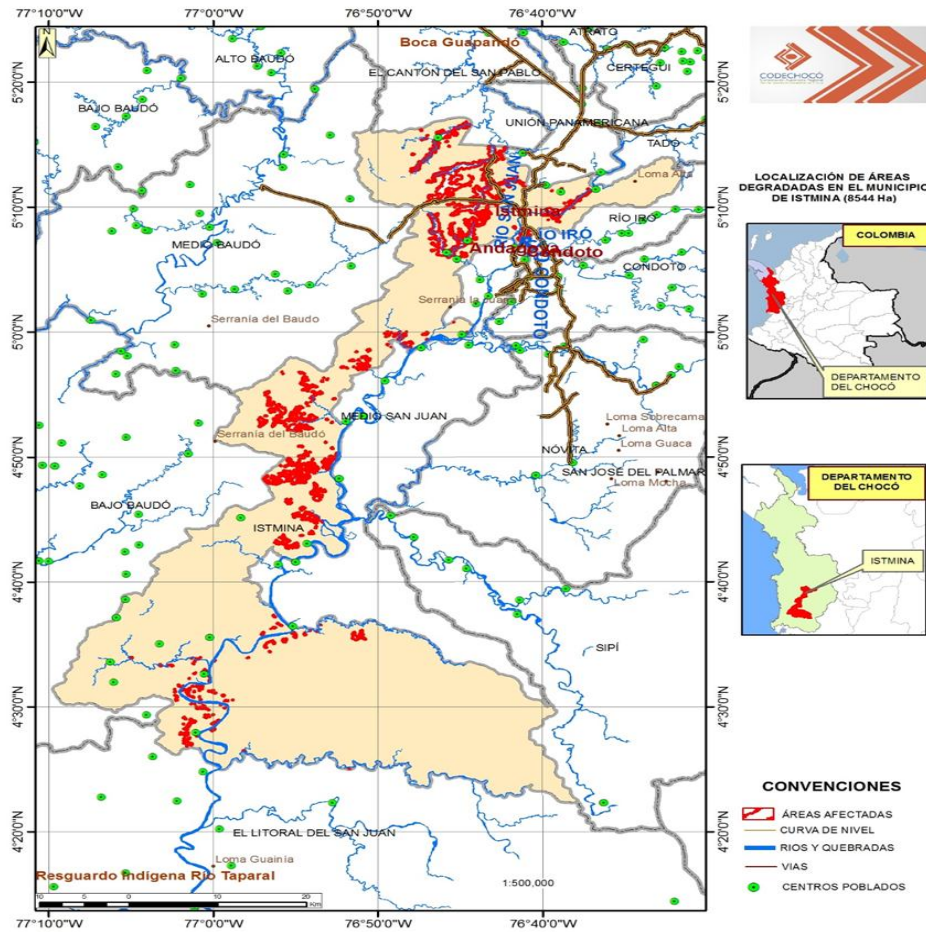
### 2.1 MINERÍA EN ISTMINA - CHOCÓ

Desde el siglo XVII, la producción minera estuvo cimentada en el sistema colonialista por los esclavos los cuales extraían el oro a fuerza de mucho trabajo. El método establecido para laborar las minas de oro corrido era a través de la cuadrilla de esclavos quienes rompían la tierra y a través de laboratorios formados por albergues y tanques, lavaban la tierra para extraer el oro (1).

La manera tradicional de explotación minera (barequeo) se caracteriza por un impacto ambiental leve, pero algunas explotaciones mineras mecanizadas, ubicadas a lo largo del río San Juan entre las localidades de Chiquichoqui y San Miguel, han afectado las condiciones físico-químicas y biológicas de los suelos aluviales, incrementando la tasa de erosión, inestabilidad de taludes y pérdida de fertilidad (12). Tradicionalmente se ha practicado la minería por el sistema de mazamorreo extrayendo del lecho de los ríos el oro y el platino, y separándolos de las piedras y arenas con mercurio.

A partir de 1990, se inició la utilización de maquinaria pesada o tecnificada, para la explotación minera, en las localidades de Bebedó y Dipurdú del Guásimo principalmente, produciendo mejores ingresos para la mayoría de la población y regalías al municipio de Istmina, pero también desorganización y caos social y familiar, tala indiscriminada de bosques y su consecuente destrucción (incluyendo la fauna), erosión de suelos y sedimentación del río San Juan y sus afluentes; los efectos negativos sobre el medio ambiente y la salud humana, muestran que esta actividad no es sostenible a largo plazo, luego debe replantearse el sistema de aprovechamiento (12).

La situación actual de contaminación por la minería en el municipio de Istmina se evidencia en el siguiente mapa:



**Figura 1.** Mapa de localización de las áreas contaminadas en Istmina. Tomada de: “CODECHOCÓ, 2019”

En desarrollo de actividades de control, CODECHOCO, identificó un área de alrededor de 8.544 hectáreas entre los años 2007 y 2018 afectadas por la minería. En el mismo periodo, trescientos quince (315) entables mineros activos con un total de 602 retroexcavadoras, 1 planchón y 38 dragas de succión; de los cuales en el municipio de Istmina se ubicaron 25 entables mineros activos con 58 retroexcavadoras (1).

## 2.2 MÉTODOS DE EXPLOTACIÓN DE ORO Y PLATINO

En Istmina los sistemas tradicionales de extracción de metales preciosos se realizan de dos maneras: la minería artesanal o manual y la minería mecanizada o con maquinaria pesada.

### 2.2.1 Minería Artesanal

Son las metodologías de explotación que utilizan tradicionalmente las comunidades negras mineras valiéndose de herramientas manuales sencillas como son: la barra, el cacho, la batea, el almocafre y el canalón; materiales que se ilustran a continuación en la figura 2:



**Figura 2.** Materiales de la Minería artesanal. 1) Batea, 2) Almocafre, 3) Canalón, 4) Cachos, 5) Barra. Elaboración propia.

En algunas técnicas artesanales, se han incorporado instrumentos mecanizados para facilitar la actividad minera: la motobomba, elevador hidráulico y malacate.

### 2.2.1.1 Técnicas utilizadas en la Minería artesanal

En la minería artesanal se utilizan técnicas como: el mazamorreo, el zambullidero, la mina de agua corrida, el hoyadero, y el guache o socavón (13). La siguiente descripción es producto de la recopilación de narraciones de personas que trabajan en la minería artesanal:

- **Mazamorreo:** utiliza herramientas sencillas con las cuales se obtiene gravilla de las terrazas y de bancos de grava en el río durante la época de verano. El concentrado de gravilla se lava en bateas, para obtener una refinación manual mediante la selección de la arena (jagua). Este método todavía se mantiene en comunidades rurales en las riberas altas del Tajuato, en las comunidades de Tres Bocas, La planta, Tegaisa, en el río San Juan (14). En esta actividad los hombres no participan. Las mujeres individualmente y de manera independiente se dan a este oficio en procura de conseguir alguna cantidad de metal que sirva como aporte suyo al sostenimiento de la familia.
- **Zambullidero:** es la técnica mediante el cual el minero, (generalmente mujer) se sumerge hasta el fondo del río o quebrada, en épocas de menos lluvia, llevando sobre su espalda una piedra (lastre) que le ayuda con su peso a alcanzar en menor tiempo el fondo y con herramientas artesanales (almocafre y cacho) recoge la gravilla con contenido auriplatinífero.
- **Mina de agua corrida:** antes de la introducción del sistema mecanizado por retroexcavadoras, este era el método más usual de los sistemas artesanales. Con esta técnica, se aprovecha las abundantes aguas de ríos y quebradas; consiste en separar las piedras de los metales (oro y platino), que están en la arena que queda atrapada en el fondo del canalón, y luego es lavada en la batea.
- **Hoyadero:** en esta técnica intervienen varias personas (se hace en cuadrilla

o grupo), en varias jornadas, se realiza cuando los metales están en la profundidad (de hasta 15 metros); consiste en hacer hoyos (huecos en forma rectangular), las paredes del hoyo se recubren con madera, a medida que se va excavando, y el agua que va apareciendo se saca con bateas o con motobombas. Finalmente, cuando se logra el yacimiento de los metales, se realizan jornadas de aprovechamiento, sacando diferentes capas de terreno. El primer aprovechamiento es para el dueño de la mina, y los demás aprovechamientos, es para pagar el trabajo de los participantes (13).

- **Guache o Socavón:** parecido al hoyadero, pero se abren socavones horizontales para aprovechar el material aluvial. El material del yacimiento se transporta en batea para lavarlo. Generalmente se realiza en familias, en donde cada miembro cumple una función (13).

Estos materiales y técnicas son ancestrales o tradicionales, lo cual hace que la actividad minera artesanal, sea vinculada a la cultura del pacífico colombiano y a la identidad étnica.

### **2.2.2 Minería Mecanizada o con Maquinaria pesada**

La extracción de oro y platino en Istmina, ha sido modificada en los últimos años por la incorporación masiva a la actividad, de aparatos que en algunos casos han sido adaptados a la minería artesanal dejando como resultado la tecnificación de los sistemas artesanales de aprovechamiento minero (1).

Las motobombas de alta y baja presión, monitores, draguetas, retroexcavadoras y motores elevadores, han cambiado los métodos de extracción, haciendo más rentable la actividad, pero igualmente estos rendimientos han traído consecuencias

de impacto en el orden ambiental como son: la destrucción de la capa vegetal en extensas zonas, agotamiento y enmascaramiento de los depósitos metalíferos, alteración y destrucción de ecosistemas hídricos y terrestres, disminución de especies biológicas y el cambio brusco del paisaje (14).

En el orden social y económico las consecuencias se confirman en: la disminución de la oferta del empleo, en la calidad de vida por el empobrecimiento, aumento del proceso migratorio, la informalización de la economía apareciendo el subempleo, el rebusque y variadas alternativas subnormales de supervivencia.

A continuación, se reflejará por escrito lo recopilado de las entrevistas y conversaciones sostenidas con los representantes legales y con los dueños de los entables mineros.

#### **2.2.2.1 Técnicas utilizadas en la Minería Mecanizada**

- **Minería con monitor:** esta técnica se realiza a cielo abierto y para ello utilizan motores de alto cilindraje (figura 3) que transportan agua a gran presión; el chorro va lavando el material que contiene material enriquecido y luego mediante un proceso manual se empieza por retirar los guijarros más grandes para luego continuar con los más pequeños, utilizando cachos y betadoras (platón manual de madera), y dejan en el canalón el concentrado más fino de arenas ricas en contenido de oro y platino.

En adelante la labor de beneficio continúa separando en la batea las arenas negras (jagua) de los metales que por movimientos centrífugos que se le imprime a la batea, se depositan en el fondo de la misma. Este sistema de explotación minera en la actualidad se efectúa en Istmina en las zonas donde

los costos altos de transporte para combustibles e insumos hacen imposible la operación de las retroexcavadoras como sistema más avanzado.



**Figura 3.** Motor de la minería mecanizada. Tomada por el autor

- **Explotación con draguetas:** desde hace 20 años la búsqueda y explotación de depósitos ricos en oro y platino sobre los lechos del río San Juan y sus afluentes con draguetas, ha sido uno de los sistemas que más ha incidido en la producción de estos metales y en los impactos ambientales y sociales del municipio.

En el orden ambiental la explotación con draguetas ha impactado negativamente el ecosistema acuático y terrestre por el vertimiento permanente de aceites e hidrocarburos; así mismo el mercurio que se utiliza en muchos casos para amalgamar el oro, pone en peligro la seguridad



alimentaria por física extinción de las especies y altas concentraciones de mercurio que son ingeridos por las comunidades.

- **Minería con retroexcavadora:** se implementa en el municipio de Istmina a partir de 1988 (1). Este sistema se caracteriza por el movimiento de grandes volúmenes de material, altos costos de inversión y altos rendimientos. Las máquinas (figura 4) trabajan ininterrumpidamente durante 24 horas, cinco días consecutivos, excavan las tierras que contienen oro y platino. El beneficio final se efectúa haciendo un barrido de la tolva con potentes chorros de agua que llevan las arenas enriquecidas hasta los canalones donde el metal es atrapado en un enmallado de acero y costales, que luego por operación manual se lava en una vasija dejando en el fondo escamillas de oro y platino revuelto con arenas negras (jagua) y otras partículas metálicas.

Esta concentración se hace pasar después por una canaleta vibratoria (Matraca) que elimina el 60% de las impurezas y arenas negras. El oro para separarlo del platino se somete luego a un proceso de amalgamación utilizando el mercurio que el operario sin ninguna protección en sus manos lo manipula y peor, cuando lo quema absorbe toda la toxicidad del mercurio que se evapora por la acción del calor (13)



**Figura 4.** Retroexcavadora de la minería mecanizada. Tomada por el autor

### **2.3 SUSTANCIAS TÓXICAS RESULTANTES DE LA ACTIVIDAD MINERA**

Las sustancias químicas que se usan en la minería y en el proceso de la obtención de los minerales, son contaminantes del agua y del suelo, ocasionan problemas de salud, convirtiéndose en sustancias tóxicas. Diferentes iones de metales pesados tienen diferentes mecanismos de infestaciones tóxicas: estrés oxidativo debido al desequilibrio de radicales libres (plomo), la formación de derivados de tiolo metilo nocivos (mercurio, arsénico, cromo), cofactor o reemplazo de iones metálicos (aluminio, cadmio) (15)

Según datos que reposan en CODECHOCÓ, máxima autoridad ambiental en el departamento, el principal contaminante de las aguas y suelos, por causa de la minería en el municipio de Istmina (Chocó), es el mercurio, por el uso indiscriminado

de esta sustancia, para extraer los minerales, pues resulta muy económico en las labores de esta actividad (1).

### 2.3.1 Mercurio

El mercurio (Hg) es un metal pesado presente en la naturaleza, su punto de fusión es  $-38.4^{\circ}\text{C}$  y el punto de ebullición es  $357^{\circ}\text{C}$ ; es el único metal líquido a temperatura y presión ambiente, presentándose como un líquido blanco, plateado, que se evapora con facilidad pudiendo permanecer en la atmósfera durante períodos de tiempo prolongados. Cuando se libera en el aire, es transportado grandes distancias, favoreciendo su acumulación incluso en zonas no mineras. Puede provenir de la actividad volcánica, la erosión de las rocas o la actividad humana, siendo esta última la principal fuente de las emisiones de mercurio. Se alea fácilmente con muchos otros metales como el oro y el platino produciendo amalgamas. Se estima que alrededor del 30% del mercurio es de origen natural o elemental. El 70% restante deriva de la actividad antropogénica, principalmente de la minería, la incineración de productos urbanos y médicos (16).

El mercurio existe en tres formas: elemental, inorgánico y orgánico:

- ✓ **Mercurio elemental o metálico** ( $\text{Hg}^0$ ), es líquido a temperatura ambiente y se transforma de líquido a vapor de mercurio procedente tanto de la desgasificación natural de la superficie terrestre como de la reevaporación del mismo. Desde los  $13^{\circ}\text{C}$  el mercurio elemental emite vapores, lo que facilita la intoxicación ocupacional (17) Asimismo, en el hogar cuando se quiebran termómetros de cristal u otros dispositivos que contienen mercurio elemental, éste se evapora generando vapores de mercurio lentamente, que al ser más pesados que el aire tienden a permanecer cerca del piso o de la fuente de mercurio, pero pueden entrar en el sistema de ventilación y

propagarse a todo el hogar (18)

- ✓ **Mercurio orgánico** (metilmercurio y etilmercurio), el metilmercurio (MeHg), surge a partir de la metilación del catión mercúrico ( $\text{Hg}^{2+}$ ) a través de procesos no enzimáticos o por la acción de bacterias, es un compuesto potencialmente tóxico debido a que es hidrofóbico y liposoluble, lo cual le permite acumularse en los tejidos orgánicos. Una vez que el metilmercurio es liberado al agua puede difundirse a través de la cadena alimentaria acuática, que luego es consumido por peces herbívoros donde se inicia la acumulación y de allí estos peces serán alimento de peces carnívoros y mamíferos marinos los cuales pueden ser consumidos por los humanos, siendo la principal causa de exposición no ocupacional (16).
- ✓ **Mercurio inorgánico** o sales de mercurio, son compuestos derivados del ion mercurioso ( $\text{Hg}^+$ ) y del mercúrico ( $\text{Hg}^{2+}$ ) unidos a átomos de Cl, N, O y S, destacando el calomel o cloruro mercurioso ( $\text{HgCl}$ ) o cloruro mercúrico ( $\text{HgCl}_2$ ), usado en luces de bengala, papel de calomel, mezclado con oro para pintura de porcelana, en electrodos de calomel. Otros compuestos se han usado como laxantes, para blanquear los dientes, pilas, entre otros.

### 2.3.1.1 Fisiopatología del Mercurio

El mercurio puede ingresar al organismo por las siguientes vías: inhalatoria, oral y dérmica. Sin embargo existen diferencias según el tipo de compuesto:

- ✓ Vía inhalatoria: Es la vía más frecuente e importante en el ámbito ocupacional y en casos de emergencias por derrames. Se destaca la impicancia del mercurio elemental ( $\text{HgO}$ ), el cual se transforma fácilmente de su estado líquido a vapor de mercurio; una vez inhalado difunde hasta un 80% al flujo sanguíneo. Aunque el mercurio elemental se acumula en cierto grado en los

riñones, generalmente no produce daño renal (18).

- ✓ Vía oral: los compuestos orgánicos de mercurio ingresan al organismo a través de alimentos, se absorben del 90 al 95% en el tracto gastrointestinal; los compuestos inorgánicos de mercurio se absorben entre 2 a 15% de la dosis ingerida acumulándose en el túbulo renal proximal, donde puede producir falla renal aguda. Cabe señalar que el mercurio elemental no tiene buena absorción por esta vía, siendo en menos del 0.1%(16).
- ✓ Vía dérmica: por contacto, se han descrito casos de intoxicación por aplicación tópica de compuestos que contenían metilmercurio. El mercurio absorbido es transportado por la sangre en las células rojas hasta un 90% de los compuestos orgánicos y el 50% del mercurio inorgánico es transportado unido a la albúmina. El mercurio elemental y los compuestos orgánicos se distribuyen a todo el organismo, teniendo mayor afinidad por el encéfalo (sustancia gris), hígado y riñón; también se ha detectado en epitelio de tiroides y páncreas, en células medulares de las glándulas adrenales, espermatozoides, epidermis y cristalino (18).

Los compuestos inorgánicos o sales de mercurio se concentran principalmente en los riñones, hígado, intestino, piel, glándulas salivales, corazón, sistema músculo esquelético, cerebro y pulmón. Luego de una semana, el 85 a 95% se redistribuye y almacena en los riñones (21).

El vapor de mercurio elemental se difunde rápidamente a través de la barrera hematoencefálica y la placenta, el metilmercurio conjugado con los grupos sulfhidrilos-SH es transportado al interior del cerebro fetal a través de los transportadores de aminoácidos de la barrera hematoencefálica (BHE) produciendo alteraciones congénitas cognitivas en el feto. El mercurio inorgánico no es soluble en lípidos y no atraviesa fácilmente la barrera hematoencefálica (20).

La vida media plasmática es de 23 a 40 días para los compuestos inorgánicos y de

50 a 70 días para los compuestos orgánicos, siendo la circulación enterohepática responsable de su tiempo de vida media prolongada. Los compuestos de mercurio se eliminan por las heces y la orina preferentemente. El metilmercurio se excreta hasta un 90% en heces desde el hígado vía bilis. También está descrita la excreción a través de la saliva, que corresponde a 1/4 de la concentración sanguínea y 1/10 de la concentración urinaria, asimismo la exhalación puede representar hasta el 7% de la excreción (21).

### **2.3.1.2 Toxicidad del mercurio**

La toxicidad del mercurio se encuentra directamente relacionada a su unión covalente con los grupos sulfhidrilos (SH). El mercurio también tiene alta afinidad a los grupos carboxilos, amidas, aminas y fosforilos, lo que contribuye a su toxicidad. A nivel de la membrana citoplasmática esta posee grupos sulfhidrilos que son esenciales para las propiedades normales de permeabilidad y transporte de la membrana celular, estos grupos SH tienen una elevadísima afinidad por el mercurio. Los compuestos orgánicos de mercurio son capaces de inhibir la síntesis de proteínas, esto se debe a alteraciones del ARN de transferencia, lo que podría explicar las aberraciones cromosómicas y anomalías congénitas observadas durante las intoxicaciones alimentarias con metilmercurio, asimismo afecta la homeostasis del ión calcio, incluso en exposiciones a corto plazo (menores a 24 horas) produciendo muerte neuronal (24).

### **2.3.1.3 Diagnóstico**

Los indicadores biológicos de exposición que se consideran para valorar las concentraciones de mercurio, elemental e inorgánico, son:

- Personas no expuestas ocupacionalmente: (valores referenciales)  
Mercurio en orina es < 5µg Hg/L o 5 µg Hg/g de creatinina.
- Personas expuestas ocupacionalmente: (Índice Biológico de Exposición)  
mercurio en orina es < 50 µg Hg/L o 50 µg Hg/g de creatinina (25).

Se consideran las siguientes pruebas básicas:

1. Hematológicas: Hemograma completo (búsqueda de anemia, leucopenia, trombocitopenia o punteado basófilo), hemoglobina corregida de ser personas que viven en altura (el mercurio orgánico se concentra en los eritrocitos, se puede presentar trombocitopenia y agranulocitosis).
2. Electrolitos séricos y gases arteriales: sodio, potasio, cloro, bicarbonato, calcio para ver el estado ácido/base (en caso de deshidratación aguda o problemas gastrointestinales).
3. Pruebas de función renal: Dosaje de urea, creatinina sérica o urinaria, depuración de creatinina y proteinuria en 24 horas. (se espera elevación de creatinina y proteinuria elevada).
4. Grupo y factor sanguíneo debido al riesgo potencial de hemorragia gastrointestinal y perforación por ingesta de mercurio inorgánico. Los exámenes varían dependiendo de los síntomas que se presenten (19).

En cuanto a las imágenes:

1. Radiografía abdominal: El mercurio es radiopaco, encontrándose su distribución en el tracto digestivo en este apoyo diagnóstico. Radiografía de tórax: Puede demostrar aspiración de mercurio, o mercurio secuestrado en corazón y pulmones en caso de una inyección intravenosa.
2. Tomografía axial computarizada cerebral: Se puede encontrar atrofia cortical y occipital. Resonancia magnética: Se describen hallazgos en la corteza cerebral como atrofia cortical y central, específicamente en la corteza visual, los centros motores y sensitivos y centro auditivo.

Exámenes toxicológicos como:

1. Indicadores Biológicos de Exposición: la prueba de orina de 24 horas la más confiable para determinar exposición reciente al mercurio. Si existe dificultades técnicas para la toma de muestra de 24 hrs se puede usar un análisis simple de orina puntual con dosis de creatinina.
2. Las concentraciones sanguíneas menores a 10-20 µg/L y urinarias menores de 50 µg/L se consideran dentro de los valores referenciales; sin embargo, la correlación entre el nivel de mercurio y su toxicidad es variable. En general, un nivel en sangre mayor de 35 µg/L o urinario mayor de 100 µg/L requerirán terapia. (19) Asimismo, el análisis de cabello se puede emplear en exposición crónica no ocupacional, pero no es un examen rutinario debido a la contaminación ambiental potencial, la cual devendría en falsos positivos. Otras pruebas diagnósticas que se emplean para determinar la exposición a mercurio generalmente en ambientes laborales son la N-acetilglucosaminidasa (NAG) y la B-galactosidasa (24).

#### **2.3.1.4 Extracción mineral con mercurio**

El principal método de uso del mercurio en la minería es mediante la amalgamación, un proceso que involucra la mezcla del metal con arenas auríferas para formar un producto que es recuperado a manera de un botón metálico. Posteriormente, el “botón” de oro-mercurio es sometido a calor para vaporizar el mercurio y dejar el metal precioso (oro) en el fondo del recipiente. La minería del oro artesanal y en pequeña escala es, por sí sola, la mayor fuente de liberación intencional de mercurio del mundo (18).

El 90% de la extracción de oro en el municipio de Istmina (Chocó) proviene de operaciones a “cielo abierto” o aluvial ilegal, que requiere la remoción de tierra,

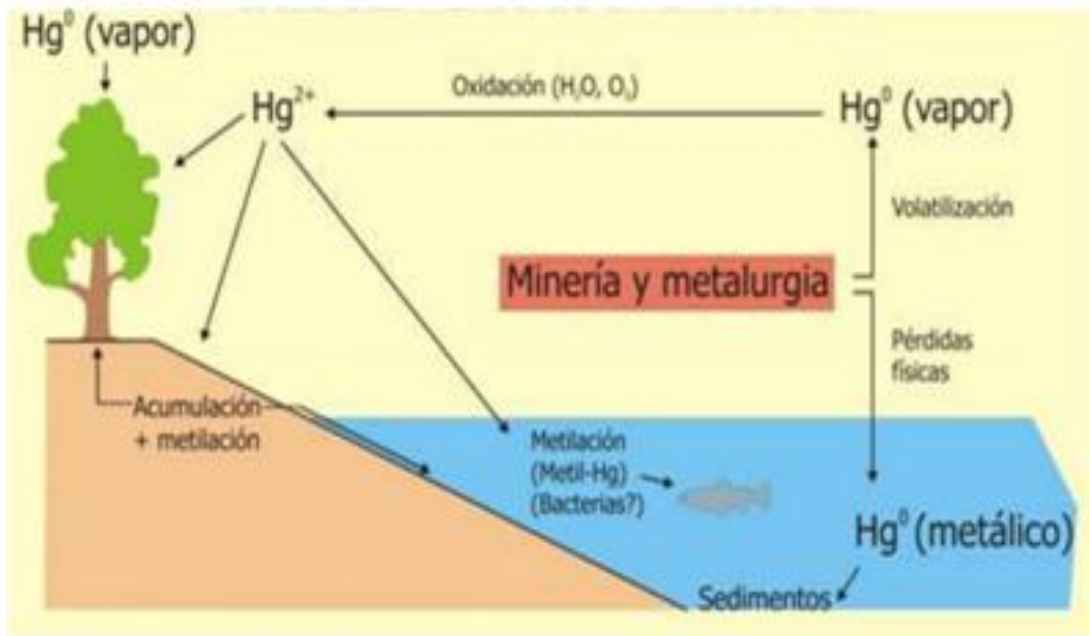


lavado con agua proveniente del río y amalgamación con mercurio líquido (1). El mayor problema de la minería aluvial frente al uso del mercurio es que no se puede garantizar la recuperación del mercurio tras el “lavado” del oro, el mercurio líquido se volatiliza en vapores o queda en suspensión en el agua (19).

### **2.3.1.3 Ciclo Biogeoquímico del Mercurio**

El ciclo natural del mercurio ha sido alterado por las actividades de tipo antropogénica, entre las que sobresalen la metalurgia y la minería. El comportamiento biogeoquímico del mercurio es complejo, y para estudiarlo se necesita entender de los procesos industriales, geológicos, microbianos, hidrológicos, ecológicos, fisiológicos y atmosféricos (17).

Gracias a los efectos tóxicos del mercurio en el medio ambiente y en la salud de los seres vivos, se ha estudiado enormemente el ciclo biogeoquímico, en el que se puede describir que, el mercurio atmosférico puede incorporarse fácilmente en el agua y en los sistemas orgánicos por deposición así, el  $\text{Hg}^0$  puede depositarse en la superficie de los vegetales o ser directamente respirado por los animales. La forma  $\text{Hg}^{2+}$ , soluble en agua, puede ser depositada por la lluvia sobre el suelo y los seres vivos, y rápidamente ser absorbida por los tejidos. El principal problema es que las bacterias se detoxifican de forma natural bien reduciendo la especie  $\text{Hg}^{2+}$  a  $\text{Hg}^0$  (mucho menos asimilable) o bien mutilándola para dar metilmercurio ( $\text{CH}_3\text{Hg}^+$ ). Esto es realizado tanto por las bacterias del suelo como las del lecho marino, pasando a una forma órgano metálica catiónica que es mucho mejor asimilada por los seres vivos y, por tanto, mucho más perjudicial (17), lo anterior se representa en la figura 5.



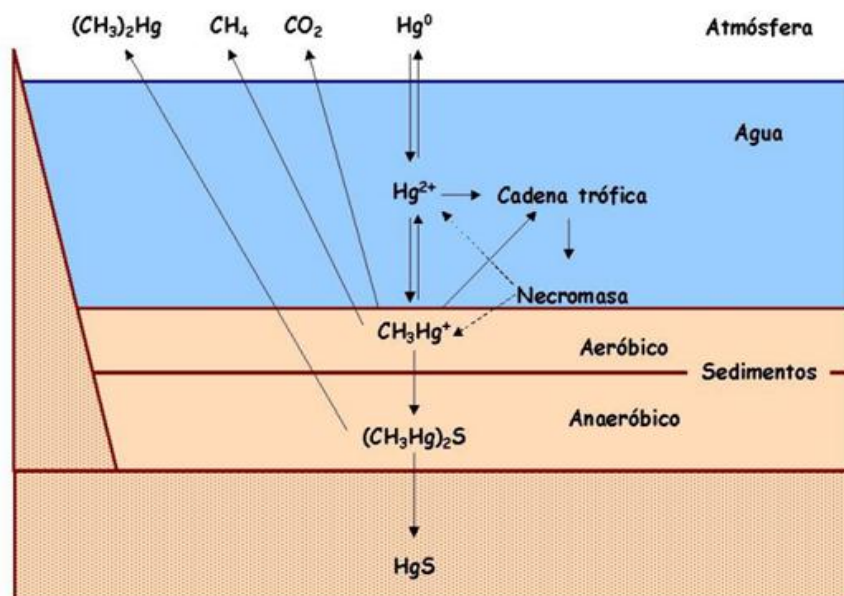
**Figura 5.** Ciclo Biogeoquímico del mercurio. Tomado de: [http://www.ugr.es/~mota/QIA\\_TEMA-3\\_Hg.pdf](http://www.ugr.es/~mota/QIA_TEMA-3_Hg.pdf) (17)

### 2.3.1.4 Biotransformación en el Ciclo Biogeoquímico del Mercurio

Este es un proceso que involucra un cambio químico sobre el metal pesado, como por ejemplo en el estado de oxidación o la formación de un compuesto determinado (metilación). Esta transformación biológica de los metales pesados que resultan tóxicos mediada por enzimas microbianas puede dar como resultado compuestos poco solubles en agua o bien compuestos volátiles. El ejemplo más claro es el ciclo del Hg en la naturaleza, donde la bacteria *Pseudomonas aeruginosa* puede reducir el catión  $\text{Hg}^{2+}$  a  $\text{Hg}^0$ , y donde otros organismos pueden luego metilarlo dando como productos  $\text{CH}_3\text{Hg}^+$  y  $(\text{CH}_3)_2\text{Hg}$  (figura 6), que son volátiles y aún más tóxicos que el propio Hg (17).

Estas reacciones se interpretan, precisamente, como una medida de detoxificación

natural que poseen estos microorganismos, impidiendo su acumulación. La metilación del mercurio, defensiva para estos, supone un gran peligro para el resto de especies acuáticas, ya que bajo esta forma química es fácilmente incorporado a los tejidos y, por tanto, a la cadena alimenticia. También así puede retirarse cierta cantidad de mercurio de forma natural, ya que en los lechos lacustres y marinos se produce la descomposición anaeróbica de la materia orgánica, que origina, entre otros compuestos,  $H_2S$  el cual precipita el Hg casi totalmente dado su pequeñísimo valor de  $K_s$ . Claro que esto sucede únicamente en las partes inferiores y podría ser eficaz como descontaminante (aparte de los propios seres vivos) si cesaran las fuentes de polución (17).



**Figura 6.** Biotransformaciones en el ciclo biogeoquímico del Hg. Tomado de: [http://www.ugr.es/~mota/QIA\\_TEMA-3\\_Hg.pdf](http://www.ugr.es/~mota/QIA_TEMA-3_Hg.pdf) (17)

El mercurio difiere de la mayoría de los metales no sólo por su complejidad química, sino además por su alta afinidad por la materia orgánica. Las relaciones cuantitativas con la materia orgánica se encuentran en sedimentos lacustres y marinos, en lagos, en corrientes, agua subterránea y suelos. En ecosistemas de agua dulce, la mayor parte del

mercurio se asocia con la materia orgánica formada por los organismos vivos, partículas de detritus y sustancias húmicas disueltas. Entre los metales más abundantes en esos sistemas, el hierro, el plomo, el cobre, y el aluminio muestran un comportamiento similar, pero el mercurio tiene la unión más fuerte con las sustancias húmicas. Pueden encontrarse concentraciones altas de mercurio, en forma de sulfuro, en combustibles fósiles secos, los cuales se originan de la combustión incompleta de la materia orgánica degradada (17,19)

## **2.4 BIORREMEDIACIÓN**

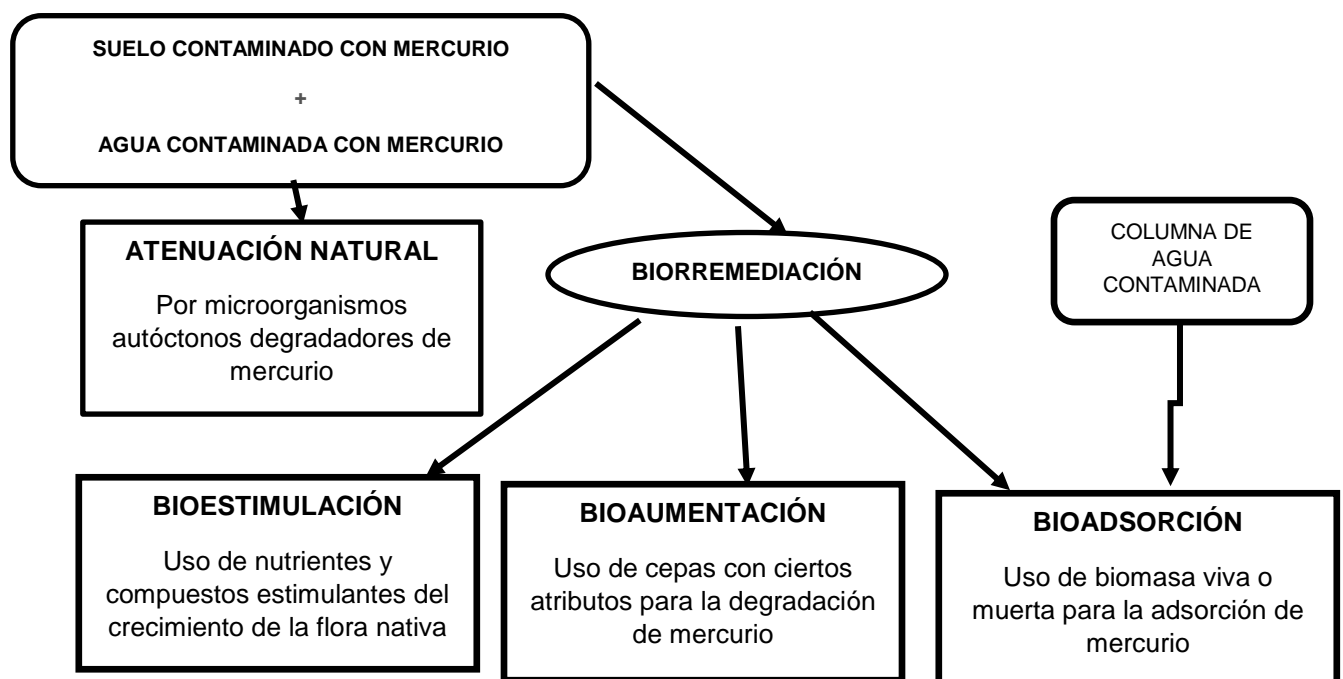
Existen muchas definiciones de biorremediación, sin embargo, en algunos casos, el término biodegradación se usa indistintamente con biorremediación; el primero es un término que se aplica a un proceso bajo el segundo (20). En esta revisión documental, la biorremediación se define como un proceso que se basa en mecanismos biológicos en los que se implican microorganismos, plantas o enzimas, para desintoxicar, degradar y transformar en sustancias menos tóxicas a los contaminantes ambientales como el mercurio (21); también puede definirse como la manipulación de microorganismos con una función metabólica deseada en procesos físicos y químicos, los cuales terminaran en la remoción del contaminante de interés (22)

El proceso de eliminación de contaminantes depende principalmente de la naturaleza del contaminante, que puede incluir: agroquímicos, compuestos clorados, colorantes, gases de efecto invernadero, metales pesados, hidrocarburos, desechos nucleares, plásticos y aguas residuales. Aparentemente, teniendo en cuenta el lugar de aplicación, las técnicas de biorremediación pueden clasificarse como: *ex situ* o *in situ* (23). La naturaleza del contaminante, la profundidad y el grado de contaminación, el tipo de ambiente, la ubicación, el costo y las políticas

ambientales son algunos de los criterios de selección que se consideran al elegir cualquier técnica de biorremediación (24); además de los criterios de selección, los criterios de rendimiento (concentraciones de oxígeno y nutrientes, temperatura, pH y otros factores abióticos), que determinan el éxito de los procesos de biorremediación (25).

Los microorganismos autóctonos, presentes en ambientes contaminados son la clave para resolver la mayoría de los desafíos asociados con la biodegradación y la biorremediación de sustancias contaminantes como el mercurio (26), siempre y cuando las condiciones ambientales sean adecuadas para su crecimiento y metabolismo. Las características ecológicas y de ahorro de costos se encuentran entre las principales ventajas de la biorremediación en comparación con los métodos químicos y físicos de remediación; además, los dos enfoques principales para mejorar la biorremediación son la bioestimulación y la bioacumulación, siempre y cuando los factores ambientales, que determinan el éxito de la biorremediación, se mantengan en un rango óptimo.

#### 2.4.1 Biorremediación de Mercurio



**Figura 7.** Estrategias de Biorremediación de mercurio. Tomada de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0188-49992007000300004](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992007000300004). Modificada por la investigadora.

Existen métodos físico-químicos y biológicos de remoción de mercurio de los suelos y aguas contaminadas. Entre los primeros se incluye principalmente a la amalgamación, formación de sulfuros, desorción térmica, vitrificación, lavado de suelos, procesos de encapsulación, estabilización, solidificación, nanotecnología y electro-remediación, Estas estrategias permiten la obtención de buenos resultados si la elección de la tecnología aplicada se realiza de manera adecuada, en función de las características físico-químicas de cada efluente y/o ambiente contaminado (27).

Estos métodos poseen algunas desventajas, tales como sus altos costos, utilización de grandes cantidades de reactivos y sus efectos adversos sobre los ecosistemas, entre otros. De allí la necesidad de aplicar tecnologías de remediación más eficientes y ambientalmente “amigables”, como los métodos de remediación biológica, los cuales utilizan organismos vivos para reducir, eliminar, contener o transformar los contaminantes en suelo y agua. Los organismos utilizados en esta tecnología pueden ser bacterias y hongos (biorremediación), algas (fitorremediación) o plantas (fitorremediación). Más recientemente, se ha implementado la rizorremediación como una tecnología alternativa que implica la acción conjunta de microorganismos rizosféricos y plantas (28).

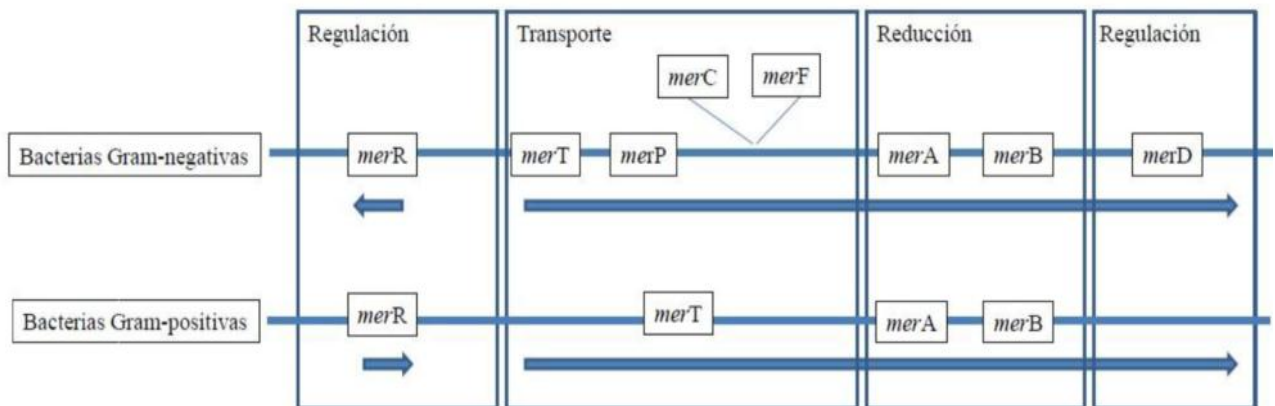
#### **2.4.1.1 Remediación de mercurio utilizando bacterias**

Los ambientes (suelo y agua) contaminados con metales como el mercurio, ejercen una presión selectiva, la cual ha llevado al desarrollo de sistemas de resistencia bacterianos (29), de los cuales el más estudiado, es el basado en la presencia de

grupos de genes organizados en un único operón, denominado “operón *mer*”, que permite la detoxificación enzimática del mercurio y que varía entre las distintas especies bacterianas (30).

Existen dos tipos de operones: uno es el de espectro reducido, que le confiere resistencia al mercurio inorgánico; y el otro es el de espectro amplio, que le confiere resistencia al mercurio inorgánico y orgánico. En conjunto, estos genes codifican para una serie de enzimas que pueden demetilar el mercurio orgánico a mercurio inorgánico, y reducir el mercurio inorgánico a  $Hg^0$ , el cual es menos tóxico y se puede liberar al medioambiente debido a su alta volatilidad. El operón *mer* está constituido por genes que codifican para proteínas asociadas con varias funciones, tales como regulación, transporte y reducción. La mayoría de los operones de resistencia a mercurio son inducibles y se hallan bajo un control regulatorio a nivel transcripcional, tanto positiva como negativamente (31).

La organización de un *operón mer* de amplio espectro en bacterias Gram-positivas y Gram-negativas es mostrado en la figura 8, en donde las flechas indican el sentido de la transcripción:



**Figura 8.** Organización general del *operón mer* de las bacterias Gram-negativas y Gram-positivas. Tomada de: <http://blog.pucp.edu.pe/blog/wp-content/uploads/sites/998/2016/10/Remediaci%c3%b3n-biol%c3%b3gica-de->

Todos los operones *mer* descritos hasta el momento poseen los genes *mer T* y *mer P*, los cuales son estrictamente necesarios para la expresión completa del operón *mer*. La proteína *Mer P* se localiza en el periplasma celular y posee residuos cisteína a los cuales se une el mercurio (Hg II), luego éste se transfiere a los residuos cisteína de la proteína *Mer T*, localizada en la membrana celular. Finalmente, el Hg (II) es transferido a grupos -SH de la enzima mercurio reductasa codificada por el gen *mer A*. Las proteínas de unión a membrana *Mer C* y *Mer F*, actúan como proteínas transportadoras de Hg (II), colaborando con el transporte de este ión hacia la enzima mercurio reductasa. Sin embargo, la vía de ingreso *Mer P-Mer T* es más eficiente que la *Mer C-MerF*. De acuerdo a lo anotado anteriormente, se puede deducir, que las bacterias reductoras de mercurio (Hg) y metilmercurio (MeHg), representan una herramienta valiosa para la biorremediación de sitios contaminados con este metal (32).

Adelaja y Keenan (2012) y muchos otros investigadores aportaron al conocimiento de los mecanismos de detoxificación bacteriana de metilmercurio (MeHg), quienes informaron que cepas de *Pseudomonas fluorescens*, *Enterobacter cloacae*, *Citrobacter braakii* y *Alcaligenes faecalis* utilizan MeHg como única fuente de carbono y energía (33,34).

Debido al riesgo que implica que el mercurio se recicle e ingrese de nuevo al medioambiente después de su **volatilización enzimática**, muchas investigaciones demostraron que la acumulación o secuestro intracelular del mercurio sería un proceso de remoción adecuado; en este sentido, Sinha y Khare (2010) notificaron un novedoso mecanismo de secuestro intracelular de mercurio (Hg) en algunas cepas de *Enterobacter* sp. las cuales bioacumularon el metal en forma de



nanopartículas de 2-5 nm (43).El mercurio remediado atrapado en forma de nanopartículas no puede vaporizarse de nuevo al medio ambiente, superando así el principal inconveniente del proceso de remediación de mercurio. Las nanopartículas de mercurio fueron recuperables (44).

Otros mecanismos de tolerancia/resistencia bacteriana para la biorremediación son: la **adsorción de mercurio a Exopolisacáridos (EPS)** y la **precipitación de mercurio (Hg II)** con compuestos sulfurados u órgano sulfurados que serían los principales mecanismos de secuestro de Hg iónico, en algunas bacterias aisladas de ambientes contaminados con metales, las cuales no poseen o no expresan el Operón *mer* (47).

Entre los Exopolisacáridos (EPS) bacterianas caracterizados por su anionicidad en alginato (*Pseudomonas aeruginosa*, *Azotobacter vinelandii*), en gelano (*Sphingomonas paucimobilis*), en hialuronano (*Pseudomonas aeruginosa*, *Pasteurella multocida*, *Streptococcus* cepas atenuadas), en xantano (*Xanthomonas campestris*), en galactopol (*Pseudomonas oleovorans*), en fucopol (*Enterobacter A47*) (45,50)

#### **2.4.1.2 Remediación de mercurio utilizando hongos**

Se ha descrito que los hongos y levaduras también pueden captar metales pesados, gracias a esta, los mismos pueden ser usados como métodos alternativos para la remoción de estos compuestos (41). En particular, se ha mencionado que la captura de metales por la biomasa de hongos parece ser un proceso que involucra la acumulación y/o la bioadsorción.la superficie celular de las levaduras puede actuar como una resina de intercambio iónico, mientras que las paredes celulares de los hongos tienen un rol principal en la bioadsorción (42).

Estudios sobre la remoción de 100 mg/L mercurio por células vivas y muertas de *Agaricus macrosporus* a diferentes valores de pH, demostraron que en todos los casos los porcentajes de remoción utilizando células vivas fue mayor que usando células muertas; se atribuyeron la máxima capacidad de bioadsorción a las células vivas, al medio de cultivo ácido suplementado con potasio y fosforo, además a ciertos mecanismos externos de acomplejamiento de metales, llevados a cabo por proteínas como las metalotioneínas o fitoquelatinas o bien por el bombeo eficiente de metales por la célula viva(43).

Muchas especies de *Trichoderma* aislados de zonas mineras contaminadas con mercurio, fueron capaces de tolerar y acumular el metal; ocho genes expresados diferencialmente en presencia de Hg(II) o Hg(I), entre los genes identificados, un posible rol en el mecanismo de tolerancia podría deberse a aquellos codificantes para hidrofobinas (proteínas presentes en hongos filamentosos), las que podrían estar implicadas en la captura de mercurio (Hg) en la pared celular, fuera de la célula (44).

La tabla 1 muestra microorganismos que, según estudios, estuvieron relacionados con la biorremediación de suelos y aguas contaminados con mercurio y derivados:

Microorganismos	Compuesto	Referencia
<i>Pseudomonas, Psychrobacter</i>	Hg orgánico e inorgánico	Pepi <i>et al.</i> (2011)
<i>P. balearica</i>	MeHg	Lee <i>et al.</i> (2012)
<i>P. putida</i> V1	MeHg	Cabral <i>et al.</i> (2012)
<i>P. fluorescens, Enterobacter cloacae, Citrobacter braakii</i> y <i>Alcaligenes faecalis</i>	MeHg	Adelaja y Keenan (2012)
<i>Pseudomonas</i>	Hg(II)	Wagner-Döbler (2003)
<i>P. putida</i> spi3	Tiomersal	Fortunato <i>et al.</i> (2005)
<i>Enterobacter</i> sp.	Hg(II)	Sinha y Khare (2012)
Conjunto de bacterias y algas	Hg(II)	Malakahmad <i>et al.</i> (2011)
<i>Bacillus cereus</i>	Hg(II)	Sinha <i>et al.</i> (2012)
<i>Phanerochaete chrysosporium</i>	Hg(II), MeHg y etilmercurio	Saglam <i>et al.</i> (1999)
<i>Agaricus macrosporus</i>	Hg(II)	Melgar <i>et al.</i> (2007)
<i>Lentinus edodes</i>	Hg(II)	Bayramoglu <i>et al.</i> (2008)
Hongos micorrízicos	Hg	Crane <i>et al.</i> (2010)
<i>Trichoderma</i>	Hg	Raspanti <i>et al.</i> (2009)
<i>Scenedesmus, Chlorella, Oscillatoria</i>	Hg	Manuel y Neyra Tanabe (2012)
<i>Chlamydomonas reinhardtii, Chlorella emersonii</i>	Hg(II)	Bayramoğlu <i>et al.</i> (2006)
<i>Dunaliella</i>	Hg(II)	Imani <i>et al.</i> (2011)
<i>Kappaphycus alvarezii</i>	Hg	Lim <i>et al.</i> (2011)
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i> 2AMT-2, transgénica	Hg(II)	He <i>et al.</i> (2011)
<i>Chlorella</i> sp. DT transgénica	Hg(II)	Huang <i>et al.</i> (2006)

**Tabla 1.** Microorganismos implicados en la Biorremediación de mercurio. Tomada de: <http://blog.pucp.edu.pe/blog/wp-content/uploads/sites/998/2016/10/MICROORGANISMOS-IMPLICADOS-EN-LA-REMOCION-DE-HG-1024x895.png>

## **3 DISEÑO METODOLÓGICO**

### **3.1 Tipo de Investigación**

El presente proceso investigativo, se caracterizó por ser una investigación documental, con base en artículos en inglés, manuales técnicos y diferentes estudios que establecen la biorremediación de suelos y aguas contaminadas; cuya información fue cualitativa, al mismo tiempo descriptiva y prospectiva, en donde se resaltó una serie de hechos, para lograr alcanzar el objetivo general y cada uno de los objetivos específicos.

Finalmente, en este proyecto de investigación se analizaron alternativas necesarias para la recuperación de las fuentes hídricas y suelos contaminados a causa de la actividad minera, que se realiza en el municipio de Istmina – Chocó, que ha traído consecuencias fatales en cuanto al ambiente y la salud pública, para los habitantes de este municipio.

### **3.2 Población de estudio**

Documentos y artículos a nivel internacional y nacional, basados en la biorremediación de mercurio en ambientes (suelos y aguas).

### **3.3 Métodos**

- **Búsqueda y Revisión de la Información Existente**

Se realizó a partir del tema tratado en el actual escrito. Se revisaron artículos científicos en inglés, tesis de grado, documentos de web y libros, al igual que se tuvieron muy en cuenta las narraciones de personas dedicadas a la actividad minera en el municipio de Istmina. La base de datos revisada fue: NCBI (PubMed Central); también se utilizaron buscadores como: Google académico, Scielo, Microsoft academic y Ciencia.Science.gov.

- **Selección de las temáticas a partir del material bibliográfico consultado**

En esta fase, de los documentos consultados, se seleccionaron los temas principales en inglés: Mercury AND gold AND Mining AND Bioremediation; también los temas en español en google académico, Scielo, Microsoft academic y Ciencia.Science.gov: Estrategias de Biorremediación por la contaminación con mercurio por la minería; Biorremediación de mercurio en suelos y fuentes hídricas, y efectos del mercurio hacia la salud.

- **Organización de forma lógica del documento**

Una vez seleccionados los temas de investigación, se organizó cronológicamente el documento, desde el más antiguo (2000) hasta el más reciente (2019), en donde se resaltaron los aspectos importantes del municipio de Istmina en cuanto a la actividad minera, los tipos de minería practicados y el impacto ambiental de la minería en las fuentes hídricas y suelos del municipio, y demás conceptos relacionados; se investigó sobre el principal contaminante por causa de la actividad minera (mercurio); se estudiaron los pasos en el proceso de la biorremediación y las estrategias que se han utilizado para la remediación biológica de ambientes (suelo y agua) contaminados con mercurio (Hg) por la minería en el mundo y que se pueden implementar en Colombia, especialmente en Istmina (Chocó).

- **Análisis de la Información**

Información referente a la biorremediación de mercurio en suelos y aguas contaminada; estrategias de biorremediación eficaces para la degradación del contaminante principal (mercurio) en los suelos y en las fuentes hídricas donde se lleva a cabo la actividad minería en Istmina (Chocó).

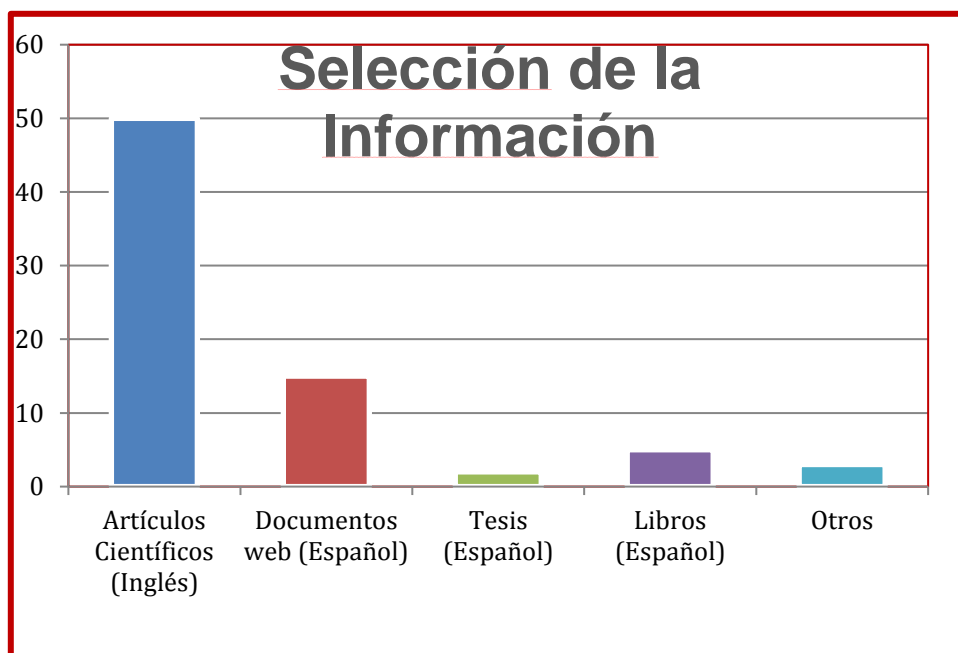
## 4 RESULTADOS

### FASE 1. Búsqueda y Revisión de la Información

Para la localización de los documentos bibliográficos se utilizaron varias fuentes documentales como: artículos científicos en inglés, documentos y libros en español que aportan la información necesaria para la construcción de la presente revisión documental, de las cuales la mayoría fueron artículos científicos. La búsqueda bibliográfica inició en marzo de 2017 en la siguiente base de datos: NCBI (PubMed Central), así como también, en buscadores “Google académico, Scielo, Microsoft academic y Ciencia.Science.gov”, utilizando los descriptores: Mercury AND gold AND Mining AND Bioremediation, Estrategias de Biorremediación por la contaminación con mercurio por la minería, Biorremediación de mercurio en suelos y fuentes hídricas.

Igualmente, se consultaron trabajos de investigación recopilados en las entidades competentes con el tema: CODECHOCÓ, IIAP, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, y se realizaron visitas al municipio de Istmina.

Los registros obtenidos oscilaron entre 150 y 200 registros tras la combinación de las diferentes palabras clave, con resultados tanto a nivel nacional como internacional. De esta búsqueda se seleccionaron 75 documentos: 50 artículos en inglés, 15 documentos en español, 5 libros, 2 tesis y 3 investigaciones sobre el tema en las entidades competentes; de los cuales se tomó como primera medida las estrategias de biorremediación de suelos y aguas contaminados con mercurio por causa de la minería.

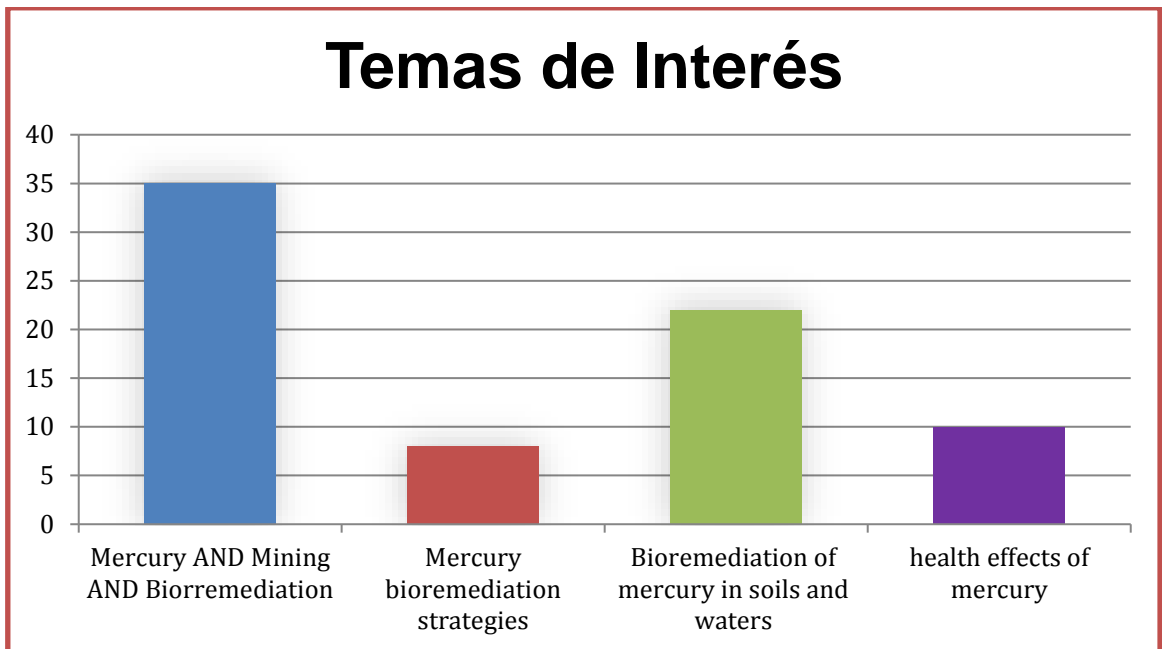


**Figura 9.** Selección de la información para el desarrollo del documento.

## **FASE 2. Selección del material bibliográfico**

En esta fase, de las referencias bibliográficas consultadas, se seleccionaron los temas principales: biorremediación de suelos y aguas contaminadas por la minería.

Se hicieron archivos en computador con la bibliografía consultada, para facilitar la lectura e interpretación, para luego organizar la investigación.

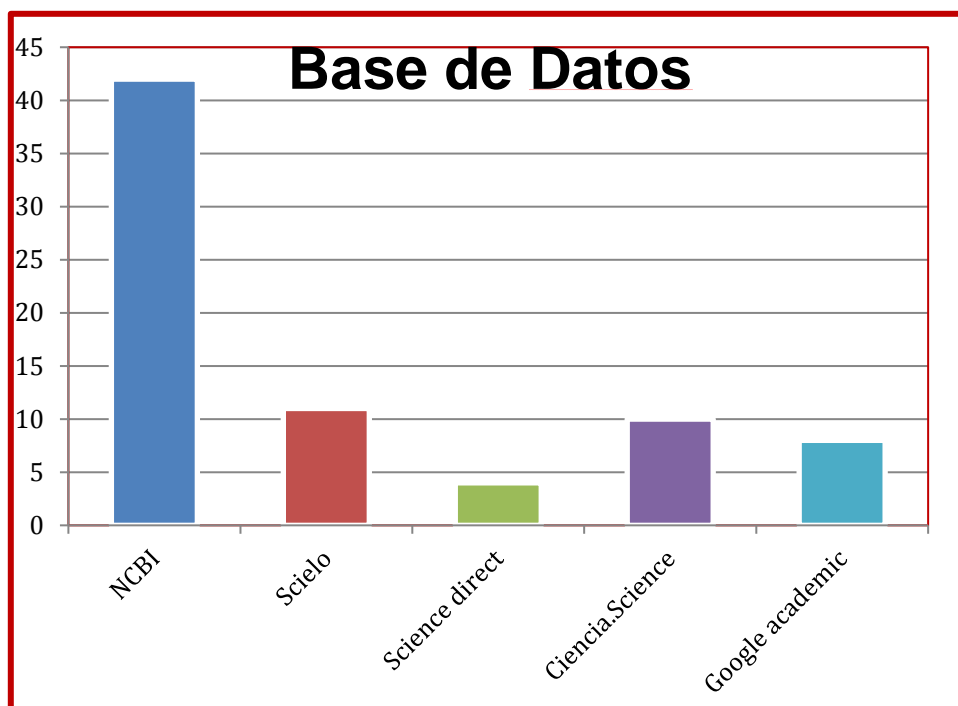


**Figura 10.** Principales temas de interés para el desarrollo del trabajo.

### **FASE 3. Organización lógica del documento**

A continuación, se presenta el material documental seleccionado cronológicamente y por tema de interés.





**Figura 11.** Base de Datos analizadas

**Tabla 2.** Material Documental Seleccionado. Elaboración propia.

<b>Tema: Mercury AND gold AND Mining AND Bioremediation</b>		
<b>TÍTULO</b>	<b>AUTORES</b>	<b>AÑO</b>
Biosorption: anecologicalalternativefortheremovalof heavy metals.	HK Alluri, SR Ronda, VS Settalluri, JS Bondili, V. Suryanarayana, P. Venkateshwar.	2007
ProteogenomicMonitoringofGeobacter PhysiologyduringStimulatedUraniumBioremediation	Michael J. Wilkins, Nathan C. VerBerkmoes, Kenneth H. Williams, Stephen J. Callister, Paula J. Mouser, Hila Elifantz, A. Lucie NGuessan, Brian C. Thomas, Carrie D. Nicora, Manesh B. Shah, Paul Abraham, Mary S. Lipton, Derek R. Lovley, Robert L. Hettich, Philip E. Long, Jillian F. Banfield.	2009
Role ofMicrobialEnzymes in theBioremediationofPollutants: A Review	Chandrakant S. KarigarShwetha S. Rao	2011
OilBiodegradation and Bioremediation: A Tale oftheTwoWorstSpillsin U.S.	Terry C. Hazen	2011

History		
Exposure and toxic effects of elemental mercury in gold-mining activities in Ecuador	Harari R, Harari F, Gerhardsson L, Lundh T, Skerfving S, Strömberg U	2012
Positive Effects of Bacterial Diversity on Ecosystem Functioning Driven by Complementarity Effects in a Bioremediation Context	Patrick A. Venail Martha J. Vives	2013
Bioremediation: a genuine technology to remediate radionuclides from the environment	Dhan Prakash, † Prashant Gabani † Anuj K. Chandel Zeev Ronen Om V. Singh	2013
Risk Factors for Mercury Exposure of Children in a Rural Mining Town in Northern Chile	Johan Ohlander, Stella Maria Huber, Michael Schomaker, Christian Heumann, Rudolf Schierl, Bernhard Michalke	2013
Heavy Metal Contamination Assessment and Partition for Industrial and Mining Gathering Areas	Yang Guan, Chaofeng Shao, Meiting Ju	2014
Bioremediation at a global scale: from the test tube to planet Earth	Victor de Lorenzo Philippe Marliere Ricard Sole	2016
A new mercury-accumulating <i>Mucor hiemalis</i> strain EH8 from cold sulfidic spring water biofilms	Enamul Hoque Johannes Fritscher	2016
Heavy Metal Pollution from Gold Mines: Environmental Effects and Bacterial Strategies for Resistance	Muibat Omotola Fashola, Veronica Mpode Ngole-Jeme, Olubukola Oluranti Babalola	2016
Bioremediation techniques: classification based on the application site: principles, advantages, limitations and perspectives.	Chibueze C, Blaise CC, Okpokwasili GC	2016
A New Strategy for Heavy Metal Polluted Environments: A Review of Microbial Biosorbents	Ayansina Según Ayangbenro, Olubukola Oluranti Babalola	2017
Modulators of mercury risk to wildlife and humans in the context of rapid global change	Collin A. Eagles-Smith, Ellen K. Silbergeld, Niladri Basu, Paco Bustamante, Fernando Diaz-Barriga, William A. Hopkins, Karen A. Kidd, Jennifer F. Nyland	2018
Heavy metal tolerance traits of filamentous fungi isolated from gold and gemstone mining sites	Oluwatosin Gbemisola Oladipo, Olusegun Olufemi Awotoye, Akinyemi Olayinka, Cornelius Carlos Bezuidenhout, Mark Steve Maboeta	2018
Molecularly Imprinted Polymers for Removal of Metal Ions: An Alternative Treatment Method	Özgecan Erdem, Yeşeren Saylan, Müge Andaç, Adil Denizli	2018
Biosorption potential of natural, pyrolysed and acid-assisted pyrolysed sugarcane bagasse for the removal of lead from contaminated water	Ghulam Mustafa Shah, Muhammad Nasir, Muhammad Imran, Hafiz Faiq Bakhat, Faiz Rabbani, Muhammad Sajjad, Abu Bakr Umer Farooq, Sajjad Ahmad, Lifeng Song	2018

Heavy metal tolerance traits of filamentous fungi isolated from gold and gemstone mining sites	Oluwatosin Gbemisola Oladipo, Olusegun Olufemi Awotoye, Akinyemi Olayinka, Cornelius Carlos Bezuidenhout, Mark Steve Maboeta	2018
Multimetal bioremediation and biomining by a combination of new aquatic strains of <i>Mucor hiemalis</i>	Enamul Hoque Johannes Fritscher	2019
<b>Tema: Estrategias de biorremediación por la contaminación con mercurio</b>		
<b>TÍTULO</b>	<b>AUTORES</b>	<b>AÑO</b>
Mathematical modeling of the integrated process of mercury bioremediation in the industrial bioreactor	Paweł Głuszczyk, Jerzy Petera, Stanisław Ledakowicz	2011
Mechanisms of heavy metal removal using microorganisms as biosorbent. Water	Javanbakht V., Alavi SA, Zilouei H.	2014
Toward Bioremediation of Methylmercury Using Silica Encapsulated <i>Escherichia coli</i> Harboring the mer Operon	Aunica L. Kane, Basem Al-Shayeb, Patrick V. Holec, Sri Jay Rajan, Nicholas E. Le Mieux, Stephen C. Heinsch, Sona Psarska, Kelly G. Aukema, Casim A. Sarkar, Edward A. Nater, Jeffrey A. Gralnick	2016
Endophytic fungal communities of <i>Polygonum acuminatum</i> and <i>Aeschynomene fluminensis</i> are influenced by soil mercury contamination	William Pietro-Souza, Ivani Souza Mello, Suzana Junges Vendruscullo, Gilvan Ferreira da Silva, Cátia Nunes da Cunha, James Francis White, Marcos Antônio Soares	2017
Bacterial Exopolysaccharide mediated heavy metal removal: A Review on biosynthesis, mechanism and remediation strategies.	Pratima Gupta Batul Diwan	2017
Vertical Distribution of Total Mercury and Mercury Methylation in a Landfill Site in Japan	Jing Yang, Masaki Takaoka, Akira Sano, Akito Matsuyama, Ryuji Yanase	2018
The Golden Activity of <i>Lysinibacillus sphaericus</i> : New Insights on Gold Accumulation and Possible Nanoparticles Biosynthesis	María Camila Bustos, Humberto Ibarra, Jenny Dussán	2018
High Efficiency Mercury Sorption by Dead Biomass of <i>Lysinibacillus sphaericus</i> —New Insights into the Treatment of Contaminated Water	Vega-Páez JD, Rivas RE, Dussán-Garzón J	2019

<b>Tema: Biorremediación de mercurio en suelos y fuentes hídricas</b>		
<b>TÍTULO</b>	<b>AUTORES</b>	<b>AÑO</b>
<i>MerF</i> es una proteína de transporte de mercurio: ¿diferentes estructuras pero un mecanismo común para los transportadores de iones de mercurio?	Wilson, J.R., Leang, C., Morby, A.P., Hobman, J.L., Brown, N.L	2000

Operónmer: resistencia bacteriana al mercurio y potencial de biorremediación de ambientes contaminados.	Nascimento, A.M., Chartone-Souza, E.	2003
Bioadsorción: una alternativa ecológica para la eliminación de metales pesados	HK Alluri , SR Ronda , VS Settalluri , JS Bondili , V. Suryanarayana , P. Venkateshwar.	2007
La expresión de ión mercúrico reductasa en álamo oriental ( <i>Populus deltoides</i> ) confiere reducción y resistencia de iones mercúricos.	Melgar, M.J., Alonso, J., García, M.A	2007
In situ: biorremediación de aguas subterráneas	T. C. Hazen	2009
Bioacumulación de mercurio y síntesis simultánea de nanopartículas por Células de <i>Enterobactersp.</i>	Sinha A, Khare SK .	2010
Preocupaciones sobre el mercurio líquido y los desechos que contienen mercurio: una revisión de las tecnologías de tratamiento para el almacenamiento seguro	Olga Rodríguez, Isabel Padilla Hanan, Tayibi Aurora López Delgado	2012
Tolerancia de los aislados de bacterias resistentes a TBT al metilmercurio	Adelaja, O.A., Keenan, H.E	2012
Aislamiento de bacterias marinas altamente resistentes al mercurio y su proceso de bioacumulación.	Deng, X., Wang, P	2012
Identificación de genes expresados diferencialmente en respuesta al estrés por mercurio I y II en <i>Trichoderma reesei</i> .	Puglisi, I., Faedda, R., Sanzaro, V., Lo Piero, A.R., Petrone, G., Cacciola Santa, O	2012
Bacterias resistentes al mercurio del marisma del estuario del Tajo: la influencia de la presencia de plantas y los niveles de contaminación por mercurio.	Figueiredo NLL, Areias A, Mendes R, Canario J, Duarte A, Carvalho C	2014
La socialidad de la biorremediación: secuestro de la vida social de las poblaciones microbianas para limpiar la	Siobhan O'Brien Angus Buckling	2015

contaminación por metales pesados.		
Elucidación del impacto de la contaminación por metales pesados en el crecimiento bacteriano del suelo y la flexibilidad de las sustancias poliméricas extracelulares.	Muniswamy David, PaidiMurali Krishna, JeybalanSangeetha	2016
Exposición humana y evaluación de riesgos asociados con la contaminación por mercurio en el río Caqueta, Amazonía colombiana.	Olivero-Verbel J , Carranza-Lopez L , Caballero-Gallardo K , Ripoll-Arboleda A , Muñoz-Sosa D .	2016
Acumulación de metales pesados por bacterias vivas y muertas como biosorbentes: aislados del suelo residual	IqraBatool, SaiqaAndleeb ShaukatAli, KalsoomAkhtarNazishMazharAli	2017
Rasgos de tolerancia a metales pesados de hongos filamentosos aislados de sitios de minería de oro y piedras preciosas.	OluwatosinGbemisolaOladipo, OlusegunOlufemiAwotoye, AkinyemiOlayinka, Cornelius Carlos Bezuidenhout, Mark Steve Maboeta	2018
Bioadsorción de mercurio de alta eficiencia por biomasa muerta de <i>Lysinibacillusphaericus</i> : nuevas ideas sobre el tratamiento del agua contaminada	Vega DJ., Rivas RE.; Garzón JD.	2019

**Tema:** Efectos del mercurio hacia la salud

Occupational exposure to airborne mercury during gold mining operations near El Callao, Venezuela	Drake PL, Rojas M, Reh CM, Mueller CA, Jenkins FM	2001
Revisión: exposición ambiental al mercurio y sus implicaciones toxicopatológicas para la salud pública.	Tchounwou PB, Ayensu WK, Ninashvili N, Sutton D.	2003
Long-Term Effects of Elemental Mercury on Renal Function in Miners of the Idrija Mercury Mine	AlenkaFranko, Metka V. BudihnaMetodaDodic-Fikfak	2005
Is low-level environmental mercury exposure of concern to human health?	Holmes P, James K, Levy L.	2009
Contaminación con mercurio por la actividad minera.	<b>Santiago Español Cano</b> Instituto Nacional de Salud (INS)	2012
Síndrome nefrótico asociado al mercurio: reporte de un caso y revisión sistemática de la literatura.	Miller S, Pallan S, Gangji AS, Lukic D, Clase CM	2013
Effect of Mercury Exposure on Renal Function and Hematological Parameters among Artisanal and Small-scale Gold Miners at Sekotong, West Lombok, Indonesia	Ekawanti A, Krisnayanti BD	2015
Thyroid function in Sudanese gold miners with chronic mercury Exposure	EltayebTayrab	2017
Reduced egfr, elevated urine protein and low level of personal protective equipment compliance among	Afrifa J, Essien-Baidoo S, Ephraim RKD, Nkrumah D, Dankyira DO	2017

#### FASE 4. Análisis de la Información

La información obtenida permitió conocer la temática relacionada con la biorremediación de suelos y aguas contaminadas principalmente con mercurio, por causa de la minería en el municipio de Istmina, y las demás consecuencias fatales para el ambiente y la salud.



Figura 12. Documentos revisados

## 5 DISCUSIÓN

De acuerdo a los datos del Ministerio de Minas y Energía obtenidos por medio del Anuario Estadístico Minero Colombiano, el departamento del Chocó en el periodo comprendido entre 2001 y 2018 es el primer productor de platino del país con 17.499,5 kg (55) y el segundo productor de oro con 154.796,8 kg (56); lo que refleja la importancia de la actividad minera en el departamento. Igualmente, el municipio de Istmina para el periodo de referencia, es el segundo productor de platino del país con 1.595.095 gramos (55) y séptimo productor de oro del país con 24.880.080,61 gramos (56).

Las bases de datos de CODECHOCO muestran un total de seis entables mineros con permiso ambiental, mientras que las visitas realizadas en el primer semestre de 2018 registraron 113 entables mineros sin ningún tipo de permiso (14). Las explotaciones mineras sin permiso ambiental se desarrollan principalmente por explotadores de pequeña y mediana minería provenientes del interior del país, con montajes importantes que incluyen retroexcavadoras, canalones, dragas de succión y otros equipos auxiliares, que realizan la actividad en la mayoría de los casos sin planeamiento minero – ambiental, sin las especificaciones técnicas requeridas y sin esquemas de responsabilidad social y ambiental; lo que genera destrucción de suelos, contaminación de fuentes hídricas, pérdida de biodiversidad, desarraigo de las comunidades asentadas en el territorio, entre otros.

Normalmente en Istmina la minería mecanizada se ha implementado como una actividad productiva contraria a la sostenibilidad ambiental, que además de

representar la principal fuente generadora de ocupación de mano de obra e ingresos económicos a la población, es ampliamente reconocida como la que mayor grado de deterioro y degradación causa a los ecosistemas y recursos naturales. Un problema esencial en este contexto tiene que ver con la falta de implementación de estrategias, mecanismos y acciones enfocadas a la recuperación de las áreas intervenidas; tanto por las entidades como por las comunidades u organizaciones locales, de la mano a la deficiente sino ausente cumplimiento de las directrices y normas legales concernientes con un ordenamiento y manejo territorial apropiado. La grave situación ambiental causada por la actividad minera tecnificada y la importancia de esta actividad en la economía regional, hacen necesario que el análisis de la situación de esta, se realice considerando tanto el aspecto ambiental como el económico, el minero, el geológico, y el legal.

La exposición ocupacional y general de la población al mercurio puede ser directa e indirecta. La exposición directa se atribuye principalmente a la presencia de vapores de mercurio elemental (Hg) en el aire ambiente. No obstante, la inhalación de vapor de mercurio en las atmósferas del lugar de trabajo es la ruta principal de exposición ocupacional, que a menudo es severa y aguda con hasta un 80% de absorción por los pulmones durante la exposición alta (17). Los principales órganos dañados son principalmente los riñones y los pulmones, pero también puede haber daños en el sistema nervioso.

Según la OMS, la exposición indirecta, sin embargo, ocurre como resultado de la presencia de vapor de mercurio elemental (Hg) que contamina las superficies circundantes, penetra en cuerpos de agua, peces, alimentos, etc. (16) Las fuentes principales de todas las exposiciones no ocupacionales son a través de la ingesta alimentaria de peces y mariscos contaminados (15). De acuerdo con Holmes (21) el calentamiento de la amalgama de mercurio también libera vapores de mercurio en la atmósfera que se depositan en las paredes, la ropa y otras superficies circundantes que conducen a la contaminación ambiental. El contacto con



cualquiera de estos objetos contaminados incluso después de quemar la amalgama puede provocar la inhalación de los humos. El efecto de la exposición al mercurio no se limita a las personas que realizan la actividad minera sino también a las comunidades circundantes, ya que los vapores son arrastrados por el viento a los alrededores cercanos.

Las implicaciones adversas para la salud del mercurio y el metilmercurio no se notan de inmediato, sino que se manifiestan con el tiempo (19), hasta aproximadamente 5 a 10 años después de la exposición. Se ha informado que la toxicidad del mercurio afecta varios órganos y funciones metabólicas. Además del sistema nervioso central, los riñones son fácilmente blanco de toxicidad por mercurio con alta acumulación, particularmente en las áreas de los túbulos proximales (17). Sin embargo, se ha demostrado que el alcance del daño y la desregulación renal es una función de la duración de la exposición, el estado del mercurio y el alcance de la exposición al mercurio, así como la ruta de exposición (21).

Entre los mineros de oro a pequeña escala, las anormalidades renales se han expresado en forma de creatinina sérica elevada, reducción de la TFGe y aumento de la proteinuria, según un estudio reciente que informó una asociación significativa de la exposición al mercurio con la reducción de la TFGe y el aumento de la proteína de orina entre los mineros artesanales a pequeña escala en Ghana (22). Del mismo modo, se ha informado un aumento significativo en la proteinuria entre los mineros en Idrija, Nigeria (17) y Sekotong, West Lombok-Indonesia (19). Por el contrario, otros informaron que no hay asociación de niveles de mercurio bajos a moderados con biomarcadores de función renal como creatinina, albúmina y excreción de macroglobulina  $\beta$ -2, excepto una TFGe significativamente reducida entre los mineros de oro artesanales que están expuestos al vapor de mercurio (21).

Una vez más, un estudio que evaluó la exposición al mercurio en el aire durante la

extracción de oro en Venezuela encontró que el 7.8% de los participantes presentaba un nivel detectable de N-acetil-β-D-glicosaminidasa (NAG) en orina. También informaron una correlación significativa entre NAG en orina y niveles de mercurio en orina entre los participantes del estudio (23); la ventaja de NAG como un biomarcador renal es su capacidad para detectar la interrupción celular preclínica no específica de los túbulos proximales de los riñones. Esto confirma la naturaleza insidiosa de la toxicidad del mercurio, de ahí la necesidad de que los mineros a pequeña escala adopten medidas de precaución (21).

Dentro del riñón, la sección más vulnerable susceptible a la toxicidad del mercurio son los pares rectos de los túbulos proximales. Los estudios experimentales en modelos animales han revelado la glomerulonefritis mediada inmunológicamente después de la exposición al mercurio, enfatizando el vínculo entre la exposición al mercurio y la glomerulonefritis, la enfermedad renal crónica, la necrosis tubular aguda y el síndrome nefrótico (24) Otras investigaciones también han informado sobre diversas lesiones renales, como disfunción tubular, aumento de proteinuria y glomerulonecrosis en trabajadores expuestos al mercurio (17).

La biorremediación de los ambientes (agua y suelo) degradados por actividad minería en el municipio de Istmina, representa una respuesta a los conflictos de uso del suelo generados por la perversa dinámica ambiental que por siempre ha desarrollado la minería en la región, como constantemente se registra en los diferentes diagnósticos ambientales. La extracción de oro ilegal y artesanal ha provocado altas tasas de contaminación por Hg en más del 60% del país (57).

Colombia firmó la Convención de Minamata sobre Mercurio en 2013, pero solo en el año 2018 el gobierno estableció la ley para la reducción de mercurio (Hg) en los

próximos 5 años (59). Sin embargo, la contaminación por mercurio (Hg) continúa siendo un problema, especialmente para las comunidades mineras donde el tratamiento del agua es difícil de lograr debido a sus contextos políticos y económicos. De hecho, actualmente no se implementa ningún tratamiento en ninguna de las comunidades afectadas.

La biorremediación de ambientes (agua y suelo) contaminados con Hg, sustancia tóxica encontrada en altas concentraciones en el municipio de Istmina, se ha investigado utilizando microorganismos que se encuentran fácilmente en sedimentos contaminados, pero los mecanismos de absorción deben estudiarse más a fondo para establecer si las partículas de Hg se transforman en sustancias más tóxicas o difíciles de manejar o no. El Hg<sup>0</sup> puede volatilizarse rápidamente mediante reductasas codificadas por genes merA o mecanismos reductores de sulfato (38). Las especies metiladas son las especies más peligrosas y los sistemas biológicos tienden a metilar Hg cuando se expresan los genes hgcAB (39). Por lo tanto, la eliminación de Hg por microorganismos tolerantes capaces de absorber el metal pesado es altamente deseable, pero transformarlo por mecanismos de resistencia no lo es (40).

En las últimas décadas, se han llevado a cabo numerosos estudios respecto de la utilización de biomasa bacteriana, viva o muerta, como bioadsorbente de diversos metales (Adsorción a EPS), a través de varios mecanismos físicos-químicos: intercambio iónico, complejación, precipitación, quelación, etc. Esta estrategia ha emergido como una de las alternativas más promisorias para la remoción de mercurio presente en el agua (44). La adsorción ocurre por interacción entre iones metálicos cargados positivamente y los EPS cargados negativamente y superficies celulares. Los abundantes grupos funcionales activos e ionizables y los sustituyentes no carbohidratos como el grupo acetamino de quitina, fosfodiéster

(ácido teicoico), fosfatos, grupo hidroxilo, carboxilos, sulfhídrico y aminos, imparten carga negativa al polímero.

Los resultados de la eliminación de mercurio (Hg) por bacterias vivas y muertas son consistentes con estudios previos con otros metales donde es un hecho que las bacterias muertas tienden a ser más eficientes que las bacterias vivas (47). Esto podría deberse a mecanismos de transporte activo en bacterias vivas que constantemente absorben y reabsorben Hg por canales inespecíficos. Además, es necesario resaltar que Hg no se acumula en el citoplasma ya que los genes de resistencia del operón *mer* están ausentes.

Las bacterias muertas presentan varias ventajas debido a su falta de susceptibilidad metabólica a los cambios del medio ambiente por la transferencia horizontal indeseada de genes de otros microorganismos (44), y también porque pueden ser aceptadas más fácilmente por las personas que las bacterias "vivas" ya que todos los microorganismos tienden a estar más relacionados con patógenos y enfermedades, especialmente entre las comunidades rurales afectadas por mercurio debido a su bajo acceso a la educación. Las bacterias muertas han demostrado ser eficientes en la eliminación de mercurio, pero las cepas colombianas de *Lysinibacillus sphaericus* probadas en un estudio contra concentraciones de Hg de hasta 60 ppm (49) mostraron un método prometedor y económico para proporcionar tratamiento de agua en comunidades que aún reciben contaminación por mercurio de las actividades mineras.

*Lysinibacillus. Sphaericus* tiene una capa que rodea a toda la célula, conocida como la proteína de la *capa S*. La presencia de la proteína puede conferir importantes ventajas a los microorganismos, está demostrado que las bacterias con esta proteína poseen diversos mecanismos para las interacciones metálicas y la biotransformación; esto incluye la bioadsorción y la bioacumulación, pero también

actúa como una estructura protectora en entornos que son perjudiciales para las células, como las zonas mineras activas.

Recientemente Paéz (2019) demostró en zona minera de Colombia, que las bacterias *Lysinibacillus sphaericus* (CBAM5, Ot4b31 y III (3) 7), pueden adsorber Hg como partículas de escala nanométrica, que pueden estar relacionadas con la presencia de proteínas de unión a metales de la “capa S”. También se demostró que *L. sphaericus* puede adsorber oro (Au) y probablemente incluso sintetizar nanopartículas estos resultados sugieren que *L. sphaericus* podría usarse como un método biológico novedoso para eliminar el mercurio de las aguas contaminadas a causa de la minería (33).

Finalmente, sería interesante continuar esta investigación, para evaluar la selectividad de las cepas que se usarán en la biorremediación de ambientes contaminados con metales pesados, también se deberán hacer estudios del potencial de la proteína S, dada su capacidad para acumular iones metálicos; y resaltar el desarrollo de un biorreactor como piloto, que podría ser un enfoque importante para las condiciones reales a las que *L. sphaericus* está sujeto a la obtención de oro sin mercurio.

<b>MICROORGANISMO</b>	<b>ESTRATEGIA DE BIORREMEDIACIÓN</b>	<b>REFERENCIA</b>
<i>Pseudomonas fluorescens</i> , <i>Alcaligenes faecalis</i>	Bioadsorción de Hg (Exopolisacaridos EPS) 92% en agua	Adelaja y Keenan, 2012
<i>Azotobacter chroococcum</i>	Biadsorción de Hg en suelo (EPS Homogéneo) 47.87% Hg <sup>2+</sup>	Rasulov et al, 2013
<i>Hyphomonas sp</i>	Biadsorción de Hg en agua (EPS MHS-3) 80% MeHg	Chmurny et al, 2016
<i>Cyanobacterium synococcus</i> <i>E. coli</i> <i>Pseudomonas putida</i>	Reducción enzimática (Metalotioneinas) de MeHg a Mercurio inorgánico 78%, 74% y 90% respectivamente.	Santos et al, 2017
<i>Lysinibacillus sphaericus</i> ( <i>Cepas mezcladas</i> )	Bioadsorción de Hg, Bioacumulación de Oro y Protección (Proteína de la capa S – Espora) 95% en agua.	Bustos (2018), Páez y Vega (2019)

Estudio en Quibdó (Chocó), realizado por el Instituto Nacional de Salud, en el año 2016, en donde El 95,8 % de las personas evaluadas mencionaron consumir pescado; el 62% utilizan aguas del Río Atrato para necesidades básicas.

<b>MUESTRAS ANALIZADAS</b>	<b>Valores Límites Permisibles(Hg)</b>	<b>RESULTADO DEL ESTUDIO (Hg)</b>
<b>Agua</b> (Río Atrato)	0.002 mg/L 2 ug/L	<b>0.016 mg/L</b> <b>16 ug/L</b>
<b>Pescado</b> (Bocachico, Mojarra, Bagre y Doncella)	0.5 mg/kg 1 mg/kg con alto potencial de bioacumulación	<b>Bocachico (1.5 mg/Kg)</b> <b>Mojarra (0.8 mg/Kg)</b> <b>Bagre (1.9 mg/Kg)</b> <b>Doncella (1.0 mg/Kg)</b>

## 6 CONCLUSIONES

1. No existen publicaciones en Istmina (Chocó) de biorremediación de mercurio, por lo tanto, se hace necesario una propuesta a nivel de revisión documental sobre estrategias microbiológicas eficientes que se pueden utilizar.
2. Efectivamente la inhalación de los vapores de mercurio, la ingesta de agua y alimentos potencialmente contaminados con MeHg, son las principales vías de ingreso del metal al organismo, causando daño al sistema nervioso central, hígado y riñones.
3. Finalmente, las metodologías biológicas, mediante la utilización de bacterias, para biorremediación de aguas y suelos contaminados con mercurio, son generalmente las técnicas más estudiadas, de bajo costo y con grandes logros, que las hacen atractivas y adaptables a países en desarrollo como Colombia, donde la minería ilegal y artesanal, está presente, como en el municipio de Istmina (Chocó).

PERSPECTIVA

Que el Gobierno Nacional volque su mirada al departamento del Chocó y sus diferentes municipios no solo para la extracción de metales preciosos sino para el aporte de biosoluciones, de infraestructura en investigación y para los problemas derivados de la minería tanto legal como ilegal.

## **7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**



1. CODECHOCO, IIAP. 2019. Reducción del uso de mercurio y mejoramiento de la productividad y la sostenibilidad en el distrito minero de Istmina.
2. Guerrero, JJ; Ortiz, Z.; 2010. Biorremediación de Cianuro y Mercurio en Minería Aurífera. JOSCAJD Prensa & Comunicaciones (eds), 200pp.
3. US-EPA, 2007, Treatment Technologies for Mercury in Soil, Waste, and Water, August 2007.
4. Camargo Juan C., Arias Jennifer, Muñoz Dein. Evaluación del contenido de mercurio en suelos y lechos de quebradas en la zona minera de Miraflores, Quinchía, Colombia. 2014. (Consultado 2019 feb 02). Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/acag/v64n2/v64n2a8.pdf>
5. DÍAZ, Eduardo. (2006). Guía de Lombricultura: una alternativa de producción para emprendedores y productores del agro. Argentina – La Ríoja. Agencia de Desarrollo Económico y Comercio Exterior – ADEX., pp. 57-pdf.
6. Sinha, A., Khare, S.K. 2012. Mercury bioremediation by mercury accumulating *Enterobacter* sp. cells and its alginate immobilized application. Biodegradation. 2012. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21607817>
7. Pedrero Z., Bridou R., Mounicou S., Guyoneaud R., Monperrus M., Amouroux D. Transformation, Localization, and Biomolecular Binding of Hg Species at Subcellular Level in Methylating and Nonmethylating Sulfate-Reducing Bacteria. Sci. Technol. 2012. [Internet]. [consultado 2019 abr 05]; Disponible en: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es302412q>
8. Lee, S.E., Chung, J.W., Won, H.S., Lee, D.S., Lee, Y.W. 2012. Removal of methylmercury and tributyltin (TBT) using marine microorganisms. Bull Environ Contam Toxicol. 2012. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22212416>
9. Cabral, L., Giovanella, P., Gianello, C., Bento, F.M., Andrezza, R., Camargo, F.A. Isolation and characterization of bacteria from mercury contaminated sites in Rio Grande do Sul, Brazil, and assessment of methylmercury removal capability of a *Pseudomonas putida* V1 strain. Biodegradation. 2012. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22983740>
10. Mosquera Córdoba, Tatiana. Eficiencia del Lombricompostaje en la biorremediación de suelos degradados por la minería a cielo abierto en el municipio de Unión Panamericana, departamento del Chocó [Internet] Manizales: Universidad de Manizales; 2016 [Consultado 2019 feb 10] Disponible en:

[http://ridum.umanizales.edu.co:8080/xmlui/bitstream/handle/6789/2929/Mosquera%20%20C%C3%B3rdoba Tatiana%20%202016.pdf?sequence=1](http://ridum.umanizales.edu.co:8080/xmlui/bitstream/handle/6789/2929/Mosquera%20%20C%C3%B3rdoba%20Tatiana%20%202016.pdf?sequence=1)

11. Bustos MC., Ibarra H., Dussán J. The Golden Activity of *Lysinibacillus sphaericus*: New Insights on Gold Accumulation and Possible Nanoparticles Biosynthesis. PMC. MDPI. 2018. [Internet]. [consultado 2019 feb 10]; Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6163967/>
12. [www.istminasoyyo.over-blog.com](http://www.istminasoyyo.over-blog.com) (Consultado 2019 feb 12) Disponible en: [http://istminasoyyo.over-blog.com/pages/ISTMINA\\_RESENA\\_HISTORICA-2426877.html](http://istminasoyyo.over-blog.com/pages/ISTMINA_RESENA_HISTORICA-2426877.html)
13. Ministerio de Minas y Energía. Información sobre el PBI minero de Colombia. Disponible en: [http://tierradigna.org/pdfs/LA%20MINERIA%20EN%20CHOCO\\_web.pdf](http://tierradigna.org/pdfs/LA%20MINERIA%20EN%20CHOCO_web.pdf)
14. Colombia. Corporación Autónoma Regional para el Desarrollo del Chocó. CODECHOCÓ. 2019
15. Instituto Nacional de Salud (INS). Contaminación con mercurio por la actividad minera. (Consultado 2019 feb 20) Disponible en: <https://revistabiomedica.org/index.php/biomedica/article/view/1437>
16. Instituto Nacional de Salud (INS). Protocolo de intoxicaciones por sustancias químicas. Bogotá, Colombia; 2019.
17. Alenka Franko, Metka V. Budihna, Metoda Dodic-Fikfak. Long-Term Effects of Elemental Mercury on Renal Function in Miners of the Idrija Mercury Mine. Oxford University Press. 2005. (Consultado 2019 dic 02). Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15964879>
18. POISINDEX Managements. Mercury Elemental, Organic e Inorganic. Thomson Reuters (Healthcare) Inc., Greenwood Village, Colorado, USA. (Consultado 2019 nov. 30). Disponible en: <http://www.thomsonhc.com>
19. Ekawanti A, Krisnayanti BD. Effect of Mercury Exposure on Renal Function and Hematological Parameters among Artisanal and Small-scale Gold Miners at Sekotong, West Lombok, Indonesia. *J Health Pollut.* 2015. (Consultado 2019 dic 02). Disponible en: <https://www.journalhealthpollution.org/doi/full/10.5696/2156-9614-5-9-25>
20. Tayrab E. Thyroid function in Sudanese gold miners with chronic mercury Exposure. *Eur J Pharm Med Res.* 2017. (Consultado 2019 dic 02). Disponible en: [https://www.researchgate.net/profile/Eltayeb\\_Tayrab/publication/315760777\\_THYROID\\_FUNCTION\\_IN\\_SUDANESE\\_GOLD\\_MINERS\\_WITH\\_CHRONIC\\_MERCURY\\_EXPOSURE/links/58e2a67daca2722505d163cb/THYROID-](https://www.researchgate.net/profile/Eltayeb_Tayrab/publication/315760777_THYROID_FUNCTION_IN_SUDANESE_GOLD_MINERS_WITH_CHRONIC_MERCURY_EXPOSURE/links/58e2a67daca2722505d163cb/THYROID-)

[FUNCTION-IN-SUDANESE-GOLD-MINERS-WITH-CHRONIC-MERCURY-EXPOSURE.pdf](#)

21. Holmes P, James K, Levy L. Is low-level environmental mercury exposure of concern to human health? *Sci Total Environ*. 2009. (Consultado 2019 dic 02). Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969709009061>
22. Afrifa J, Essien-Baidoo S, Ephraim RKD, Nkrumah D, Dankyira DO. Reduced egfr, elevated urine protein and low level of personal protective equipment compliance among artisanal small scale gold miners at Bibiani-Ghana: a cross-sectional study. *BMC PublicHealth*. 2017. (Consultado 2019 dic 02). Disponible en: <https://bmcpublihealth.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12889-017-4517-z>
23. Drake PL, Rojas M, Reh CM, Mueller CA, Jenkins FM. Occupational exposure to airborne mercury during gold mining operations near El Callao, Venezuela. *Int Arch Occupat Environ Health*. (2001). (Consultado 2019 dic 02). Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s004200000206>
24. Tchounwou PB, Ayensu WK, Ninashvili N, Sutton D. Revisión: exposición ambiental al mercurio y sus implicaciones toxicopatológicas para la salud pública. *Toxicol ambiental*. 2003. (Consultado 2019 dic 02). Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/tox.10116>
25. Miller S, Pallan S, Gangji AS, Lukic D, Clase CM. Síndrome nefrótico asociado al mercurio: reporte de un caso y revisión sistemática de la literatura. *Am J KidneyDis*. (2013). (Consultado 2019 dic 02). Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0272638613005994>
26. [www.ugr.es](http://www.ugr.es). Disponible en: [http://www.ugr.es/~mota/QIA\\_TEMA-3\\_Hg.pdf](http://www.ugr.es/~mota/QIA_TEMA-3_Hg.pdf)
27. Harari R, Harari F, Gerhardsson L, Lundh T, Skerfving S, Strömberg U, et al. Exposure and toxic effects of elemental mercury in gold-mining activities in Ecuador. *Toxicol Lett* [Internet]. ncbi. Nlm. 2012. (Consultado 2019 mar 01) Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21925580>
28. Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. Mercurio y la minería. Disponible en: <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/col145327.pdf>
29. Javanbakht V., Alavi SA, Zilouei H. Mechanisms of heavy metal removal using microorganisms as biosorbent. *Water Sci. Technol*. 2014. [Internet]. [consultado 2019 mar 12]; Disponible en: <https://iwaponline.com/wst/article-abstract/69/9/1775/18360>
30. Velázquez AM. Biotratamientos con base en el uso de la lombriz *Eisenia sp.* aislada de pozos composteros para La remediación de suelos contaminados

con residuos industriales de parafina. bdigital [internet]. 2002; 23: 34-53 [Consultado 2018 mar 12]. Disponible en:<http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/mexico26/v-031.pdf>

31. Olmedo F. Minería a Cielo Abierto, no existe otra actividad industrial tan agresiva ambiental, social y culturalmente. ed 4 [internet]. Bogotá: Ministerio de minas y energía; 2009.[consultado 2019 mar 21] Disponible en: <http://www.biodisol.com/medioambiente/mineria-a-cielo-abierto-no-existe-otraactividad-industrial-tan-agresiva-ambiental-socialy-culturalmente-medio-ambiente-contaminacion/>
32. Bardeau C, Deschenes L, Karamanew, D., Comeau Y, and, SAMSON, Réjean..Bioremediation ofpentachlorophenol-contaminatedsoilbybioaugmentationusingactivatedsoil. 1997 AppliedMicrobiology and Biotechnology. 48, pp 745-752.
33. Vega DJ., Rivas RE.; Garzón JD. High Efficiency Mercury Sorption by Dead Biomass of *Lysinibacillus sphaericus*—New Insights in to the Treatment of Contaminated Water. .PMC. MDPI. 2019. [Internet].[consultado 2019 mar 26]; Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6514844/>
34. Jian XY, Zeng GM, Huang DL, Chen Y, Liu F, HuangG He LIL JB, XI BD, &Liu HL. Remediation of 53 pentachlorophenol-contaminatedsoilbycompostingwithimmobilizedPhanerochaetechrysosporium. WorldJournalofMicrobiology&Biotechnology 22, pp.909-913.
35. Suárez LG, Aristizabal JD Mercurio y extracción de oro en Colombia: un estado fallido. Univ. Sci. 2013; págs. 33-49.
36. Rodríguez, O., Padilla, I., Tayibi, H., López Delgado, A. 2012. Concerns on liquid mercury and mercury-containing wastes: A review of the treatment technologies for the safe storage. J Environ Man 101:197-205
37. Gerhardt, K.E., Huang, X.D., Glick, B.R., Greenberg, B.M. 2009. Phytoremediation and rhizoremediation of organic soil contaminants: potential and challenges. Plant Sci 176: 20-30.
38. Rouch, D.A., Lee, B.T.O., Morby, A.P. Understanding cellular responses to toxic agents: a model for mechanism-choice in bacterial metal resistance. J Indust Microbiol Biotech. 1995 Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/227080027\\_Understanding\\_cellular\\_responses\\_to\\_toxic\\_agents\\_a\\_model\\_for\\_mechanism-choice\\_in\\_bacterial\\_metal\\_resistance](https://www.researchgate.net/publication/227080027_Understanding_cellular_responses_to_toxic_agents_a_model_for_mechanism-choice_in_bacterial_metal_resistance)
39. Nascimento, A.M., Chartone-Souza, E. 2003. Operon mer: bacterial resistance to mercury and potential for bioremediation of contaminated environments. Genet Mol Res. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12917805>

40. Rojas, L.A., Yáñez, C., González, M., Lobos, S., Smalla, K. Characterization of the metabolically modified heavy metal-resistant *Cupriavidus metallidurans* Strain MSR33 generated for mercury bioremediation. PLoS ONE. 2011. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21423734>
41. Wilson, J.R., Leang, C., Morby, A.P., Hobman, J.L., Brown, N.L. MerF is a mercury transport protein: different structures but a common mechanism for mercuric ion transporters? FEBS Lett. 2000 Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10781809>
42. Adelaja, O.A., Keenan, H.E. Tolerance of TBT-resistant bacteria isolates to methyl mercury. Res J Environ Sci. 2012. Disponible en: [https://www.academia.edu/1434706/Tolerance\\_of\\_TBT-resistant\\_bacteria\\_isolates\\_to\\_methylmercury](https://www.academia.edu/1434706/Tolerance_of_TBT-resistant_bacteria_isolates_to_methylmercury)
43. Sinha, A., Khare, S.K. 2010. Mercury bioaccumulation and simultaneous nanoparticle synthesis by *Enterobacter sp.* cells. Biores Technol. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21216593>
44. Gupta P., Diwan B. Bacterial Exopolysaccharide mediated heavy metal removal: A Review on biosynthesis, mechanism and remediation strategies. Biotecnología Rep. De 2017. [Internet].[consultado 2019 jun 17]; Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2215017X16301382>
45. BA Rasulov , A. Yili , HA Aisa. Biosorption of Metal Ions by Exopolysaccharide Produced by *Azotobacter chroococcum XU1*. J. Environ. Prot. 2013 (consultado 2019 jul 30). Disponible en: [https://www.researchgate.net/profile/Bakhtiyor\\_Rasulov/publication/271647139\\_Biosorption\\_of\\_Metal\\_Ions\\_by\\_Exopolysaccharide\\_Produced\\_by\\_Azotobacter\\_chroococcum\\_XU1/links/54ceface0cf29ca810fd3eff.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Bakhtiyor_Rasulov/publication/271647139_Biosorption_of_Metal_Ions_by_Exopolysaccharide_Produced_by_Azotobacter_chroococcum_XU1/links/54ceface0cf29ca810fd3eff.pdf)
46. Deng, X., Wang, P. 2012. Isolation of marine bacteria highly resistant to mercury and their bioaccumulation process. BioresTechnol. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22864169>
47. Andleeb S., Batool I., Ali S., Akhtar K., Ali NM A. Accumulation of Heavy Metals by Living and Dead Bacteria as Biosorbents: Isolated from Waste Soil. Biol. Sci. PJSIR 2017. [Internet].[consultado 2019 abr 06]
48. HK Alluri , SR Ronda , VS Settalluri , JS Bondili , V. Suryanarayana , P. Venkateshwar. Biosorption: una alternativa ecológica para la eliminación de metales pesados. Afr. J. Biotechnol. 2007. [Internet].[consultado 2019 jun 30]; Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2215017X16301382#bib015>
49. [Páez D](#), [Rivas R](#), [Dussán-Garzón](#). High Efficiency Mercury Sorption by Dead Biomass of *Lysinibacillus sphaericus*—New Insights in to the Treatment of

- Contaminated Water. PMC. 2019 (Consultado 2019 nov 02). Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6514844/>
50. Santos Francés F, Martínez Graña A, Alonso Rojo P, García Sánchez A. Geochemical Background and Baseline Values Determination and Spatial Distribution of Heavy Metal Pollution in Soils of the Andes Mountain Range (Cajamarca-Huancavelica, Peru). *Int J Environ Res Public Health* [Internet]. 2017. (Consultado 2019 ago 17). Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/28788105>
51. Domínguez María C., Gómez Sara, Ardila Alba N. Fitorremediación de mercurio en aguas residuales de la industria minera. *UGCiencia*. 2016 (Consultado 2019 jun 09) Disponible en: <https://revistas.ugca.edu.co/index.php/ugciencia/article/view/705>
52. Melgar, M.J., Alonso, J., García, M.A. Removal of toxic metals from aqueous solutions by mercuric ion reductase in Eastern Cottonwood confers mercuric ion reduction and resistance. *Plant Biotechnol*. 2007. (Consultado 2019 nov 05). Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/6635756\\_Expression\\_of\\_mercuric\\_ion\\_reductase\\_in\\_Eastern\\_cottonwood\\_Populus\\_deltoides\\_confers\\_mercuric\\_ion\\_reduction\\_and\\_resistance](https://www.researchgate.net/publication/6635756_Expression_of_mercuric_ion_reductase_in_Eastern_cottonwood_Populus_deltoides_confers_mercuric_ion_reduction_and_resistance)
53. Puglisi, I., Faedda, R., Sanzaro, V., Lo Piero, A.R., Petrone, G., Cacciola Santa, O. 2012. Identification of differentially expressed genes in response to mercury I and II stress in *Trichoderma harzianum*. *Gene*. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22789863>
54. Figueredo NLL, Areias A, Mendes R, Canario J, Duarte A, Carvalho C. Bacterias resistentes al mercurio del marisma del estuario del Tajo: la influencia de la presencia de plantas y los niveles de contaminación por mercurio. *J Toxicol Environ Health A* 77. 2014. (Consultado 2019 jun 30). Disponible en: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15287394.2014.911136>
55. [www.upme.gov.co](http://www.upme.gov.co). Producción de platino.
- 56.: [www.upme.gov.co](http://www.upme.gov.co). Producción de oro.
57. Esquema de Ordenamiento Territorial (EOT) Istmina (Chocó). (Consultado 2019 ago 27). Disponible en: [https://siatpc.co/wp-content/uploads/plan\\_de\\_desarrollo\\_departamental\\_del\\_choco\\_2016\\_2019.pdf](https://siatpc.co/wp-content/uploads/plan_de_desarrollo_departamental_del_choco_2016_2019.pdf)
58. Olivero V, Jesús; Restrepo B. Johnson. El lado gris de la minería del oro: la contaminación con mercurio en el norte de Colombia [Internet]. Universidad de Cartagena; 2002. (Consultado 2019 ago 30). Disponible en:



[http://www.reactivos.com/images/LIBRO\\_MERCURIO - Olivero-JohnsonColombia.pdf](http://www.reactivos.com/images/LIBRO_MERCURIO - Olivero-JohnsonColombia.pdf)

59. WWF Congreso Aprobó Vinculación de Colombia al Convenio de Minamata. (consultado 2019 sep. 08); Disponible en: <http://www.wwf.org.co/?uNewsID=325172> .
60. Eagles Smith CA, Silbergeld EK, Basu N, Bustamante P, DiazBarriga F, Hopkins WA, Kidd KA, Nyland JF. Modulators of mercury risk to wild life and humans in the context of rapid global change. NCBI. 2018 (Internet) (Consultado 2019 sep. 12). Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/29388128>
61. Özgecan Erdem, Yeşeren Saylan, Müge Andac, Adil Denizli. Molecularly Imprinted Polymers for Removal of Metal Ions: An Alternative Treatment Method. NCBI. 2018. (Consultado 2019 sep. 13). Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6352701/>
62. Venkova T., Yeo CC, Espinosa M. Editorial: Lo bueno, lo malo y lo feo: múltiples roles de las bacterias en la vida humana. *Frente. Microbiol* 2018. [Internet]. [consultado 2019 sept. 15]; Disponible en: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmicb.2018.01702/full>
63. Ashford M. ¿Podrían los humanos vivir sin bacterias?. *Ciencia viva* [consultado 2019 sept. 15]; Disponible en: <https://www.livescience.com/32761-good-bacteria-boost-immune-system.html> .
64. A. Bioremediación de Malik. Metal a través de células en crecimiento. *Reinar*. En t. , 30 ( 2004 ) , págs. 261 – 278
65. Olivero Verbel J, Carranza Lopez, L, Caballero Gallardo, K, Ripoll Arboleda, A, Muñoz; Sosa, D. Human exposure and risk assessment associated with mercury pollution in the Caqueta River, Colombian Amazon. *Environ Sci Pollut Res Int*. 2018. [Internet]. (Consultado 2019 sept. 23) Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/27475435>
66. Ngole-Jeme VM, Fantke P. Ecological and human health risks associated with abandoned gold mine tailings contaminated soil. *PLoS One*. 2017. [Internet]. (Consultado 2019 sept. 28) Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/28222184>
67. Paul B Tchounwou, Clement G Yedjou, Anita K Patlolla, Dwayne J Sutton. Heavy metal toxicity and the environment. *Molecular*. 2018.
68. Johan Ohlander, Stella Maria Huber, Michael Schomaker, Christian Heumann, Rudolf Schierl, Bernhard Michalke, et al. Risk Factors for Mercury Exposure of Children in a Rural Mining Town in Northern Chile. *PLoS One*.

2013. [Internet]. (Consultado 2019 sept. 30) Disponible en: <http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0079756>
69. ONU. 17 objetivos para transformar nuestro mundo [Internet]. Objetivos de Desarrollo Sostenible. 2017. (Consultado 2019 sept.. 30) Disponible en: <http://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
70. OMS. Programa Internacional de Seguridad de las Sustancias Químicas. Diez sustancias químicas que constituyen [Internet]. Programa Internacional de Seguridad de las Sustancias Químicas. Disponible en: [http://www.who.int/ipcs/assessment/public\\_health/chemicals\\_phc/es/](http://www.who.int/ipcs/assessment/public_health/chemicals_phc/es/)
71. Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/col145327.pdf>