



Formando líderes para la construcción  
de un nuevo país en paz

## CONTAMINACION POR MERCURIO EN LOS RIOS DE COLOMBIA Y SUS AFECTACIONES EN LA SALUD HUMANA

JACKSON JAVIER TORRADO MARTINEZ

Universidad de Pamplona

Facultad de Ingenierías y Arquitectura

Programa Ingeniería Ambiental

Pamplona-Colombia

2022

CONTAMINACION POR MERCURIO EN LOS RIOS DE COLOMBIA Y SUS  
AFECTACIONES EN LA SALUD HUMANA

**Monografía para optar por el título de ingeniero ambiental**

Jackson Javier Torrado Martínez

Director

Jorge Luis Ortiz Carrillo



Universidad de Pamplona

Facultad de Ingenierías y Arquitectura

Programa Ingeniería Ambiental

Pamplona-Colombia

2022

## Agradecimientos

En este largo camino que ha sido esta formación académica y que hoy termino después de mucho esfuerzo y dedicación, quiero agradecer a Dios por ayudarme a cumplir esta meta en mi vida, agradezco también a mis padres y toda mi familia que estuvieron siempre apoyándome emocional y económicamente, a cada uno de mis compañeros de estudio que estuvieron conmigo en este largo camino, a mis docentes que con la mejor disposición me aportaron su conocimiento con el fin de formarme como un excelente profesional, a la Universidad de Pamplona por darme la oportunidad de entrar y brindarme los mejores espacios de formación para recibir una educación digna y de calidad, por ultimo agradecer a mi director de trabajo de grado Jorge Luis Ortiz por apoyarme e incentivarme a dar siempre lo mejor de mí, sus conocimientos y experiencia me ayudaran a poder concluir este trabajo de grado de excelente manera y a ser un gran profesional. A todos ellos gracias.

## Glosario

### Contaminación:

Es el proceso de alterar el medio ambiente por medio de sustancias y elementos nocivos en altos niveles de concentración o niveles capaces de interferir con el bienestar de la fauna y la flora.

### Mercurio:

Es un elemento natural que se encuentra en la roca de la corteza terrestre, el mercurio elemental un metal plateado y líquido a temperatura ambiente.

### Rio:

Es una corriente de agua que fluye desde su nacimiento hasta su desembocadura en otro río, lago o en el mar.

### Minería:

Es una actividad en la que se identifican los lugares donde hay minerales para sacarlos y procesarlos.

### Ecosistema:

Es el conjunto de especies de un área determinada que interactúan entre ellas y con su ambiente abiótico.

## **PROLOGO**

La industria minera en Colombia representa un gran foco de contaminación hoy en día, debido a que en muchos casos esta actividad se realiza de manera ilegal, esto se ve reflejado en grandes daños a los ecosistemas y a la salud humana, la utilización de mercurio en la explotación del oro para la separación y extracción de este mineral de las rocas, hace que este se genere como residuo y contamine las diferentes fuentes hídricas donde termina, es de gran preocupación porque esta actividad minera está afectando la salud humana de los habitantes que viven en estas zonas y que dependen de estas fuentes hídricas para su sustento, por lo que al no contar con el control debido, termina por contaminar la fauna y flora de la zona y afectar la calidad de vida de sus habitantes.

Es necesario tener un control más estricto de esta actividad minera con el fin de mitigar estos daños y tener una mejor disposición de este residuo, para así garantizar que no se afecte el bienestar de la población cercana, así como disminuir los daños al ecosistema.

Palabras clave: contaminación, mercurio, contaminación de cuerpos de agua, salud humana.

## **ABSTRACT**

The mining industry in Colombia represents a major source of pollution today, because in many cases this activity is carried out illegally, this is reflected in great damage to ecosystems and human health, the use of mercury in gold exploitation for the separation and extraction of this mineral from the rocks, This is of great concern because this mining activity is affecting the human health of the inhabitants who live in these areas and depend on these water sources for their livelihoods, so that without proper control, it ends up contaminating the fauna and flora of the area and affecting the quality of life of its inhabitants.

It is necessary to have a stricter control of this mining activity in order to mitigate these damages and have a better disposal of this waste, to ensure that the welfare of the nearby population is not affected, as well as to reduce the damage to the ecosystem.

Key words: contamination, mercury, contamination of water bodies, human health.

## **TABLA DE CONTENIDO**

|       |                                                                                                    |    |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.    | Introducción.....                                                                                  | 10 |
| 2.    | Objetivos.....                                                                                     | 11 |
| 2.1   | Objetivo general.....                                                                              | 11 |
| 2.2   | Objetivos específicos .....                                                                        | 11 |
| 3.    | Capitulo I. CONEXTO DE LA MINERIA EN COLOMBIA .....                                                | 12 |
| 3.1   | Implicaciones de la minería en Colombia en los sectores económico y social<br>14                   |    |
| 3.2   | Legalización de la minería en Colombia .....                                                       | 15 |
| 3.3   | Ventajas de la formalización de la minería.....                                                    | 18 |
| 4.    | CAPITULO II: CONTAMINACION POR MERCURIO EN LOS RIOS DE<br>COLOMBIA 19                              |    |
| 4.1   | fuentes y empresas que contaminan con mercurio .....                                               | 22 |
| 4.2   | LAS CAUSAS .....                                                                                   | 22 |
| 4.3   | Consecuencias.....                                                                                 | 25 |
| 4.4   | Normativa para manejo de mercurio.....                                                             | 27 |
| 4.4.1 | Límites permitidos en aguas contaminadas por mercurio .....                                        | 29 |
| 5.    | CAPITULO III: TRATAMIENTOS CONVENCIONALES Y AVANZADOS<br>PARA AGUAS CONTAMINADAS CON MERCURIO..... | 30 |
| 5.1   | Tecnologías convencionales .....                                                                   | 30 |

|       |                                                                              |    |
|-------|------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.1.1 | Precipitación química .....                                                  | 30 |
| 5.1.2 | Intercambio iónico .....                                                     | 31 |
| 5.1.3 | Filtración con membrana .....                                                | 31 |
| 5.2   | ADSORCIÓN .....                                                              | 31 |
| 5.2.1 | Bioadsorción .....                                                           | 32 |
| 6.    | Capitulo IV: afectaciones a la salud humana de la contaminación por mercurio |    |
|       | 34                                                                           |    |
| 6.1   | Mercurio elemental .....                                                     | 36 |
| 6.2   | Mercurio orgánico.....                                                       | 37 |
| 7.    | conclusiones .....                                                           | 41 |
| 8.    | bibliografía .....                                                           | 42 |

## TABLA DE ILUSTRACIONES

|                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Ilustración 1. Mapa de regulación minera en Colombia. Fuente: geoactivismo (2020) |    |
| .....                                                                             | 17 |
| Ilustración 2. Minería ilegal en Colombia. Fuente: eltiempo.com .....             | 25 |
| Ilustración 3. Mercurio y minería. Fuente: PIM (2018) .....                       | 26 |
| Ilustración 4. Mapa de minería ilegal en Colombia. Fuente: el mundo (2020) .....  | 33 |
| Ilustración 5. Efectos del mercurio en la salud humana. Fuente: servindi.org      |    |
| (2016) .....                                                                      | 40 |

## **1. INTRODUCCIÓN**

En los últimos años se le ha dado más importancia al cuidado del medio ambiente, hemos visto como la actividad minera representa un alto porcentaje de contaminación, uno de los mayores problemas ambientales que se presentan en Colombia es la utilización de mercurio en la extracción de oro aluvial esto ocasiona una contaminación a los ríos y afectaciones a la salud humana.

Al mercurio se le debe prestar más atención que a la demás fuentes contaminantes de las fuentes hídricas, por sus consecuencias y la dificultad que representa su tratamiento, el problema de la utilización de mercurio en la extracción de oro aluvial, es que esta actividad se realiza de manera artesanal e informal, esto tiene resultados altamente nocivos tanto para las fuentes hídricas como para los mineros y habitantes de la zona en general. Se estima que son cerca de 80 ríos ubicados en 21 departamentos y 400 municipios del país los que presentan contaminación por este metal pesado. Es importante evaluar si la legislación y los entes encargados si realizan el control que esta actividad requiere, apoyando en la recuperación de estas fuentes hídricas y supervisando la salud de las personas afectadas.

Se hará un énfasis en las afectaciones a las fuentes hídricas y todas las consecuencias que trae la contaminación por este metal pesado en la salud de los habitantes de las zonas donde se presenta este tipo de minería.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo general**

Determinar los efectos de la contaminación por mercurio en los ríos de Colombia y sus afectaciones en la salud humana

### **2.2 Objetivos específicos**

- Analizar cuáles son las actividades que más están aportando a la contaminación por mercurio en los ríos.
- Identificar como la contaminación por mercurio afecta el ecosistema fluvial.
- Determinar las afectaciones a la salud humano de las personas expuestas al mercurio

### **3. CAPITULO I. CONEXTO DE LA MINERIA EN COLOMBIA**

“El Estado colombiano considera que los proyectos de extractivismo como prioridad en sus políticas económicas deben ser asignados a los grandes capitales nacionales y transnacionales, por sus recursos financieros y técnicos, es el principal proyecto que nos habla de una garantía en la productividad y por ende el “desarrollo sustentable”. Para ello, construye una serie de equipos y declara de “interés público y de bien social” a la industria minera en todas sus ramas y etapas, con el único fin de ser territorios de transferencia para grandes capitales a través de diversos arreglos contractuales. . . y respetar los intereses de la población local y las normas ambientales” (Londoño B, Bedoya B, Parra B, 2017).

Entre los impactos socio-económicos de este modelo de desarrollo extractivista encontramos el desplazamiento de las comunidades campesinas, indígenas y afro descendientes de sus territorios donde habitan tradicionalmente. La lucha de poderes y el beneficio económico que trae la actividad de la cual se ven beneficiados solo pocas personas a las cuales solo les preocupa enriquecerse sin tener en cuenta los daños ambientales que provoca la minería y las afectaciones a las poblaciones más vulnerables trayendo como resultado violencia, pobreza, falta de oportunidades y menos calidad de vida a estas personas.

En nuestro país durante los últimos tiempos se ha visto un rápido desarrollo de la de las exportaciones, la producción y de la industria minera en sí, también observamos como la inversión extranjera confirman esta afirmación; en algunos departamentos como lo son el Choco, Antioquia, Cesar, Bolívar, Santander, Norte de Santander, la Guajira, el Meta entre otros, observamos que entre octubre del año 2010 y julio del año 2011, de las 1.400 unidades productivas mineras vigentes en el país, alrededor del 65% son ilegales y un porcentaje igualmente alto por incumplimiento de consideraciones económicas será absuelto. . El Estado, 70% no realiza labores de seguridad e higiene ocupacional e higiene ocupacional (Builes Arango, Araque Auzman, & Barrera Restrepo, 2017).

“Es decir, el sector de la extracción minera, representa en cuanto a la explotaciones de los recursos naturales un gran impacto sobre el medio ambiente, provocando la degradación del suelo por deforestación y aridez, el aire por emisiones y los recursos hídricos diferentes por vertido. En Colombia la actividad minera se ha transformado en un área fuertemente estigmatizada principal mente por el estado y sus gobernantes, si nos enfocamos en los últimos años, se inició una línea que separa a las empresas y personas que se dedican a esta actividad entre empresas lícitas e ilícitas, empresas que la efectúan de manera formar o sin tener títulos mineros, empresas que cuentan con alta tecnología y gente que la practicante manualmente” (Builes Arango, Araque Auzman, & Barrera Restrepo, 2017).

### **3.1 Implicaciones de la minería en Colombia en los sectores económico y social**

Colombia cuenta con variedad de núcleos de mineral en prácticamente todo su territorio esto no solo implica afectaciones en el medio ambiente, también representa un problema socioeconómico en el que se deben tener en cuenta que esta actividad representa el mantenimiento de miles de familias en el país, esto nos lleva a analizar dos situaciones que son opuestas, por un lado tenemos a los dueños de las minas los cuales se quedan con el mayor porcentaje de ingresos económicos, por el otro lado tenemos a los trabajadores que reciben salarios que no corresponde con el esfuerzo que requiere hacer esta actividad, esto sin tener en cuenta que diariamente ponen en riesgo sus vidas y su salud.

“Esta es una situación bastante complicada, porque cuando una mina cierra, las personas que cargan con los efectos económicos y sociales son los trabajadores mineros más necesitados, aquellos que viven del día a día, que tienen que trasladarse a otros territorios en busca de nuevas oportunidades para realizar sus actividades de manera ilegal, mientras que los dueños de las máquinas y las minas no tienen más remedio que buscar otros lugares para realizar sus actividades sin ser penalmente responsables de sus actos, daños causados o responsabilidades ambientales por su propio uso irresponsable y negligencia.” (Builes Arango, Araque Auzman, & Barrera Restrepo, 2017).

### **3.2 Legalización de la minería en Colombia**

El desgaste de los recursos naturales es una problemática que se presenta a nivel mundial y Colombia no está exento de este, la rama legislativa ha venido tomando iniciativas que buscan la protección del medio ambiente, pero estos esfuerzos no son suficiente ya que aunque se deban tramitar licencias ambientales las cuales requieren que se haga un control de la actividad minera que se está ejecutando, con el pasar de los años vemos como se deteriora cada vez más el suelo, la baja de los caudales en los ríos y la contaminación de la fauna y flora, por esto es necesario revisar y mejorar la forma en la que se están haciendo los controles, para así poder trabajar en pro del desarrollo sostenible, la protección del medio ambiente y poder lograr todas las metas constitucionales que se propongan.

“La idea de formalizar la actividad minera consiste en que el Gobierno propone una política, la cual posibilita a las personas que dedican a la minería, que realizan esta actividad con su diploma minero y cuentan con el apoyo de organismo ambiental, obtener las competencias simples, formando a estas personas de manera teórica o práctica, cumpliendo con todos los estándares técnicos, legales y todo lo que tenga que ver con la protección del medio ambiente así como también los temas de seguridad minera en sus lugares de trabajo, esto con el fin de que las personas que se dediquen a la actividad minera estén capacitados y cuenten con la protección de los organismos, garantizando que se cumpla con lo que establece la normativa”.

“Al realizar la formalización de la minería podemos decir que está dirigida a los pequeños trabajadores de la actividad minera, es decir, aquellos que tienen títulos mineros y permisos ambientales, para aumentar la competitividad, la transparencia, mejorar el desempeño; si hablamos de la formalización ya como política de gobierno, esta compromete a todos los organismos que se encargan de la regulación y control de la actividad minera, debe ser entendida con el fin de estar en proceso de una mejora continua y debe estar dirigida a estas comunidades dedicadas a la minería y que son tradicionales, que ejecutan esta actividad minera sin tener un título de explotador, así como también para aquellas que tienen el derecho de explotación, pero la lleva a cabo sin todos sus aspectos jurídicos, técnicos, ambientales, económicos, laborales y sociales.” (Builes Arango, Araque Auzman, & Barrera Restrepo, 2017).

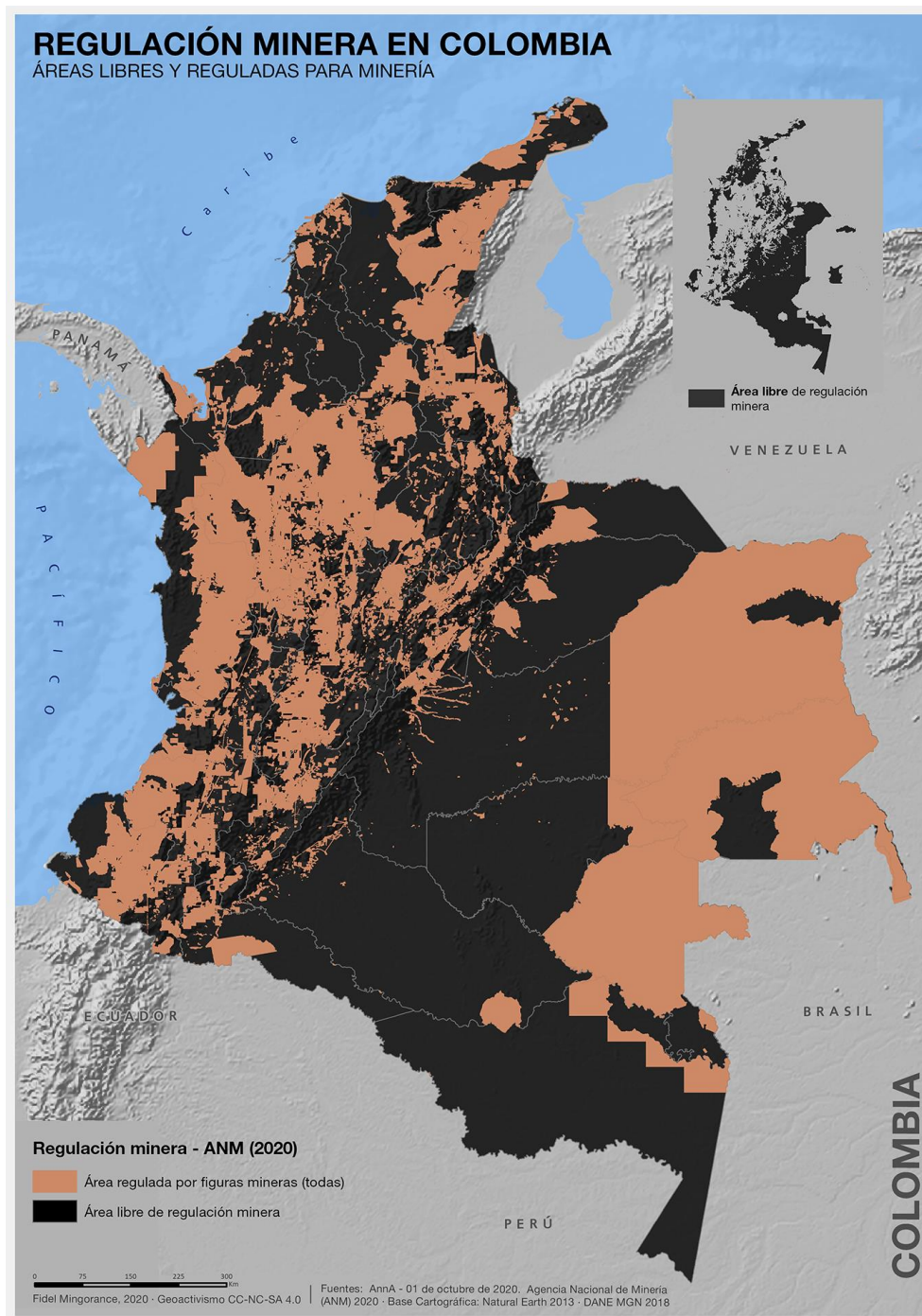


Ilustración 1. Mapa de regulación minera en Colombia. Fuente: geoactivismo (2020)

### **3.3 Ventajas de la formalización de la minería**

Los mineros informales que han formalizado sus operaciones tienen grandes ventajas. En un futuro inmediato, no importará que la autoridad competente suspenda la operación, podrá seguir operando y contar siempre con el apoyo de las autoridades; Esto significa que pueden obtener buenas entradas económicas de la actividad minera y pueden sobrevivir sin temor a que puedan ser desplazados de sus zonas por las autoridades.

También garantizar que no se trabajara con riesgo que pueda afectar la vida de los trabajadores mineros, se debe respetar toda la normativa existente en cuanto a la seguridad y protección de los ecosistemas. Otra de las ventajas es que se cuida al minero, ya que al trabajar con el soporte de tener un título, no hay lugar para la imposición de infracciones a los mineros ni policiales y ambientales. los trabajadores de minería de pleno derecho podrán recibir capacitación estatal en temas técnicos, ambientales y empresariales, lo que conducirá al eventual crecimiento de su negocio minero. Y finalmente, son reconocidos como mineros oficiales en la región y ya no son estigmatizados como delincuentes y no dejan lugar al rechazo social por parte de la gente. (Ortiz, 2014).

#### **4. CAPITULO II: CONTAMINACION POR MERCURIO EN LOS RIOS DE COLOMBIA**

Nuestro país no se queda atrás pues ocupamos el tercer lugar a nivel mundial en cuanto a contaminación por mercurio, después de China e Indonesia, hace emisiones al medio ambiente unas 75 toneladas de este metal pesado anuales, según información de la dnp así como también de diversas investigaciones, como es el caso de las ong mercury, la de mads y unudi. En particular, llama la atención el impacto sobre los recursos hídricos, esto es porque las grandes afectaciones por mercurio en los ecosistemas ocurren en las fuentes hídricas, pues con el pasar de los años el metilmercurio se va acumulando en toda la fauna acuática, con altas concentraciones y con unos niveles que van en ascenso. Es por esto, que para determinar el nivel de afectaciones por el ingreso de mercurio en las fuentes hídricas, se utiliza una medida de concentración de este metal pesado en el pescado. Según datos de la dnp y el ins, 1.150 puntos de agua en distintas zonas cuentan con la presencia de minería ilegal, específicamente de extracción de oro. De estas, cerca de 232 fuentes de agua a través de ciudades administradas centralmente han tenido casos de envenenamiento por mercurio.” (Gafner-Rojas, 2018).

El sistema de información minera de Colombia no dice que el total de la producción promedio de oro en el año 2016 en Colombia fue de alrededor de 58 tn. Los principales centros de producción de oro del país se encuentran en Guanía, Cauca, Nariño, Choco, Valle del Cauca, Tolima. Alrededor del 83% se obtuvo que la actividad minera es aluvial y el otro 17% que resta es minería particular, donde se esta presentando mas cantidad de mercurio para el procesamiento de oro es en los siguientes departamentos: en bolívar (alrededor de 30

tn), en el choco (con 195 tn) y Antioquia (con 170 tn), esto lo indica el ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. Otro de los datos, necesario para poder entender la magnitud del problema, es todo el mercurio que el país está importando actualmente, ya que Colombia no lo produce. Según algunos datos de la unidad de planeación minero-energética, entre los años 2003 y 2013 a Colombia entraron grandes cantidades de mercurio (1006 tn), es decir que por año se importaron alrededor de 91,5 toneladas, traídas desde España, México, Alemania, Holanda y Estados. La mayor parte de este metal pesado entra por los puertos de Barranquilla, Buenaventura y Cartagena por vía marítima, y por vía aérea solo ingresa el 3,7 según los registros aduaneros. (Gafner-Rojas, 2018).

En las afectaciones con mercurio al agua, el estado crítico está relacionado con concentraciones superiores a la máxima que es permitida esta es de 0,002 mg/L, según lo dice los recursos para el consumo humano y doméstico para los cuales la investigación se fundamenta en el artículo 38 de este artículo del Decreto 1594 de 1984, ahora derogado. Según muestras tomadas para la ENA 201, en el caso del mercurio fue de 10, y con base en los límites mencionados, estos niveles de metales pesados por kg de sedimento fue superado en quebradas y zonas asociadas. Los valores más importantes de mercurio se encuentran en el municipio de Marmato, Caldas, específicamente en el río Marmato, en el río Nechi, en el paso del río Magdalena en Calamar, en Palmira en el río Guachal y en Coello en el río Coello.” (Gafner-Rojas, 2018).

En 2013, la Autoridad de Control Autorizado para los temas de minas solicitó a la Fiscalía una ayuda de contención para realizar un análisis de muestras del río Cali para lograr

hacer una determinación de la concentración de mercurio debido a la actividad minera, perpetuada ilegalmente en las montañas de la zona. Revisando algunos estudios que se hicieron en el departamento las agencias ambientales, la Oficina del Contralor ha encontrado en el río Cali que los niveles de este metal son inclusive hasta 1355% más altos que el nivel legal permitido.

En el caso del río Magdalena, donde se ha seguido su comportamiento, y ha sido investigado por el Himat e Ingeominas y financiado por Colciencias. Durante sus estudios, la entidad ha constatado que durante todo su recorrido (1500 km), el río (que tiene su desembocadura en la capital del Atlántico, Barranquilla) transporta al rededor 300.000 toneladas de diferentes sedimentos que contienen partículas metálicas que se le atribuyen a mercurio, zinc, cadmio, plomo, arsénico, hierro, cobre y manganeso, teniendo en cuenta las afectaciones negativas que tiene sobre el medio ambiente y el ser humano. Según algunos estudios que ha realizado el departamento de toxicología ambiental que se encuentra en la universidad de Cartagena, se encontró que las concentraciones de metales pesados en los habitantes de la Mojana superan los estándares establecidos y se asocian con daños genotóxicos en la población. También es importante tener en cuenta que la concentración de mercurio en los peces a menudo supera la concentración de mercurio en el agua en la que viven. Algunas investigaciones de Corantioquia y que fueron realizados también por la universidad de Cartagena y la de Antioquia, en varias especies de los ríos de Antioquia que fueron contaminados, se han revelado concentraciones superiores a  $1,06\mu\text{g/g}$ , lo cual representa una cifra bastante alta si se considera que los niveles máximos permisibles para el consumo son de alrededor de  $0,2\mu\text{g/g}$  según la organización mundial de la salud. (Gafner-Rojas, 2018)

#### **4.1 fuentes y empresas que contaminan con mercurio**

El mercurio durante muchos años ha sido utilizado en diferentes procesos industriales como por ejemplo en la minería del oro, la producción de cemento, la quema de combustibles fósiles, rellenos sanitarios que generan lixiviados con mercurio que no tienen un tratamiento y terminan en los ríos y en el suelo, también en otros procesos como la producción de cloro, en la amalgama dental entre otros, todas estas fuentes llevan a que con los años la contaminación y los niveles de mercurio que se desechan vayan en considerable aumento por lo que es necesario prestar especial atención y regular estas emisiones y liberaciones de mercurio al ambiente y los ecosistemas.(ley 1892 del año 2018)

#### **4.2 LAS CAUSAS**

Una de las causas principales de la contaminación por mercurio en nuestro país, es la actividad minera que se realiza de manera ilegal, y que esta actividad es principalmente de minería aluvial d oro, estos procesos se realizan a las orillas de los ríos y consiste en mezclar el mineral húmedo, esto quiere decir el lodo de mineral mineralizado, ahí es donde se utiliza el mercurio metálico que se encuentra en estado líquido, este metal pesado disuelve el oro o la plata y los lodos restantes se lavan, esto deja una mezcla de oro-mercurio. Luego, se amalgama y se pone en calor para separar los restos de mercurio y de oro impuro. (Gafner-Rojas, 2018).

En este paso final de purificación, la amalgama de mercurio y oro de la extracción libera el mercurio en forma de vapor al aire cuando se calienta. La evaporación generalmente se realiza sin retener el mercurio evaporado. Solo algunas veces se lleva a cabo el paso de evaporación en "reactores" semicerrados, donde las porciones de mercurio se reutilizan. En cuanto a otros vehículos ambientales. El hecho de que el mercurio está presente en los desechos de las minas este puede dar paso a futuras liberaciones que se pueden dar en el aire, el agua y la tierra, pero estos casos los vemos muy a menudo, durante el proceso de lavado gran parte del mercurio utilizado para al agua, para después convertirse en metilmercurio, este es un compuesto metálico que es demasiado toxico y que se concentra en la cadena alimentaria acuática principalmente. (Gafner-Rojas, 2018).

Los daños causados por este metal pesado y otros metales es muy difícil de detectar, ya que se trata de un proceso muy costoso y difícil, y solo se puede llevar acabo por laboratorios especializados y que tengan buena experiencia. Además, las concentraciones que llegan al medio ambiente son bajas en relación a las que se encuentran en los sedimentos o en las especies de fauna y flora que podemos encontrar en dichas zonas, por eso que se hallan niveles de contaminación bajos en los cuerpos de agua, en el caso de los peces por ser especies que presentan diferentes niveles de la cadena alimenticia acuática, nos sirven para identificar los indicadores de contaminación por metales pesados, ya que estos pueden bioacumularse en gran parte de los casos con altas concentraciones de estos metales. Hablando del mercurio por ejemplo que es biocatalizado se puede decir que en su totalidad por los peces como metilmercurio, esta sustancia ingresa fácilmente al musculo y el tejido adiposo y es altamente toxica, convirtiéndolo en una cadena de metal, y un factor importantes

es que estos alimentos que vienen de los ríos son finalmente consumidos por los humanos (Mancera Rodriguez & Alvares Leon , 2006).

los microorganismos como las bacterias, pueden transformar el mercurio que se ha acumulado en los sedimentos en el fondo de las fuentes hídricas y su resultante es la condición orgánica de metilmercurio, este luego es consumido por gusanos y otros animales más pequeños, este compuesto representa la parte más toxica del mercurio en relaciona sus otras formas, ya que su solubilidad en lípidos es alta y su concentración transmembrana se distribuye por todos los órganos y se cumula en los peces finalmente en altas concentraciones. (Mancera Rodriguez & Alvares Leon , 2006).

“La minería aurífera que se hace de manera artesanal no solo tiene afectaciones por la liberación de mercurio al ecosistema y su capacidad de acumularse en los organismos, sino que también reduce significativamente la biodiversidad por su ataque letal inmediato para las poblaciones orgánicas por la remoción directa del cianuro. Esto causa toxicidad por asfixia, lo que evita que los tejidos usen oxígeno al inhibir las enzimas involucradas en la respiración celular, lo que lleva al fallecimiento. Es por esto que en la declaración de Berlín que se hizo en el año 2000 sobre la minería del oro, se estipula que “los procesos que utilizan cianuro para extraer oro son inaceptables porque causan daños irreversibles al ecosistema”. Sin embargo, no hay datos sobre su concentración en los ríos del país ni sobre los seres vivos que están presentes en estas zonas, por el contrario, el cianuro continúa siendo utilizado sin consideración alguna para la extracción de oro.” (Mancera Rodriguez & Alvares Leon , 2006).

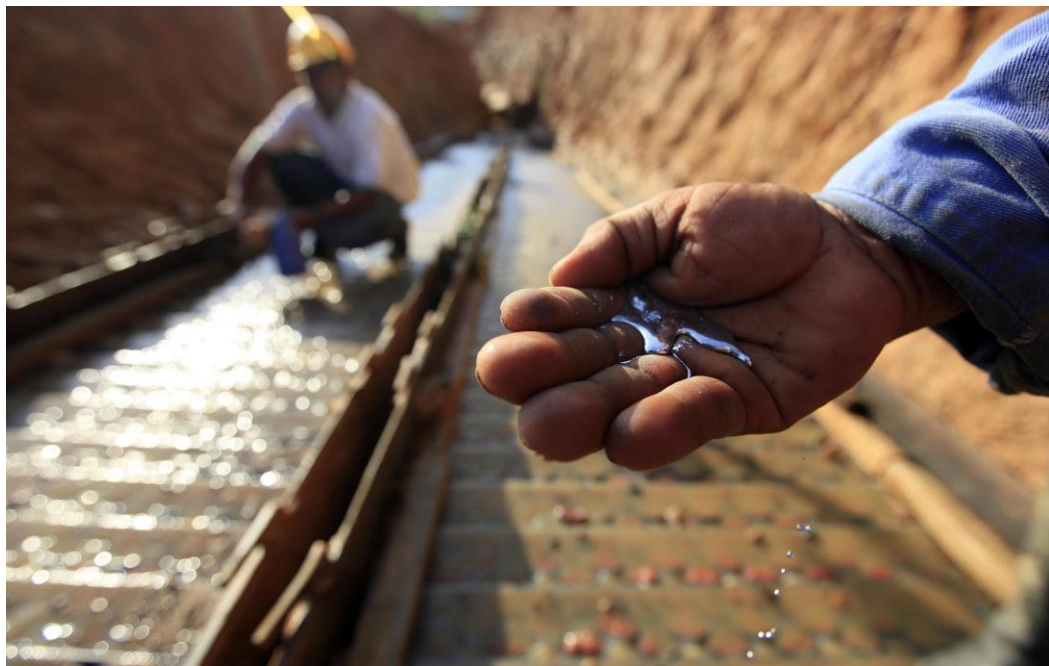


*Ilustración 2. Minería ilegal en Colombia. Fuente: eltiempo.com*

#### **4.3 Consecuencias**

Las afectaciones que se llevan con la presencia de mercurio en estas aguas son muy tóxicas. Además de la inherentemente desafortunada contaminación del agua, no se pueden ignorar una serie de resultados dañinos para los ecosistemas y la salud humana. La Corte Constitucional reconoció estos daños al pronunciarse sobre el ejercicio de protección, antes citada, este ejercicio pedía que se disminuyera el uso intensivo de este metal pesado y en grandes proporciones en la minería, teniendo en cuenta también sustancias que son altamente tóxicas como es el caso del mercurio que se encuentra en el río Atrato, incluyendo sus cuencas y afluentes. La corte tiene en consideración que estas actividades de minería ocasionan una contaminación ambiental a gran escala, atentando con el derecho a la vida, el derecho a la dignidad humana, a la alimentación sana, el derecho al agua, y el derecho a la cultura y protección del territorio de las comunidades étnicas que habitan esta zona del río Atrato. (Gafner-Rojas, 2018).

Tomando en cuenta algunos datos que nos da la organización mundial de la salud, las exposiciones a mercurio, aun estando en pequeñas cantidades, estos tambien puede tener grandes afectaciones a la salud y puede resultar peligroso para el utero en mujeres embarazadas en sus primeras etapas, es por esto que la Fundación clasifica este metal pesado entre las diez sustancias químicas o grupos de sustancias químicas que causan problemas específicos a la salud humana y a la salud pública. Es una investigación presentado por el invima en conservas de atun, se encontré que el impacto del metilmercurio en la salud humana puede afectar el sistema nerviso central y los riñones, estos daños se ven mas que todo durante el desarrollo del bebe, ya que puede afectar la barrera hematoencefalica y esto puede alterar el desarrollo cerebral en los bebes. (Gafner-Rojas, 2018).



*Ilustración 3. Mercurio y minería. Fuente: PIM (2018)*

#### **4.4 Normativa para manejo de mercurio**

Para valorar la normativa del uso y la disposición que se le esta dando al mercurio en las aguas de nuestro país, se puede analizar la ley 1658 del año 2013 y las normas que incluye hasta la fecha.

La ley 1658 del año 2013, que es conocida actualmente como la ley del mercurio, nos dice en su artículo primero, que habla de defender y proteger la salud humana, salvaguardar estos recursos naturales renovables y del medio ambiente, por lo que creó una directriz de regulación “el uso, importación, producción, venta, procesamiento, transporte, almacenamiento, disposición final y descarga ambiental de actividades industriales en todo el país que contengan mercurio, cualquiera diga de qué se trata. Al fin y al cabo, ley determinó que varios ministerios como el de minería, energía y medio ambiente, y el de desarrollo eran sostenibles, estableciendo las vías de administración necesarias para permitir la reducción y eliminación segura del agua y eliminar el uso del mercurio en diversas actividades industriales del país. (Gafner-Rojas, 2018).

Sin embargo, sabiendo que desde el punto de vista del medio ambiente de la salud pública, la contaminación en el agua por mercurio es uno de los problemas más preocupantes, cabe señalar que si bien el artículo 1 establece que se regula, junto con otros temas y efectos de la investigación, la liberación de este metal pesado al ambiente, la ley no nos dice nada del control y regulación sobre los niveles máximos y mínimos permitidos de mercurio en el agua o en el consumo humano, así como tampoco sobre los tratamientos y el proceso de recuperación de estos cuerpos de agua contaminados, u otras normas relevantes en esta norma se adhieren. Lo que la ley nos dice, cuando hablamos de la principal de lo que está provocando en los ríos la contaminación por mercurio, es el eliminar completamente el uso

de este metal, incluyendo otras actividades que se realizan en los ríos. en conclusión , la ley ordena la eliminación total del mercurio de la minería dentro de los 5 años próximos a la entrada en vigor de la ley, es decir, en 2018. (Gafner-Rojas, 2018).

Hablando ahora de los resultados que se obtuvieron 5 años después de su promulgación, se evidencian varias inconsistencias, sus insuficiencias y su falta de vigencia. Una de estas fallas es que su regla 1 esta dice sobre la regulación de las actividades industriales que incluyen el uso de mercurio “cualesquiera que sean”. Con base en esta última afirmación, se debe entender que la moape debe estar incluido en estas actividades, sin embargo en su artículo tercero distingue entre los procesos de fabricación y los procesos industriales. En cuanto al uso de remoción de mercurio. se ordenó el plazo de diez años - contados a partir de la fecha de extracción - donde se determinó que la eliminación del uso del mercurio se lograría dentro de los cinco años siguientes a la entrada en vigor de la ley-. Por lo tanto, la redacción del artículo 1 debería también incluir la precisión del alcance de la regla para así poder evitar inconsistencias futuras. (Gafner-Rojas, 2018).

el decreto 1421 del año 2016 en el que se reforman determinadas las normas de las minería y las normas ambientales, en su artículo sexto nos dice que se debe adicionar un cuarto párrafo en el artículo 2.2.2.3.1.11.1 del decreto 1076 del año 2015, este nos dice que: “Para poder concretar y desarrollar obras y acciones relacionadas con la minería aurífera se requieren un permiso ambiental apropiado de la autoridad reguladora ambiental correspondiente.” Es por esto, que se hace mención en que estas licencias que se dan para esta práctica deben ser lo más rigurosas posible y las condiciones de licencia para el uso de medios que pueden contener mercurio u otras sustancias que son nocivas para la salud y al medio ambiente.” (Gafner-Rojas, 2018).

Además de los requisitos reglamentarios en esta área, es importante destacar la adopción del PUNM (plan único nacional del mercurio) que se hizo en el 2014 en el Departamento de Medio Ambiente, Industria y Ciudades del Mads, que contiene metas generales y específicas para la acción estatal. Relacionados con el uso doméstico del mercurio, cuando se habla de la política pública, educación, concientización e investigación, así como en temas económicos y sectoriales. Si bien las metas no se plantean en términos de objetivos medibles, se enfatiza la importancia de los temas, las actividades que se suelen plantear para poder alcanzar estas metas, y en todos estos aspectos de la planificación, el agua ha ocupado un lugar destacado. (Gafner-Rojas, 2018).

En este plan único del mercurio que se realizó también incluía una serie de tareas en diferentes ámbitos que se deben llevar a cabo, algunas de estas tareas son saber con exactitud todo el proceso que se está llevando a cabo con el mercurio como en su importación, producción, comercialización, uso y manejo, también fortalecer la vigilancia para sí poder obtener un control en cuanto a los productos que contenga, emitan y liberen mercurio.

#### **4.4.1 Límites permitidos en aguas contaminadas por mercurio**

Con la **resolución 0631** que se hizo en el año 2015, se dio el desarrollo en el **decreto 3930** del año 2010 de su artículo 18, esta resolución permite llevar control y vigilancia de las sustancias tóxicas que terminan en los cuerpos de agua, este control se realiza con la medición de la concentración de todas las sustancias que afectan la calidad del agua, en el caso del mercurio para las aguas residuales no domésticas en sus vertimientos puntuales, el valor límite máximo permisible se fijó en 0,002 microgramos por litro.

El ministerio de protección social mediante la resolución 2115 del año 2007 en donde dictamina el control y las características fisicoquímicas y de calidad para las aguas que son aptas para el consumo humano, hace énfasis en que se debe llevar un control estricto de las sustancias contaminantes para estas aguas ya que pueden ocasionar afectaciones a la salud humana, para el caso del mercurio este máximo permisible se fijó en 0,001microgramos por litro para las aguas aptas para el consumo humano. (Gafner-Rojas, 2018)

## **5. CAPITULO III: TRATAMIENTOS CONVENCIONALES Y AVANZADOS PARA AGUAS CONTAMINADAS CON MERCURIO**

### **5.1 Tecnologías convencionales**

La búsqueda de técnicas y tratamientos que permitan que se eliminen estos compuestos tóxicos de las aguas de manera eficaz, para así poder lograr cumplir con todos los estándares sanitarios, para el caso de eliminación de metales pesados como el mercurio entre otros, se han aplicado algunas tecnologías como lo son:

#### **5.1.1 Precipitación química**

Esta es una de las técnicas que ha sido más utilizada en la eliminación de metales pesados ya que es una tecnología sencilla y que tiene un bajo costo, esta consiste en precipitar especies metálicas para variar el PH del medio, así queda como resultado un lodo que se encuentra cargado con el metal, este lodo después se puede separar por medio de los procesos de sedimentación o filtración. La formación de un sulfuro o un hidróxido son las precipitaciones más utilizadas, esta tecnología tiene una desventaja y es que a pesar que se logra reducir la concentración de metales pesados no siempre se llega a los niveles mínimos requeridos. (Carro de Diego,2012)

### **5.1.2 Intercambio iónico**

Esta técnica presenta una cinética veloz y una gran capacidad de tratamiento de residuos, pero casi no es muy utilizada ya que tiene unos costos muy altos, estos intercambios por lo general se realizan con sustancias granulares cuyos componentes moleculares son radicales ácidos o básicos, que pueden hacer un intercambio de los iones negativos o positivos por iones del mismo signo que estén en la sustancia de contacto, los mas comunes son los grupos acido carboxílico y los grupos de ácido sulfónico. (Carro de Diego,2012)

### **5.1.3 Filtración con membrana**

Se ha demostrado que dependiendo del tipo de membrana estas tienen gran capacidad de retención de metales pesados, esta técnica tiene una ventaja y es que requiere de un espacio pequeño y es muy fácil de operar, la osmosis inversa, la nanofiltración, la ultrafiltración, hacen parte de la filtración por membrana. La desventaja que presenta esta técnica es que depende mucho de la sensibilidad de la membrana y que en algunos casos sus costos pueden ser elevados. (Carro de Diego,2012)

## **5.2 ADSORCIÓN**

Para la eliminación de compuestos que contaminan las aguas residuales esta técnica se ha utilizado muchas veces, esto quiere decir que entre dos fases que pueden ser sólida y líquida o gaseosa y sólida se acumula una sustancia, principalmente utilizando la capacidad de ciertos materiales de retener partículas en la superficie, esta técnica es muy viable ya que nos permite que en algunos casos sea reversible a través de un proceso de desorción adecuado. Todo el proceso depende de algunos factores como lo son los parámetros

fisicoquímicos del medio, la temperatura, la superficie del material que se utilice, el PH etc. así como también las características de interacción entre el absorbente y el compuesto. El absorbente más utilizado es el carbón activo ya que tiene una gran capacidad de retener casi todos los compuestos orgánicos. (Carro de Diego,2012)

### **5.2.1 Bioadsorcion**

Para esta técnica se realiza la eliminación de compuestos contaminantes utilizando diferentes tipos que se encuentren de biomasa muerta y esta actúa mediante unos procesos no metabólicos, este tipo se basa principalmente en el adsorbente, la gran ventaja que tiene esta tecnología es su gran capacidad de eliminar compuestos contaminantes y el uso de adsorbentes compuestos de materiales de bajo costo, también que se facilita su manipulación ya que no requiere de organismos vivos, este proceso puede ser reversible ya que permite que se pueda recuperar el material utilizado y así poder disminuir los residuos como lodos cargados de contaminantes. (Carro de Diego,2012)

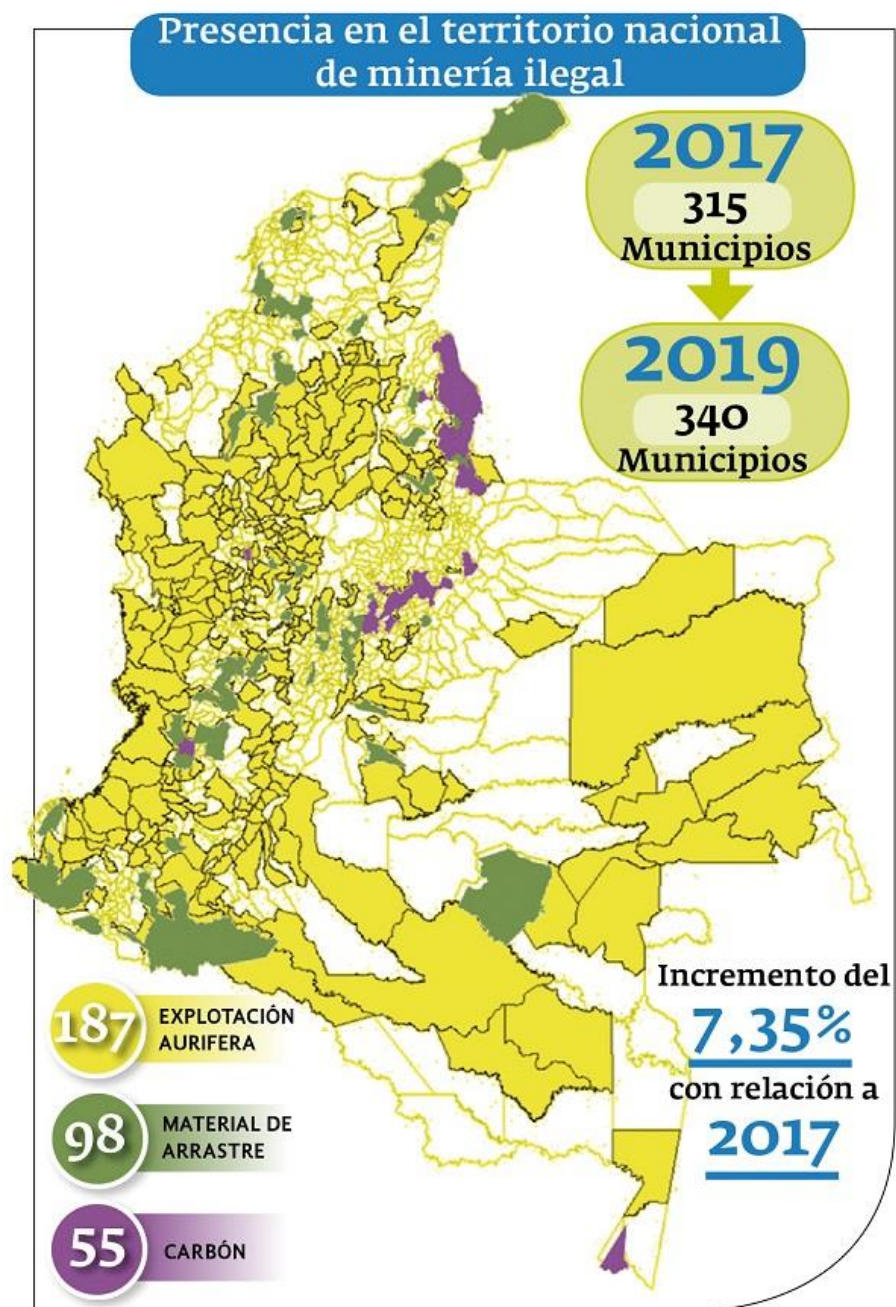


Ilustración 4. Mapa de minería ilegal en Colombia. Fuente: el mundo (2020)

## **6. CAPITULO IV: AFECTACIONES A LA SALUD HUMANA DE LA CONTAMINACIÓN POR MERCURIO**

Tras el llamado convenio de Minamata que se realizó en el año 2013 pretendía salvaguardar la salud humana junto a los ecosistemas de las emanaciones y emanaciones antropogénicas de mercurio y los compuestos del mismo. El documento legalmente vinculante entrará en vigor tras la ratificación de 50 países, invitando así a la realización de un diagnóstico en busca de proteger a las personas que son particularmente vulnerables a las exposiciones del mercurio centrándose en la necesidad de establecer servicios de salud efectivos. (Cancillería de Colombia, 2017).

Según el Ministerio de Salud y Protección Social (2018), mencionan en el Plan nacional de desarrollo, en el marco de la estrategia de crecimiento verde, en la meta de disminución de estas emisiones de mercurio en la explotación Aurífera Artesanal y de Pequeña Escala que se acompañara el desarrollo de Unidades de Producción Minera (UPM) incrementando la competencia mediante el desarrollo N° 1658 de 2013 formalizar el proceso de intervención para la transformación tecnológica del sector reduciendo los impactos ambientales y de salud asociados al uso de mercurio, en el marco previsto por la ley, implementando un proceso para controlar la comercialización de mercurio.

En el plan que se hace decenalmente en salud pública, con la vista puesta en la dimensión prioritaria de salud ambiental, sección, hábitat saludable, se pretende priorizar entidades territoriales en el 2017 con base en temas de salud ambiental en relación con los químicos, minería, exposición al elemento químico y otros procesos, monitoreando su consumación para un enfoque integral en los determinantes ambientales de la salud (Ministerio de salud y protección social, 2018).

Colombia no es un país que ignore los problemas que representa la minería artesanal, en el 2013 se encontró que el 87% de las minas no cuentan con los derechos mineros, solo el 3% tiene permisos ambientales; el personal trabajador minero prefiere usar mercurio considerándolo la forma más fácil y rápida de llevar a cabo sus actividades laborales además del método mas económico. (Olivero, Caballero & Marrugo, 2011).

En tal sentido, la minería a través del uso o remoción de suelo, conlleva a la exhibición de diversos químicos que pueden afectar la salud poblacional en factores como la dosis (cantidad), duración (cuanto tiempo) y el modo de ostentación a la sustancia determinan el nivel de exposición y los efectos sobre la salud. (ATSDR, 2005).

Asimismo, el mercurio es un metal pesado que se encuentra en medio de la naturaleza, siendo el único metal líquido a temperatura y presión ambiente, presentado como líquido blanco, plateado, volátil y puede existir en la atmosfera por periodos prolongados. Cuando es liberado en el aire se transporta a largas distancias, favoreciendo su reserva incluso en áreas no mineras; también puede provenir de zonas con actividad volcánica, la erosión de las rocas o la actividad humana, siendo ésta última la trascendental fuente de emisión de mercurio. Finalmente, el mercurio se puede acumular en cuerpos de agua por la acción de las bacterias, convirtiéndose en la forma orgánica mas toxica, el metilmercurio puede acumularse en los tejidos de peces, moluscos y crustáceos. (Ministerio de salud y protección social, 2018).

Cada uno de los efectos presentes en la salud humana están mediados por la especie de mercurio. Por ello, se describen los principales efectos ocasionados por mercurio elemental y metilmercurio:

## **6.1 Mercurio elemental**

- Efectos ocasionados en el sistema nerviosos central

Este tipo de mercurio metálico puede producir alteraciones neurológicas desbordando temblores, eretismo, inestabilidad emocional, insomnio, deterioro y perdida de memoria, polineuropatía, alteración en pruebas neuroconductuales (Calao, C & Marrugo, J. 2015).

- Efectos en el sistema renal

Las concentraciones elevadas de mercurio en sangre se pueden asociar la alteración sobre el glomérulo, siendo el generador de proteinuria macroscópica, hematuria, oliguria y enfermedad renal aguda. (Ministerio de Salud y Protección social, 2018).

- Efectos generados a nivel cardiovascular

Al obtener dosis excelsas de mercurio elemental se producen consecuencias asociadas con la elevación de la presión arterial, frecuencia cardiaca y palpitaciones. (Cortessis, 2012).

- Efectos producidos a nivel cutáneo

Se ha podido documentar dermatitis de contacto en origen laboral y accidental; la “enfermedad rosada” acrodinia siendo lesiones musculares confluentes rosadas en la piel ubicada en manos y pies, pueden estar acompañados de zonas con hiper o hipoestesia. (Olivero-Verbel, Carranza-Lopez & Caballero-Gallardo, 2016).

- Efectos derivados en el sistema respiratorio

Las exposiciones agudas a vapores de mercurio en altas concentraciones son generadores de tos o dificultades respiratoria llegando a enfermedades complejas como lo es la neumonitis, edema pulmonar, e incluso fallas respiratorias. (Ministerio de Salud y Protección Social, 2018).

## **6.2 Mercurio orgánico**

El metilmercurio es considerado la forma más común de mercurio orgánico tanto en agua como en suelo. Manteniendo la propiedad de bioacumularse en la cadena alimentaria marítima, demostrando altas concentraciones sobre peces y mamíferos depredadores. Esta vía de exposición es significativa en poblaciones cuya seguridad alimentaria tiene dependencia en los productos marinos y fluviales. (Cortessis, 2012).

- Efectos sobre el sistema nervioso

Las afectaciones por metilmercurio son evidenciadas de dos formas: aguda y crónica. Las revelaciones pueden variar según la dosis, de manera aguda se evidencia visión borrosa,

hipoacusia, modificaciones en el gusto y olfato, ataxia, torpeza de las manos, trastornos gastrointestinales, cambios mentales y auditivos. Los bebés nacidos de madres expuestas al metilmercurio tendrán cambios entre la corteza cerebral debido a la fuerte neurotoxicidad del metilmercurio en el cerebro, especialmente si se encuentra en desarrollo. (Ministerio de Salud y Protección social, 2018).

El metilmercurio tiene la capacidad de atravesar barreras placentarias hematoencefálica, conduciendo a un posible retraso mental, desarrollo ineficiente del lenguaje, parálisis cerebral, deterioro del desarrollo de las extremidades. Los hijos de madres expuestas a las altas dosis de  $\text{HeHg}$  han presentado enfermedad cortical espongiiforme, que se manifiesta por cambios psicomotores, discapacidad intelectual y posibles trastornos de la personalidad y convulsiones. En casos severos se observan discinesias y mutaciones. (Ministerio de salud y protección social, 2018).

- Efectos Cardiovasculares:

La exposición crónica al metilmercurio se asocia con mayores riesgos de infartos agudos en el miocardio y enfermedad cerebrovascular debido a la alteración de la función de endotelio. Por otro lado, se ha podido demostrar que se atenúan los efectos cardioprotectores de los ácidos grasos en omega 3 y 5 en la dieta de pescado. Varios estudios en las poblaciones aledañas a la Amazonia han demostrado que la acumulación de mercurio en el cabello superior a  $1\mu\text{g/g}$  está asociado con un aumento de presión arterial sistólica. (Ministerio de Salud y protección social, 2018).

- Efectos inmunológicos:

Se ha evidenciado que el metilmercurio se puede establecer como un factor en el progreso de enfermedades autoinmunes de la exacerbación de enfermedades infecciosas. Se ha encontrado un numeroso aumento en la prevalencia de anticuerpos antinucleares en las poblaciones expuestas al mercurio desbordante de la minería en el río Amazonas; además, se ha hallado interacción positiva en referencia al cuadro clínico de malaria maligna. (Ministerio de salud y protección social, 2018).

En medio de las investigaciones se pudo indicar que los niños son mas sensibles al mercurio que los adultos. Pues el mercurio en el cuerpo de la madre se traspasa al feto, donde puede concentrarse. También es posible una transmisión a un bebé a través de la leche materna. Los efectos dañinos de esta sustancia denominada mercurio que pueden ser traspasados de madre a feto incluyen daño cerebral, retraso mental, pérdida de coordinación, cegueras, convulsiones e incapacidad para hablar. Los niños que presentan envenenamiento por dicha sustancia- mercurio, pueden desarrollar problemas en su sistema nervioso central, sistema digestivo y daños renales. (Ministerio de Salud y Protección Social, 2018).

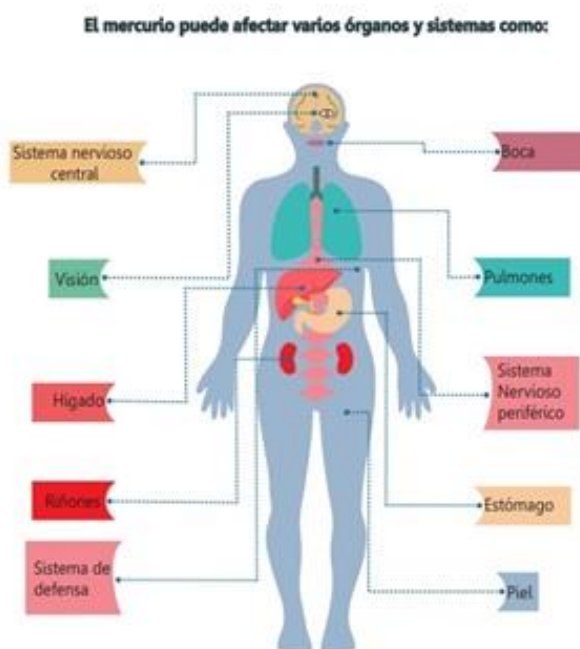


Ilustración 5. Efectos del mercurio en la salud humana. Fuente: servindi.org (2016)

## **7. CONCLUSIONES**

- Con la contaminación de los ríos de Colombia por el mercurio que se usa principalmente en la minería de oro aluvial, esta actividad hace necesario que se tenga una mayor exigencia en la legislación y la normativa, ya que a pesar de adoptar normas dedicadas al tema, el problema solo ha empeorado es importante fortalecer la regulación de estas actividades tanto legales como ilegales que usan mercurio y hacerse cargo de los daños ya causados a los ecosistemas.
- Se debe prestar especial atención a las afectaciones que el uso de mercurio ha traído a la salud y la vida de las personas que son afectadas directa e indirectamente por esta actividad, es necesario hacer seguimientos, censos, para así saber hasta qué punto se está afectando la calidad de vida de estas poblaciones y qué medidas se deben tomar para disminuir y prevenir estos daños.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. (ATSDR). 2005. *Reseña Toxicológica del Arsénico* (versión para comentario público) (en inglés). Atlanta, GA: Departamento de Salud y Servicios Humanos de EE. UU., Servicio de Salud Pública.

BUILES, T. ARAQUE, F. BARRERA, J. (2017). *Perspectivas jurídicas para la formalización minera en Colombia*. Institución Universitaria de Envigado, Envigado.

Cancillería de Colombia. Colombia ratifica su compromiso con hacer del mercurio una historia [Internet]. 2017. Disponible en: <http://www.cancilleria.gov.co/en/newsroom/news/2017-09-26/17559>.

Carro de Diego, L. (2012) “*eliminación de mercurio de fuentes acuosas con materiales de bajo coste: proceso combinado de bioadsorción - reducción*. [Tesis de doctorado, Universidad Da Coruña]. Obtenido de <https://core.ac.uk/download/pdf/61906228.pdf>

Clelia Rosa Calao, José Luis Marrugo. *Efectos genotóxicos en población humana asociados a metales pesados en la región de La Mojana, Colombia*. Biomédica [Internet].

2015;35(Supl 2):139-51. Disponible en:  
<https://www.revistabiomedica.org/index.php/biomedica/article/view/2392/2812>.

Cortessis, V. K., Thomas, D. C., Levine, A. J., Breton, C. V., Mack, T. M., Siegmund, K. D., Haile, R. W., & Laird, P. W. (2012). *Environmental epigenetics: prospects for studying epigenetic mediation of exposure-response relationships*. Human genetics, 131(10), 1565–1589. <https://doi.org/10.1007/s00439-012-1189-8>.

Gafner-Rojas, C. M. (2018). *La contaminación hídrica por mercurio y su manejo en el derecho colombiano*. Tratado de derecho de aguas. En: Tomo I: derecho de aguas colombiano para el siglo XXI. Bogotá D.C, Universidad Externado de Colombia (pp. 493-526).

Ley 1892 de 2018. “*por medio del cual se aprueba el (convenio de minamata sobre el mercurio) hecho en Kunamoto - Japón el 10 de octubre de 2013*” 11 de mayo de 2018. D.O. No 50.590. Obtenido de <https://dapre.presidencia.gov.co/normativa/normativa/LEY%201892%20DEL%2011%20DE%20MAYO%20DE%202018.pdf>

LONDOÑO, Hernando León, BEDOYA, Maria Rocio y Lizeth Alejandra PARRA. *"Marmato: derecho "desde abajo" y otras resistencias"*. En Maria Rocio BEDOYA (Ed.), *Marmato: disputa por el oro y el territorio* (pp. 129 - 169). Bogotá: Ediciones desde abajo, 2017.

MANCERA-RODRÍGUEZ, NÉSTOR JAVIER, & ÁLVAREZ-LEÓN, RICARDO. (2006). *estado del conocimiento de las concentraciones de mercurio y otros metales pesados en peces dulceacuícolas de colombia*. Acta Biológica Colombiana, 11(1), 3-23. Retrieved June 06, 2022, obtenido de [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0120-548X2006000100001&lng=en&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-548X2006000100001&lng=en&tlng=es).

Ministerio de Salud y protección social. (2018). *“Evaluación del grado de contaminación por mercurio y otras sustancias tóxicas, y su afectación en la salud humana en las poblaciones de la cuenca del rio Atrato, como consecuencia de las actividades de minería”*. Protocolo elaborado por entidades del sector salud para dar respuesta a lo establecido por la Sentencia T622 de 2016. <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/VS/PP/SA/protocolo-sentencia-t622-vcolciencias.pdf>

Olivero-Verbel, J., Caballero-Gallardo, K., & Marrugo Negrete, J. (2011). *Relationship between localization of gold mining areas and hair mercury levels in people*

*from Bolivar, north of Colombia*. Biological trace element research, 144(1-3), 118–132.  
<https://doi.org/10.1007/s12011-011-9046-5>.

Olivero-Verbel, J., Carranza-Lopez, L., Caballero-Gallardo, K., Ripoll-Arboleda, A., & Muñoz-Sosa, D. (2016). *Human exposure and risk assessment associated with mercury pollution in the Caqueta River, Colombian Amazon*. Environmental science and pollution research international, 23(20), 20761–20771. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7255-3>.

Ortiz, A. (2014). *Manual de Derecho Minero*. Bogotá: Universidad Externado de Colombia.