



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# **Manejo del agua en la minería artesanal y de pequeña escala de oro en el municipio de Segovia Antioquia**

**Talía Helena Espinosa Pujol**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Minas, Departamento de Materiales y Minerales  
Medellín, Colombia

2021

# **Manejo del agua en la minería artesanal y de pequeña escala de oro en el municipio de Segovia Antioquia**

**Talía Helena Espinosa Pujol**

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:

**Magister en Ingeniería de Recursos Minerales**

Director:

Título PhD., Oscar Jaime Restrepo Baena

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de Materiales y Minerales

Medellín, Colombia

2021

*La transformación del mundo se basa en la coexistencia del hombre y sus recursos naturales, el agua debe ser conservada como fuente principal para el desarrollo sostenible.*

*Talía Espinosa*

## **Declaración de obra original**

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.

Talía Helena Espinosa Pujol

27/09/2021

# Agradecimientos

En primer lugar, deseo expresar mis agradecimientos al director de este trabajo final de maestría Dr. Oscar Jaime Restrepo Baena, por su dedicación y apoyo que ha brindado a este trabajo, por el respeto a mis sugerencias e ideas y por la dirección y el rigor que ha facilitado a las mismas.

Asimismo, agradezco a mis compañeros del Departamento de Materiales y Minerales, con quien he compartido proyectos e ilusiones durante estos años.

Gracias a mi familia, a mis padres y hermanos, y en especial a mi hijo Jerónimo, porque con ellos compartí una infancia feliz con los mejores años de mi vida, que guardo en el recuerdo y es un aliento para seguir adelante.

A todos, muchas gracias.

## Resumen

### **Manejo del agua de la minería artesanal y de pequeña escala de oro en el municipio de Segovia Antioquia.**

Un buen manejo del agua en el beneficio del oro en las (MAPE), podrían solucionar gran parte del estrés hídrico que se presenta en las localidades mineras, pues se estima según la (OCDE, 2015c)., que para el año 2050, 240 millones de personas en el mundo sigan sin acceso al agua potable. Brasil, Colombia y Perú figuran entre los diez países más ricos en agua, pero afrontan paradójicamente sequía, estrés hídrico y contaminación por mercurio en sus fuentes hídricas (Global Water Partnership 2021). De acuerdo al Convenio de Minamata, el gobierno colombiano espera convertirse en un país libre de mercurio en el 2023. Para ello es necesario conocer el manejo de la MAPE en las fuentes hídricas y las posibles soluciones por el uso de sustancias químicas como el mercurio. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo fue identificar el estado de las fuentes hídricas intervenidas en Segovia Antioquia, e informar sobre algunas soluciones de investigaciones realizadas por expertos y entes gubernamentales en la materia.

**Palabras clave:** MAPE, recurso hídrico, mercurio, beneficio de oro, huella hídrica.

# **Abstract**

## **Water management of artisanal and small-scale gold mining in the municipality of Segovia Antioquia**

Good water management for the benefit of gold in the (ASM), could solve a large part of the water stress that occurs in mining localities, since it is estimated according to the (OECD, 2015c)., That by the year 2050, 240 million of people in the world continue without access to clean water. Brazil, Colombia and Peru are among the ten countries richest in water, but paradoxically face drought, water stress and mercury contamination in their water sources (Global Water Partnership 2021). According to the Minamata Agreement, the Colombian government expects to become a mercury-free country in 2023. For this, it is necessary to know the management of ASM in water sources and the possible solutions for the use of chemical substances such as mercury. Therefore, the objective of this work was to identify the state of the water sources that intervened in Segovia Antioquia, and to report on some research solutions carried out by experts and government entities in the field.

Keywords: ASM, water resource, mercury, gold benefit, water footprint.

# Contenido

	Pág.
<b>Resumen .....</b>	<b>VII</b>
<b>Introducción .....</b>	<b>1</b>
<b>1. Oferta hídrica y régimen hidrológico .....</b>	<b>7</b>
1.1 Oferta hídrica y régimen hidrológico en la Cuenca de la Cianurada .....	7
1.2 Demanda de la Cuenca la Cianurada.....	13
1.3 Indicadores hídricos .....	15
<b>2. Manejo del Recurso Hídrico .....</b>	<b>21</b>
2.1 Uso de sustancias químicas.....	21
2.2 Metodologías utilizadas para el beneficio del oro .....	25
<b>3. Relación del medio ambiente y la MAPE .....</b>	<b>31</b>
3.1 Enfoque del Medio Ambiente y los grupos de interés.....	31
3.2 Usos actuales del agua en la cuenca de La Cianurada .....	37
3.3 Políticas Públicas Ambientales relacionadas con el uso y manejo del agua. ....	44
3.4 Impacto sobre el agua de la Minería Artesanal y de Pequeña Escala en Segovia. 50	
3.4.1 Calidad del agua.....	50
3.4.2 Monitoreo, protocolos y procedimientos de calidad del agua .....	51
3.4.3 Estimación de la Huella Hídrica en Segovia.....	55
<b>4. Tecnologías limpias para implementar en la MAPE.....</b>	<b>57</b>
<b>5. Conclusiones y recomendaciones.....</b>	<b>63</b>
5.1 Conclusiones.....	63
5.2 Recomendaciones.....	65

# Lista de figuras

Pág.

<b>Figura 1-1.</b> Clasificación cuerpos de agua Cuenca de la quebrada La Cianurada.....	8
<b>Figura 1-2:</b> Zonificación hidrográfica de Colombia, visualización del área hidrográfica Magdalena-Cauca IDEAM, IGAC 2013. ....	9
<b>Figura 1-3:</b> Ubicación de puntos de análisis de la cuenca de la quebrada La Cianurada. ....	11
<b>Figura 1-4.</b> Balance Hídrico cuenca la Cianurada. ....	13
<b>Figura 1-5.</b> Sistema de indicadores hídricos modificados del ENA 2018. ....	15
<b>Figura 1-6.</b> IUA en condiciones secas. ....	17
<b>Figura 1-7.</b> Riesgo asociado a la disponibilidad del recurso hídrico.....	18
<b>Figura 1-8.</b> Balance Nacional del Agua. ....	20
<b>Figura 2-1.</b> Esquema utilizado para el beneficio de oro con mercurio.....	22
<b>Figura 2-2.</b> Esquema de amalgamación en cocos y cianuración por agitación. ....	26
<b>Figura 2-3.</b> Esquema de flujo combinado con concentración gravimétrica, amalgamación en cocos y cianuración por agitación. ....	27
<b>Figura 2-4.</b> Diagrama de flujo para el procesamiento integral de minerales de oro. ....	28
<b>Figura 2-5.</b> Extracción del oro en entables, municipio de Segovia.....	29
<b>Figura 3-1.</b> Ciclo dinámico del mercurio en el medio ambiente modificado de Ruiz (2013). ....	32
<b>Figura 3-2.</b> Nivel de madurez de la gestión ambiental. ....	33
<b>Figura 3-3.</b> Revisión de la gestión ambiental aplicada en la minería aurífera MAPE a nivel mundial. ....	35
<b>Figura 3-4.</b> Métodos de tratamiento de aguas contaminadas con Hg en fase experimental. ....	36
<b>Figura 3-5.</b> Identificación de los usos potenciales en la cuenca La Cianurada. ....	37
<b>Figura 3-6.</b> Tramos de análisis por el uso del recurso hídrico.....	38
<b>Figura 3-7.</b> Red de monitoreo básica en la quebrada la Cianurada (ODC).....	39
<b>Figura 3-8.</b> Mapa de sitios de monitoreo de calidad del agua.....	40
<b>Figura 3-9.</b> Índice de calidad del agua (ICA), Quebrada la Cianurada. ....	42
<b>Figura 3-10.</b> Conflictos por el uso del agua en la cuenca La Cianurada. ....	43

---

Figura 3-11. Actores estratégicos para resolver los conflictos por el uso del agua, IDEAM 2021. ....	43
Figura 3-12. Sistema de información ambiental de Colombia “SIAC”. ....	47
<b>Figura 3-13.</b> Visión general de los principios de gobernanza del agua de la OCDE, 2015. ....	49
<b>Figura 4-1.</b> Circuito de producción de oro sin mercurio, propuesto por el CIMEX Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. ....	58
<b>Figura 4-2.</b> Diagrama de flujo de la planta de beneficio sugerida para la zona minera de Remedios (Antioquia). ....	59
<b>Figura 4-3.</b> Propuesta de proceso de innovación de Co- Existencia .....	61

# Lista de tablas

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1-1.</b> Relación del balance hídrico PORH 2014, cuenca La Cianurada.....	12
<b>Tabla 1-2.</b> Caudal Total (m <sup>3</sup> /año) reportado según PORH 2014. ....	14
<b>Tabla 2-1.</b> Cantidades de mercurio en Colombia utilizadas de acuerdo al tipo de establecimiento de beneficio mineral. ....	23
<b>Tabla 2-2.</b> Estimativo de mercurio no recuperado en Antioquia. ....	24

# Introducción

El agua es un elemento vital para la existencia de los seres humanos y para el bienestar de los ecosistemas, razón suficiente para estudiar el manejo y uso de las fuentes hídricas utilizadas por la actividad minera de oro en Antioquia.

Datos arrojados por (UN-Water, 2021) demuestran que más de 3.000 millones de personas a nivel mundial están en riesgo por no conocer la calidad del agua de sus ríos, lagos y aguas subterráneas. Históricamente, se han reunido pocos datos sobre el estado global de los ecosistemas de agua dulce. Los investigadores estudiaron más de 75.000 cuerpos de agua en 89 países y encontraron que más del 40% estaban gravemente contaminados. Una quinta parte de las cuencas hidrográficas del mundo están experimentando fluctuaciones dramáticas en la disponibilidad de agua y 2.300 millones de personas viven en países que padecen “estrés hídrico”, incluidos 721 millones en áreas donde la situación del agua es “crítica”, según una investigación reciente llevada a cabo por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y sus aliados.

La minería de oro artesanal y de pequeña escala (MAPE), se ha desarrollado alrededor del mundo, como mecanismo económico de subsistencia para muchas familias campesinas y oriundas de sus territorios. Según (Rueda, 2020), la coyuntura del covid-19, que ha generado un decrecimiento económico, ha aumentado la demanda de esta actividad en las MAPE, el oro tiene a favor que retiene o incrementa su precio en tiempos de turbulencia económica según (FIP 2020) “El precio ha tenido un incremento de 12% entre enero y abril, pasando de USD\$1.519 a \$1.715. En el nordeste antioqueño ha sido tal el incremento de la extracción, que las juntas de acción comunal de algunos municipios han tenido que reunirse para tomar decisiones encaminadas a controlar el fenómeno.

Como se mencionó anteriormente, la MAPE se ha venido incrementando y con ella el uso de sustancias peligrosas en los procesos de beneficio del oro. Esto trae consigo, una alta preocupación por el deterioro del recurso hídrico, debido a la alta toxicidad de los mismos en los seres vivos.

El agua en minería, es un recurso natural utilizado en los procesos para el beneficio de diferentes minerales, como es el caso del oro. El uso del agua se da en varios procesos que hacen parte del beneficio del mineral, como lo son la lixiviación, flotación y amalgamación (prohibida actualmente en Colombia) donde se usan diversos agentes químicos que pueden afectar la calidad del recurso hídrico, incorporando metales pesados como el mercurio y otras sustancias. En la actualidad, la MAPE carece de información técnica y de la innovación tecnológica para desarrollar los procesos de tratamientos y el buen manejo de aguas derivadas de sus procesos de beneficio.

En el caso de la MAPE, aunque tengan dentro de sus procesos la recirculación del agua, se encuentran aun utilizando mercurio para el beneficio del oro, práctica técnicamente llamada amalgamación; el mercurio entra en contacto con el oro libre, formando la amalgama (aleación oro – mercurio), como consecuencia de estas prácticas se han realizado mediciones por parte de la autoridad ambiental, sobre las fuentes hídricas donde realizan sus vertimientos, los cuales arrojan concentraciones de mercurio por fuera de los límites permisibles exigidos por la legislación colombiana.

Dentro de la Comunidad Minera Segoviana a través de su tradicionalidad se le llama “entables” a las plantas de beneficio del oro, en los cuales los mineros del Municipio llevan sus minerales para ser beneficiados.

De acuerdo a (M. Veiga, 2010) donde reporta que “en promedio, 48 toneladas de Hg/a probablemente ha sido la cantidad de mercurio liberada al medioambiente (aire y agua)”. Es de vital interés conocer el manejo y uso de los recursos hídricos utilizados en la MAPE de Segovia, resaltando que es uno de los municipios con mayor comunidad minera en el Departamento de Antioquia.

Se plantea en este trabajo, analizar el manejo y uso del recurso hídrico, además de revisar los estudios ya realizados, como estrategias limpias en la sustitución o disminución del

mercurio, con el fin de aunar esfuerzos en el cumplimiento del Convenio de Minamata, reafirmado por el estado colombiano. Esto con la finalidad, de construir un camino hacia una minería bien hecha dentro del departamento de Antioquia, libre de mercurio y sustancias que desmejoran la calidad del agua, además de contribuir al crecimiento de la economía rural.

Este estudio se enfoca, en analizar el manejo y uso que se le ha dado a la fuente hídrica de la cuenca La Cianurada correspondiente al municipio de Segovia, Antioquia, además de ello en realizar una revisión bibliográfica de las diferentes alternativas de solución que se han generado a través de los años para el reemplazo del mercurio, como son las mejoras en los procesos hidrometalúrgicos para el beneficio del oro, esto, tomando como base de estudio los entables o plantas de beneficio. Aunque se reconocen las políticas sobre la no utilización del mercurio dentro de los territorios de la minería de oro MAPE, debido a las condiciones socioeconómicas en que se encuentran las comunidades y a la falta de oportunidades, muchas familias se ven en la necesidad de realizar este tipo de actividad, pues por tradición, es su único medio de subsistencia, es de conocimiento de todos que la minería en Colombia ha estado desde muchos años dentro del territorio haciendo parte de las economías rurales. Aunque se han realizado estudios especializados para utilizar tecnologías limpias como (Luís Meza, 2012) y (Rodríguez, 2017) entre otros, además de evidenciadas mediciones de agentes contaminantes en los recursos hídricos por parte de las corporaciones regionales, (CORANTIOQUIA, 2016), se observa el uso constante en las MAPE de estas sustancias químicas para los procesos de beneficio del oro.

## **ANTECEDENTES**

De acuerdo a (Martinez et al., 2021), la minería de oro artesanal y en pequeña escala (MAPE) continúa expandiéndose rápidamente debido al aumento del precio global del oro y los impactos económicos del COVID-19. Esta expansión de la MAPE ha generado preocupaciones sobre el uso de mercurio y ha aumentado el número de proyectos diseñados para reducir o eliminar el uso de mercurio en la MAPE en muchos países en desarrollo. Desafortunadamente, hasta la fecha, estos proyectos que se centran en la sustitución del mercurio por separación o concentración por gravedad han sido

relativamente infructuosos debido a la falta de apoyo continuo, orientación y capital. Mediante un examen crítico de las intervenciones de separación y concentración por gravedad que se han implementado globalmente en la MAPE, se abordan las deficiencias y desafíos para los mineros artesanales. Martínez, 2021, concluye que la concentración por gravedad no es la solución final para eliminar el uso del mercurio en la extracción de oro artesanal, pero puede reducir drásticamente el uso y su liberación al medio ambiente.

(M. M. Veiga & Fadina, 2020), comenta dentro de su investigación que la solución del desafío de la contaminación por mercurio ha recibido una atención mínima por parte de académicos, gobiernos, ONG y la industria minera convencional. La demostración de “nuevas” tecnologías para reducir y eliminar las emisiones y liberaciones de mercurio no han sido suficiente para convencer a los mineros de adoptar prácticas más limpias, principalmente porque los mineros están impulsados por las ganancias y menos perturbados por las consecuencias ambientales y de salud. Las soluciones más difíciles de implementar son aquellas que requieren un cambio en el comportamiento de los mineros. Los proyectos rara vez consideran esto y, con poca frecuencia, los investigadores preguntan sobre las necesidades de los mineros, las motivaciones para cambiar y las habilidades para adoptar prácticas más limpias (Stocklin-Weinberg et al., 2019). De acuerdo con Veiga, 2020; hasta ahora, los esfuerzos para reducir / eliminar el mercurio en Artisanal Gold Mining “AGM” pueden agruparse en una de tres categorías generales:

1. Enfoques ambientales y de salud.
2. Enfoques tecnológicos (educativos).
3. Formalización o enfoques legales.

Otros estudios realizados (Bustamante et al., 2016), presentan un plan de manejo de agua y relaves que busca brindar apoyo técnico a los mineros de oro informales, además de identificar los problemas hídricos vinculados a la minería informal de oro en Colombia y su impacto en la comunidad y el medio ambiente.

A nivel internacional, por (Hernandez Antolin et al., 2014), proponen una serie de tecnologías de bajo y fácil aplicación para el tratamiento de aguas contaminadas por actividades de minería en zonas con bajo Índice de desarrollo humano (IDH). Para una

mayor eliminación del mercurio, tras la coagulación-floculación proponen realizar la adsorción utilizando, adsorbentes naturales.

Por otra parte, se evaluó la revisión del estado del arte en cuanto a la gestión ambiental de aguas residuales con mercurio (Hg) a nivel mundial dada la problemática social y ambiental generada por la (MAPE), por parte de (Garzón-Gutiérrez & Rodríguez-Miranda, 2015), donde se reporta que el 62% de los sitios evaluados, se encuentran en una categoría de gestión ambiental inexistente, el 8% se encuentra en etapa reactiva y el 31% en responsable, mientras que no se encontró ningún proceso en gestión proactiva o competitiva. De otra parte, se encontraron diversos estudios a nivel experimental sobre tratamientos de aguas residuales con Hg, que podrían ser adaptados a la gestión de los residuos líquidos provenientes de la MAPE.

Por otra parte, (Tobón, 2013) realizó su investigación en la flotación espumante directa como alternativa para el remplazo del mercurio, en la recuperación de oro nativo a partir de un depósito aluvial. Realizando el proceso de concentración en celda Flash y celda en Columna, con un 97.5% de recuperación, usando Ditiofosfato di-isoamílico de sodio (DTPI) como colector e hidróxido de sodio como regulador de pH.

Otro de los estudios es una caracterización realizada por el profesor Luis Meza de la Universidad Nacional de Colombia, Teknidata Consultores (Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia (CORANTIOQUIA), 2012) donde realiza los levantamientos de los diferentes diagramas de flujos y sus posibles mejoras en la disminución del uso del mercurio para el beneficio del oro.

En el 2010, el profesor Marcello Veiga (M. Veiga, 2010), realizó un estudio para la Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial "ONUDI", en visitas a Segovia y otros municipios, relacionó las cantidades de mercurio emitidos a los medioambientales acuáticos y atmosféricos con una relación de entre 19 y 76 toneladas de Hg por año.

A nivel del estado colombiano, (IDEAM, 2019) a través de Estudios Nacionales del Agua, realizó estudios donde el patrimonio hídrico del país está representado por el agua en las diferentes fases y manifestaciones en que se encuentra, ocurre e interactúa en el ciclo

hidrológico. Su estudio requiere la definición de unidades de análisis espaciales que facilitan su evaluación y seguimiento tanto para aguas superficiales (áreas, zonas y subzonas hidrográficas) como para aguas subterráneas (sistemas acuíferos). En este trabajo se retoma los aportes del último estudio realizado para el año 2018.

A nivel regional, con el fin de aportar al desarrollo sostenible del territorio, CORANTIOQUIA y el Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia –CTA-, entidad con experiencia en la generación de conocimiento que aporta a la gobernanza del recurso hídrico en el país, emprendieron la tarea de formular los Planes de Ordenamiento del Recurso Hídrico –PORH, para el caso particular de la cuenca de La Cianurada en el municipio de Segovia (La Cianurada, n.d.). Información utilizada para los análisis de datos obtenidos a través de los indicadores hídricos registrados.

Para este trabajo se realizó un primer capítulo, donde se contextualizaron conceptos del sistema hídrico en Colombia, especialmente en la cuenca de La Cianurada perteneciente al municipio de Segovia Antioquia, luego para entrar en detalle, se llevó a cabo en 4 Etapas, en la *Primera etapa* se muestra la relación del uso de sustancias químicas tales como el mercurio en los procesos de beneficio del oro utilizados en la minería artesanal. En la *segunda etapa* se describen las metodologías utilizadas dentro de los procesos de beneficio de oro, en la *tercera etapa* se realizó una descripción de coexistencia entre el medio ambiente y la minería artesanal y de pequeña escala “MAPE” y en la *Etapa 4*, se proyectaron, las diferentes metodologías limpias, propuestas por universidades, grupos de investigación y autoridades estatales.

Como objetivo de este trabajo, se quiere analizar el manejo y uso del recurso hídrico utilizado para el beneficio del oro en las MAPE en el municipio de Segovia.

# 1. Oferta hídrica y régimen hidrológico

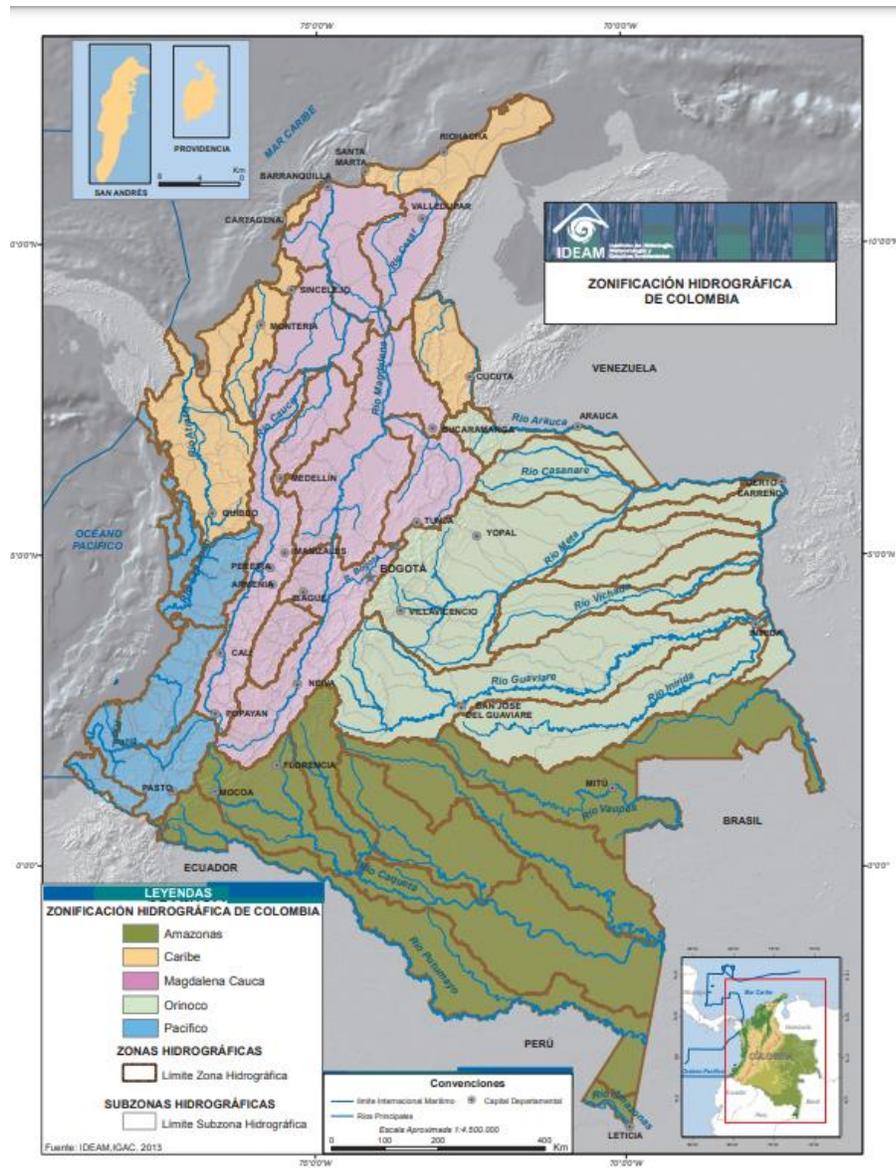
## 1.1 Oferta hídrica y régimen hidrológico en la Cuenca de la Cianurada

El ordenamiento del recurso hídrico en Segovia, se realizó por Corantioquia y el Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia –CTA, utilizando para ello el instrumento del PORH para el año 2014. Estos instrumentos de planificación permiten en ejercicio de la autoridad ambiental, intervenir de manera sistémica los cuerpos de agua para garantizar las condiciones de cantidad y calidad requeridas para el sostenimiento de los ecosistemas acuáticos y los usos actuales y potenciales de dichos cuerpos de agua.

La Cuenca de la Cianurada ver **Figura 1-1**, es el recurso hídrico utilizado por las unidades de producción minera para el beneficio del oro en Segovia, Antioquia. La cuenca está constituida principalmente por 7 subcuencas como lo son: la intercuenca La Cianurada, la intercuenca El Aporriao, la quebrada la Cucaracha, quebrada Bolivia, quebrada Marmajón, caño El Tigrito y la quebrada Matuna.



**Figura 1-2:** Zonificación hidrográfica de Colombia, visualización del área hidrográfica Magdalena-Cauca IDEAM, IGAC 2013.



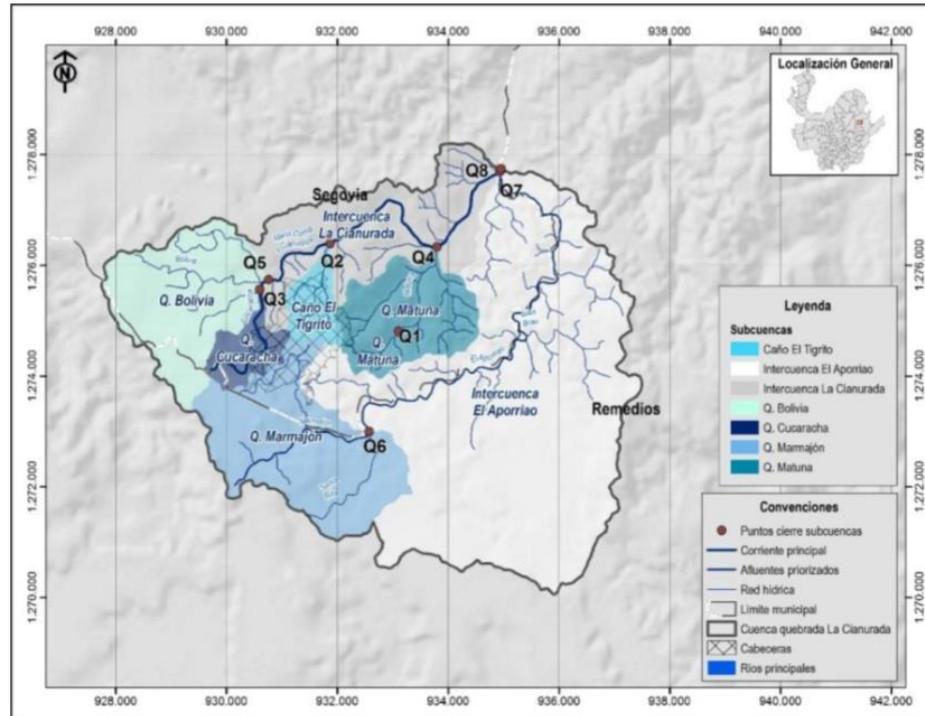
Fuente: IDEAM, IGAC, 2013.

Dentro del territorio Colombiano se presentan explotaciones ilícitas con deterioro del medio ambiente que podrían confundirse con las MAPE, donde el Gobierno de Colombia en cabeza del Ministerio de Justicia y del Derecho y en alianza con UNODC (UNODC. Oficina de las Naciones Unidas Contra la Droga y el Delito, 2016) desarrollaron el diseño y

construcción de una línea base de evidencias de explotación de oro de aluvión con uso de maquinaria en tierra en el territorio colombiano. sensores remotos orientada a detección nacional de las evidencias de explotación de oro de aluvión (EVOA). En el caso específico de la explotación minera a cielo abierto, la percepción remota se ha incorporado a los sistemas de gestión ambiental de las operaciones mineras y áreas afectadas por éstas, principalmente en las economías más desarrolladas.

La explotación de oro de aluvión en el territorio colombiano se efectúa en dos modalidades generales de acuerdo a (UNODC, 2016): explotación mediante el uso de maquinaria en tierra (retroexcavadoras) y explotación mediante el uso de maquinaria en agua (dragas, dragones, balsas); cada modalidad de explotación ocasiona diferentes perturbaciones, las cuales generan evidencias físicas de diversa naturaleza de acuerdo con el medio en el que se manifiestan. La mayor concentración de áreas con EVOA se encuentra en la macrocuenca Magdalena-Cauca, especialmente al nororiente del departamento de Antioquia y sur de Bolívar, en los municipios de Zaragoza, El Bagre, Nechí, Caucasia, Segovia y Montecristo y Santa Rosa del Sur, respectivamente, Las subcuencas donde se ubican estos municipios tienen en su mayoría más de 1000 ha en EVOA.

Para el análisis del manejo del agua en las MAPE de Segovia, se retoma el estudio de la oferta hídrica del PORH de la quebrada La Cianurada para el 2014,(CORANTIOQUIA, 2014) donde se definieron ocho puntos de análisis, de los cuáles seis son puntos de salida de las principales subcuencas que aportan al caudal base de la quebrada La Cianurada. Los dos puntos restantes están localizados sobre la quebrada La Cianurada parte alta (Q3) donde toma el nombre de quebrada La Cucaracha y a la salida de la cuenca (Q8). La ubicación de los puntos se presenta en la **Figura 1-3**.

**Figura 1-3:** Ubicación de puntos de análisis de la cuenca de la quebrada La Cianurada.

Fuente: PORH, 2014.

Los resultados obtenidos del estudio de oferta en el PORH, muestran que la quebrada El Aporriao es el afluente más importante de la quebrada La Cianurada, dado que aporta el 59% del caudal base. En segundo lugar, se ubican las quebradas Bolivia y Marmajón, que contribuyen al 28% del caudal total de la cuenca, lo cual indica que en sólo tres subcuencas se concentra cerca del 87% del total de agua superficial disponible. Esta situación debe tenerse en cuenta en el momento de otorgar concesiones de agua, dado que las fuentes de agua en las demás subcuencas pueden ser fácilmente agotadas de no controlarse el consumo.

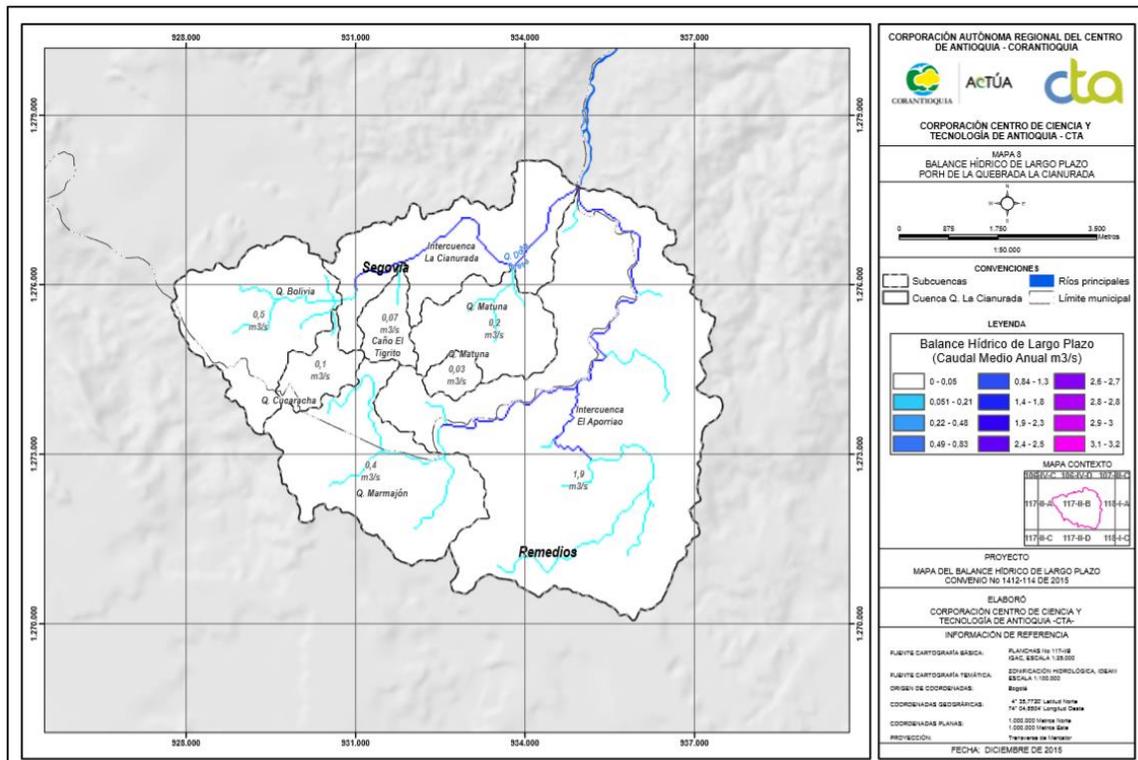
Desde el PORH se estimaron los caudales medios, mínimos y ambientales de la cuenca la Cianurada para con ello realizar el balance de agua y calcular la cantidad del recurso hídrico que puede ser utilizada por las actividades humanas sin afectar las corrientes, esto con el fin de mantener las condiciones ecológicas de la cuenca la Cianurada.

Dentro de los resultados del estudio anteriormente mencionado, (CORANTIOQUIA, 2014) al realizar el balance hídrico se evidencia, que, si se incluye dentro del balance hídrico el consumo de agua para las actividades humanas, podría afectar el medio ambiente. Los balances hídricos se realizan haciendo la resta del caudal mínimo menos el caudal ambiental o caudal ecológico, donde se resaltan los resultados del Q5, Q6 y Q3, para el tramo en que las actividades mineras hacen uso. El caudal total usado en la actividad minera es de 0.88 m<sup>3</sup>/s, caudal que sobrepasa los valores del balance hídrico representados en la **Tabla 1-1**, estos valores son la cantidad de agua que puede ser utilizada por las actividades mineras en este caso, sin afectar la cantidad disponible en las corrientes hídricas para mantener las condiciones ecológicas en la cuenca.

**Tabla 1-1.** Relación del balance hídrico PORH 2014, cuenca La Cianurada. (CORANTIOQUIA, 2014).

ID	Balance hídrico época normal (Qmin-Qamb)	Balance hídrico época seca (Qmin-Qamb)
Q1	0.0277	0.002
Q2	0.053	0.0035
Q3	0.0618	0.0039
Q4	0.1751	0.0126
Q5	0.3399	0.0199
Q6	0.3354	0.0221
Q7	1.4081	0.1021
Q8	2.2698	0.2422

Por lo tanto, y de acuerdo con los resultados anteriores, la actividad minera con mayor uso del agua dentro de las actividades industriales ver **Tabla 1-2**, sobrepasan el consumo mínimo permitido dentro de la cuenca la Cianurada.

**Figura 1-4.** Balance Hídrico cuenca la Cianurada. (CORANTIOQUIA, 2014).

Fuente: PORH, 2014.

## 1.2 Demanda de la Cuenca la Cianurada

La demanda hídrica según (IDEAM, 2019), en el contexto de la hidrología se entiende, como la estimación de la extracción de agua del sistema para ser usado como parte de las actividades productivas, desde el punto de vista económico y para el uso doméstico. También se entiende a partir de la competencia por el uso que hacen los sectores y, por lo tanto, se asume como la no disponibilidad de agua para otras actividades antrópicas y los ecosistemas en un territorio y por un periodo de tiempo. El agua se usa como insumo o como materia prima en los procesos productivos y toda o una parte de esta retorna al sistema. Los retornos de agua incluyen las pérdidas, los vertimientos y las descargas de

agua turbinada. Las pérdidas están asociadas al uso del agua desde la captación hasta la entrega nuevamente a la fuente, por las actividades antrópicas, sean estas económicas o no. Las pérdidas de agua, una vez se extrae de los sistemas hídricos para uso en los procesos productivos, se pueden aducir a uso ineficiente y a la falta de mantenimiento de infraestructura, entre otros. Por lo tanto, las pérdidas se asumen como el agua que habiendo entrado al proceso productivo no se usa en éste, sino que sale del mismo por exceso o por fuga. Los vertimientos no se consideran pérdidas.

La demanda del recurso hídrico en la cuenca La Cianurada de acuerdo al PORH 2014, es debida al consumo doméstico y a las actividades pecuarias, agrícolas y mineras, siendo esta última actividad la más representativa, particularmente en la subcuenca de la quebrada Marmajón (Q6), quebrada Bolivia (Q5) y quebrada Cucaracha (Q3), ubicadas en la parte alta de la cuenca, en donde se evidencia una variabilidad espacial de las concesiones adjudicadas, para persona natural y jurídica. La actividad minera corresponde al 69% de la demanda total, seguida por un 21% asociada a la demanda agrícola y en un menor porcentaje se encuentran las relacionadas con actividades económicas del sector pecuario (7%) y doméstico (4%).

El número de expedientes de concesiones que se encuentran dentro de la divisoria de la cuenca de la quebrada La Cianurada son 109, de los cuales 15 corresponden a persona natural y 94 a persona jurídica, la mayor cantidad del caudal está otorgado para uso minero. Los datos representados en la **Tabla 1-2**, muestran lo siguiente: el uso doméstico está otorgado a los valores de la compañía Zandor Capital, ya que el agua utilizada para el acueducto municipal se capta de una corriente hídrica fuera de esta cuenca en estudio, y por ello no fue incorporada dentro de esta información en el PORH 2014. De acuerdo a la data, el uso minero está asociado a las MAPE de directa influencia en la cuenca la Cianurada.

**Tabla 1-2.** Caudal Total (m<sup>3</sup>/año) reportado según PORH 2014.

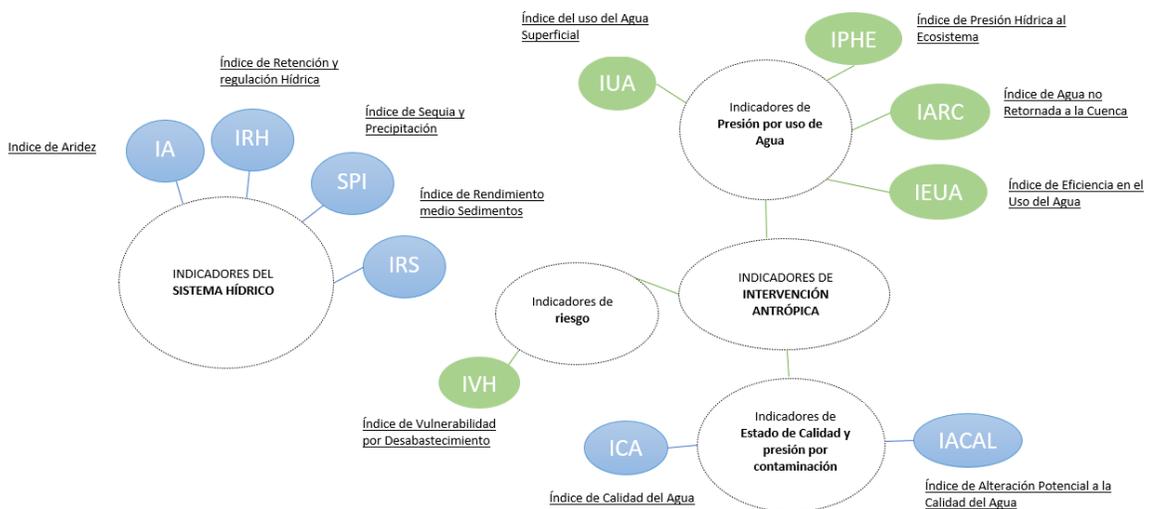
Usos	Caudal PN	Caudal PJ	Caudal Total (m <sup>3</sup> /año)
<b>Doméstico</b>	4.207	378.432	382.639

<b>Minero</b>	422.072	2.361.416	2.783.488
<b>TOTAL</b>	426.279	2.739.848	3.166.127

### 1.3 Indicadores hídricos

La evaluación del sistema natural nacional se soporta en un conjunto de indicadores que evalúan, desde una fundamentación técnica, las características del clima y regulación de caudales, evadiendo la intervención antrópica. Los indicadores asociados al régimen hidrológico permiten identificar zonas cuya normalidad climática es seca y la caracterización de la regulación de las cuencas. Los indicadores de intervención antrópica, como lo son el IVH, Índice de vulnerabilidad por desabastecimiento, el ICA, índice de calidad del agua, el IACAL, índice de alteración potencial a la calidad del agua, IEUA índice de eficiencia en el uso del agua, IARC índice de agua no retornada a la cuenca, IPHE índice de presión hídrica al ecosistema y el IUA, índice del uso del agua superficial, ver **Figura 1-5**.

**Figura 1-5.** Sistema de indicadores hídricos modificados del ENA 2018.



Fuente: ENA 2018.

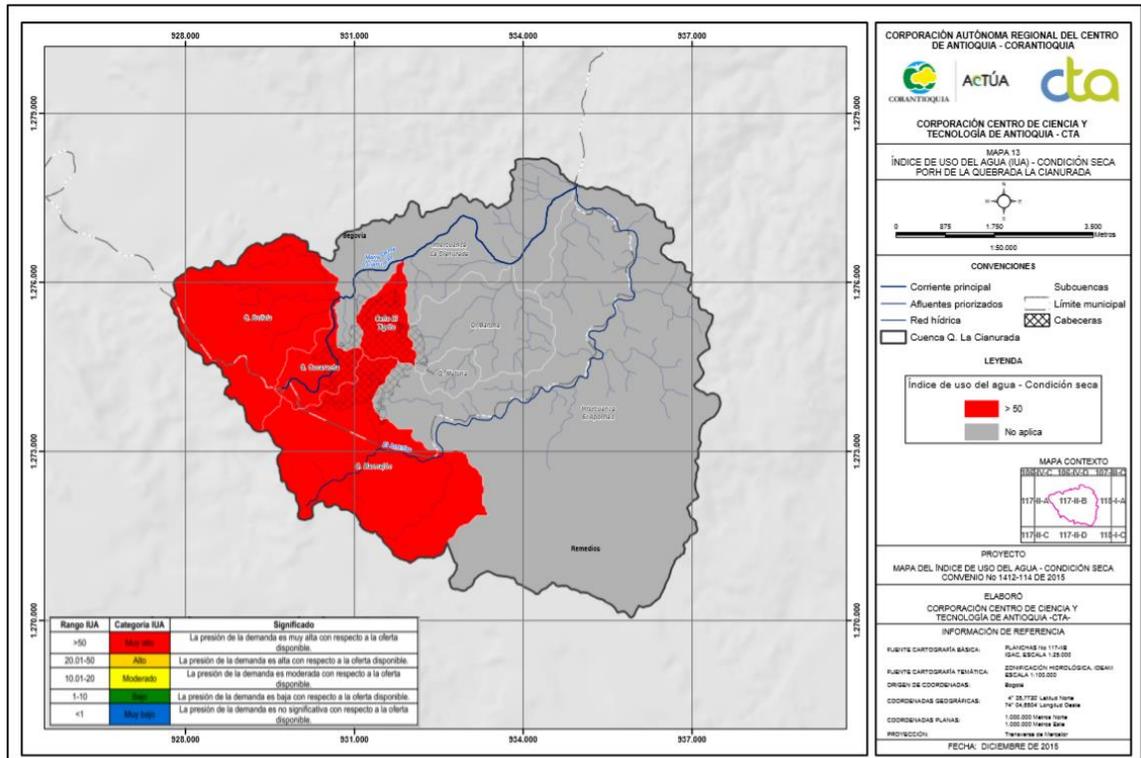
La caracterización de variables de oferta, demanda y calidad y las correspondientes a alteraciones del régimen natural, permiten construir un sistema de indicadores hídricos que reflejan el estado de las situaciones que, en un enfoque sistémico con visión integral, son determinantes para la toma de decisiones en el marco de la Gestión Integral de Recursos Hídricos (GIRH) adoptado en la “Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico en Colombia” (MAVDT, 2010a). La evaluación de los recursos hídricos es un prerrequisito para todos los aspectos relacionados con la planificación, desarrollo y gestión integrada del agua y un elemento fundamental para la toma de decisiones. Constituye, a su vez, un factor coadyuvante en la gestión para la preservación del medio ambiente como parte del desarrollo sustentable (WMO, UNESCO, 1991).

Para la cuenca en estudio, la quebrada La Cianurada favorece la abundancia del recurso en épocas de invierno, sin embargo, en condiciones de sequía severa el IUA cambia y la disponibilidad de agua es crítica, dado que no existe suficiente recurso para las actividades mineras y para mantener el caudal ambiental en la cuenca.

El IVH se define como el grado de fragilidad del sistema hídrico para mantener la oferta para el abastecimiento de agua ante amenazas, las cuales hacen referencia a períodos largos de sequía o a la disminución de los caudales en las fuentes de agua, situaciones ambas que pueden generar problemas por desabastecimiento (IDEAM, 2013).

Este índice refleja una situación similar a la observada con el IUA ver **Figura 1-6**, en condiciones hidrológicas medias, la vulnerabilidad de la cuenca de la quebrada La Cianurada es baja y moderada, sin embargo, cuando se presentan sequías severas la vulnerabilidad de todas las subcuencas es moderada y puede ser crítica en aquellas donde existe gran consumo de agua para abastecimiento humano.

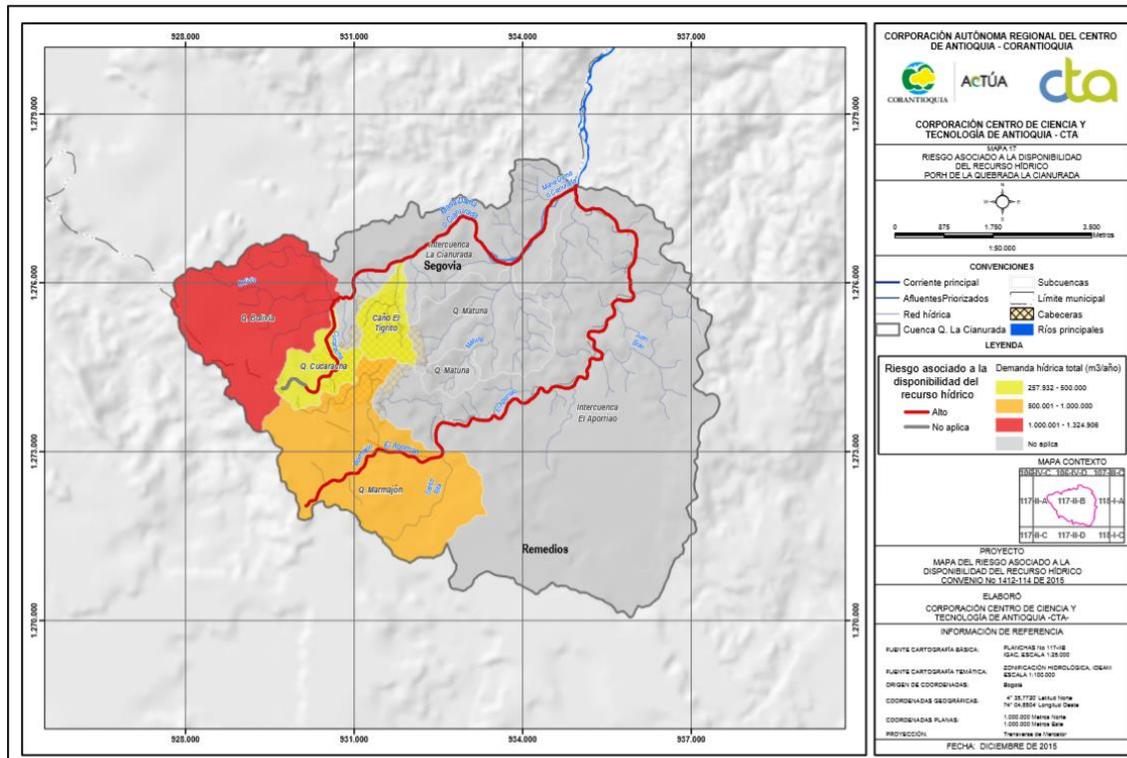
Figura 1-6. IUA en condiciones secas.



Fuente: PORH, 2014.

De acuerdo a la información obtenida dentro del PORH (La Cianurada, n.d.) sobre la cuenca La Cianurada, con respecto a los indicadores, se observa que presenta información base de alguno de estos indicadores anteriormente mencionados, no obstante es de aclarar que no se tiene información detallada de calidad de agua como sistema nacional de información, para las unidades mineras que actualmente operan dentro del territorio en estudio.

Como se muestra en la **Figura 1-7**, la disponibilidad del recurso hídrico, se ve afectada en temporada seca, debido esto a la alta demanda por el uso industrial minero.

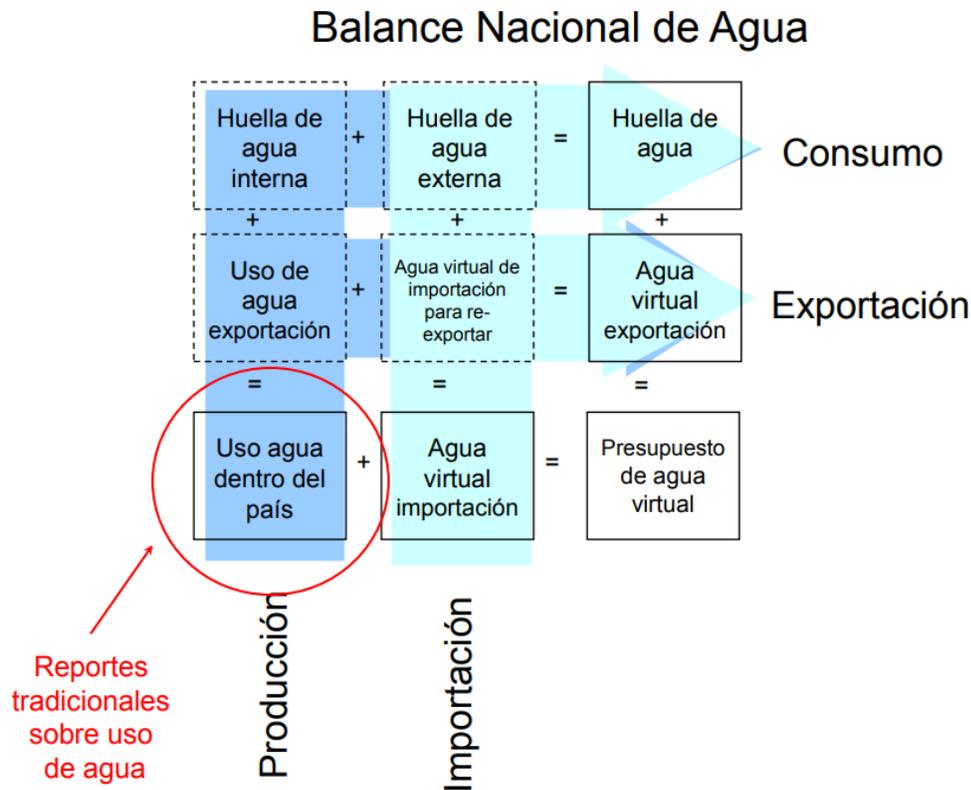
**Figura 1-7.** Riesgo asociado a la disponibilidad del recurso hídrico.

Fuente: PORH, 2014.

Según (Yu & Ding, 2021) las Naciones Unidas predijeron que la población mundial aumentaría de 7.700 millones a 10.900 millones para 2100 (ONU, 2019). El rápido crecimiento de la población ha llevado a un aumento en el uso de agua en la agricultura, la industria y otros sectores. Los cambios en las propiedades biofísicas de la superficie subyacente causados por el cambio de uso de la tierra pueden a su vez afectar el ciclo regional del agua (Kiersch, 2000). El cambio climático puede causar que más áreas sufran estrés hídrico (Schaeffer et al., 2012). Además, la producción y el consumo social no solo consumen recursos de agua dulce, sino que también provocan la contaminación del agua. El crecimiento de la población, el cambio de uso de la tierra, el cambio climático y el crecimiento económico han dado como resultado una tendencia a la baja tanto en la cantidad como en la calidad de los recursos hídricos disponibles (Vorosmarty et al., 2000).

Otro concepto utilizado para medir el uso del agua, es la llamada Huella Hídrica, nació como un indicador por Arjen y Hoekstra, profesor de la UNESCO, en el 2002. La definición de la huella hídrica por (Hoekstra, 2009), es el volumen de agua dulce usado para producir

los productos, a lo largo de su cadena productiva, la cual incluye tiempo y espacio. Esta huella hídrica se diferencia en **verde**, **azul** y **gris** por los diferentes usos del agua. Existen dos componentes principales, la huella **interna** de un país y la huella **externa** dentro de otros países; la Huella Nacional es igual al uso de agua nacional más la importación virtual de agua menos la exportación virtual de agua. Como principal antecedente de huella hídrica se tiene el del **Agua Virtual**, el cual es definido por Hoekstra y Hung en el 2002.(3.Huella Hidrica.Pdf, n.d.). Como la cantidad de agua que incorpora un proceso en la fase de producción. El agua es necesaria para la producción de ciertos productos, por lo que el comercio de estos productos que consumen agua significa el comercio de agua **invisible**, es decir, el comercio de **agua virtual** (Yu & Ding, 2021). Alguno de los estudios más relevantes en este tema encontrados en la página de Water Footprint Network es la, “Evaluación sobre el flujo y la vulnerabilidad de la red de huella hídrica de la ciudad de Beijing, China”.(Yu & Ding, 2021).El cual hace énfasis en que “los recursos hídricos son estratégicamente importantes para la producción humana y la vida. Sin embargo, los recursos hídricos están distribuidos de manera desigual en el tiempo y el espacio. El uso racional de amplios recursos hídricos, como la huella hídrica, es esencial para promover el desarrollo sostenible regional” ver **Figura 1-8**.

**Figura 1-8.** Balance Nacional del Agua.

Fuente: Hoekstra 2009.

Los indicadores hídricos evaluados en el año 2014 en la quebrada la Cianurada, muestran un estrés hídrico generalizado sobre la cuenca para las épocas de sequía, información que debe ser estudiada para fortalecer los procesos técnicos de recuperación de oro en las MAPE que se utilizan en la actualidad. Uno de los resultados evidencia, que los vertimientos a la cuenca en estudio, no están siendo tratados antes de su vertimiento, datos que generan gran preocupación por la calidad del recurso hídrico, aguas abajo en las comunidades vecinas al municipio de Segovia. Uno de los análisis que se podrían plantear a futuro, es el cálculo de la Huella Hídrica en las MAPE, la cual representaría el uso del recurso hídrico y las políticas de restauración del mismo, de una forma cuantitativa se iniciaría a construir una línea base para el llamado manejo del recurso hídrico por parte de las unidades mineras en estudio.

## **2. Manejo del Recurso Hídrico**

### **2.1 Uso de sustancias químicas.**

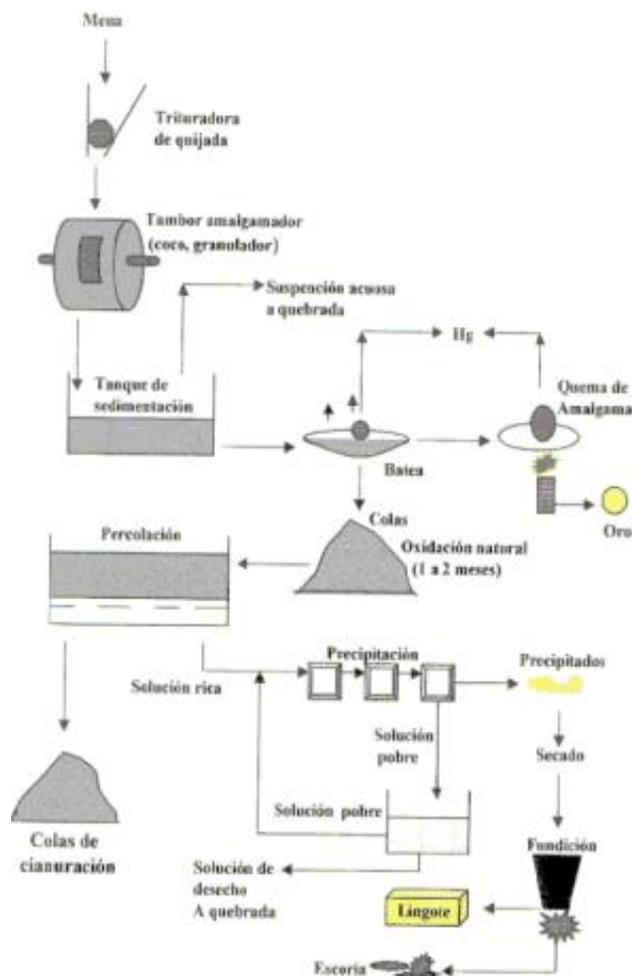
De acuerdo a (Valencia et al., 2016) la economía del municipio de Segovia se manifiesta mediante la minería de oro, el comercio (entables, compras de oro, provisión de víveres, venta de licores y misceláneas), la ganadería, la explotación maderera y la agricultura. La actividad de exploración y explotación de material aurífero como la principal actividad económica del municipio; la ganadería es poca en la región por la dificultad de producir pastos saludables y el medio ambiente no es el adecuado; la producción maderera, deteriora la selva virgen tropical y la agricultura es poco tecnificada, sólo se produce para el consumo interno los productos como el plátano, la yuca, el maíz y el arroz.

Las plantas de procesamiento de minerales auríferos en el nordeste antioqueño, presentan diferentes técnicas para el beneficio del mineral. Entre ellas se tiene la amalgamación, la lixiviación con cianuro o la combinación de ambas.

Según estudio de (Valencia et al., 2016) en Segovia se encuentran aproximadamente 29 entables, dentro de los cuales se encuentran: La Palma, Medina, El Relámpago, JM, Rincón y La Orquídea. Con las visitas técnicas realizadas en el marco del convenio de asociación No 1506-93- CORANTIOQUIA – CNPML (2016), se confirmó que en la actividad minera en los distritos mineros de esa región de Antioquia se consume mercurio, igual se observa un alto deterioro del suelo, no se registran los consumos de agua, pero todos los entables y minas tienen altos consumos de agua. la carga contaminante se desconoce dado que no hay valores de referencia de carga de SST y DBO5, pero los resultados de DBO encontrados en los entables mineros son en su gran mayoría menores de 30 mg/l. Uno de los entables monitoreados (CORANTIOQUIA, 2016) reporta carga de mercurio de 620 gramos/día, con concentraciones de 7,84 mg/l de Hg, esto indica que las estrategias de mejora deben enfocarse a la eliminación de estos reactivos en la actividad minera.

De acuerdo con el estudio realizado por (Valencia, 2016), en el proceso de amalgamación de minería de filón se llegan a usar entre 15 - 35 g Hg/g de oro recuperado cuando se utilizan canalones, de 7 - 10 g Hg/g de oro recuperado con placas amalgamadoras y entre 25 - 30 g Hg/g de oro recuperado con molinos de cocos, como ejemplo para mostrar la variabilidad que se presenta en el uso de mercurio, ver **Figura 2-1** . Se resalta que en las visitas de reconocimiento a entables en Segovia y Remedios se verificó que el método más común de recuperación de oro es con molinos de cocos, siendo este el método de mayor consumo de mercurio.

**Figura 2-1.** Esquema utilizado para el beneficio de oro con mercurio.



Fuente: Veiga, 2010. ONUDI – Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial.

En el estudio de (Valencia et al., 2016), para estimar las cantidades de mercurio utilizadas en los procesos de beneficio de oro, se asumieron como valores de referencia los que se muestran en la **Tabla 2-2**. A partir de estos valores de referencia se estimó el consumo de mercurio en Toneladas/año por departamento, el resultado estimativo indica que Antioquia consume 129,22 ton/año que representan el 67% de consumo de mercurio de Colombia.

El mercurio utilizado en las plantas de beneficio fue medido por laboratorios experimentados, relacionados en los estudios elaborados por entidades gubernamentales como la Corporación Regional del Centro de Antioquia, "CORANTIOQUIA" quien utilizó equipo marca Jerome modelo 431X, con un rango de lectura de 0,001 a 0,999 mg/m<sup>3</sup> Hg y con Sensibilidad de 0,003 mg/m<sup>3</sup> Hg.

En la **Tabla 2-1** se pueden evidenciar las descargas de mercurio de acuerdo al proceso de beneficio utilizado, información suministrada por la UPME en el año 2014.

**Tabla 2-1.** Cantidades de mercurio en Colombia utilizadas de acuerdo al tipo de establecimiento de beneficio mineral.

<b>Tipo de establecimiento de beneficio de mineral</b>	<b>Usos (gHg/gAu)</b>	<b>Descarga (gHg/gAu)</b>
<b>Minería de filón</b>	36.04	12.41
<b>Minería de retroexcavadora</b>	11.84	4.14
<b>Minidragas</b>	3.28	1.15
<b>Mineros de batea(barequeros)</b>	8.33	2.91
<b>Elevadoras</b>	11.69	4.09
<b>Dragones modificados</b>	3.43	2.62
<b>Promedio</b>	<b>12.44</b>	<b>4.55</b>

Fuente: UPME-Universidad de Córdoba. Cadena del Mercurio en Colombia 2014.

De acuerdo a (Corporacion Autonoma de Antiquía, 2016) el mercurio en Colombia no recuperado en las actividades de beneficio del oro, obedecen a la minería de oro informal

y artesanal, para calcular la cantidad de mercurio no recuperado por este tipo de minería, se restó de la producción total de oro, la cantidad producida por la minería legal (se estima que el 20% es producción legal)<sup>1</sup>, debido a que esta no usa mercurio para el beneficio. La producción de oro en el departamento de Antioquia, según el SIMCO, y la cantidad promedio de mercurio no recuperado correspondiente a los años 2010 a 2013, se muestra en la **Tabla 2-2**, la cual se proyectó teniendo en cuenta la relación hallada en este estudio para el departamento de Antioquia.

**Tabla 2-2.** Estimativo de mercurio no recuperado en Antioquia.

<b>AÑO</b>	<b>Producción de Oro (MAPE)(kg)</b>	<b>Mercurio promedio no recuperado (kg)</b>
<b>2010</b>	13.664,47	99.204
<b>2011</b>	13.415,47	97.396
<b>2012</b>	21.307,79	154.694
<b>2013</b>	14.127,27	102.563
<b>TOTAL</b>		113.464

Fuente: Corantioquia 2016 “Minería- Oro.

Otros estudios según (M. Veiga, 2010), indican que, datos indirectos de pérdidas y emisiones de mercurio de los 5 municipios Antioqueños seleccionados por ONUDI indican que alrededor de 50 toneladas/a son pérdidas, de las cuales 33 toneladas son pérdidas probablemente en colas en los medioambientes terrestres y acuáticos y 17 toneladas son emitidas al aire. Estos datos necesitan ser confirmados por un balance de masa más exacto en los centros de procesamiento (conocidos como “entables”). El uso del mercurio en los “cocos” es un proceso ineficiente en el que se pierde oro y hasta el 50% del mercurio

<sup>1</sup> El Centro Nacional de Producción Más Limpia y Tecnologías Ambientales (**CNPMLTA**).

que entra en el proceso. La gravedad de la contaminación por mercurio fue confirmada por un análisis del aire usando dos espectrómetros, LUMEX y Jerome.

## **2.2 Metodologías utilizadas para el beneficio del oro**

Según las notas de clase de Restrepo, (Restrepo, 2007), la amalgamación en "circuito abierto" significa que toda la carga del mineral aurífero, entra en contacto con mercurio en un flujo continuo de pulpa. No es posible recuperar todo el mercurio en forma de amalgama, una parte de éste, en forma metálica libre o amalgamada, atomizada o dividido en finísimas gotas, escapa con las colas, contaminando una gran cantidad de material ambiental en su camino. Amalgamación de concentrados en "circuito cerrado" esto significa que sólo el concentrado, generalmente producido gravimétricamente, se pone en contacto con el mercurio en un ambiente parcial o totalmente cerrado, donde la amalgamación se realiza sin la emisión de porción alguna de pulpa. Para completar el proceso la amalgamación debe seguirse con los siguientes pasos: - Separación amalgama / minerales acompañantes

- Separación mercurio libre / amalgama

- Separación oro / amalgama.

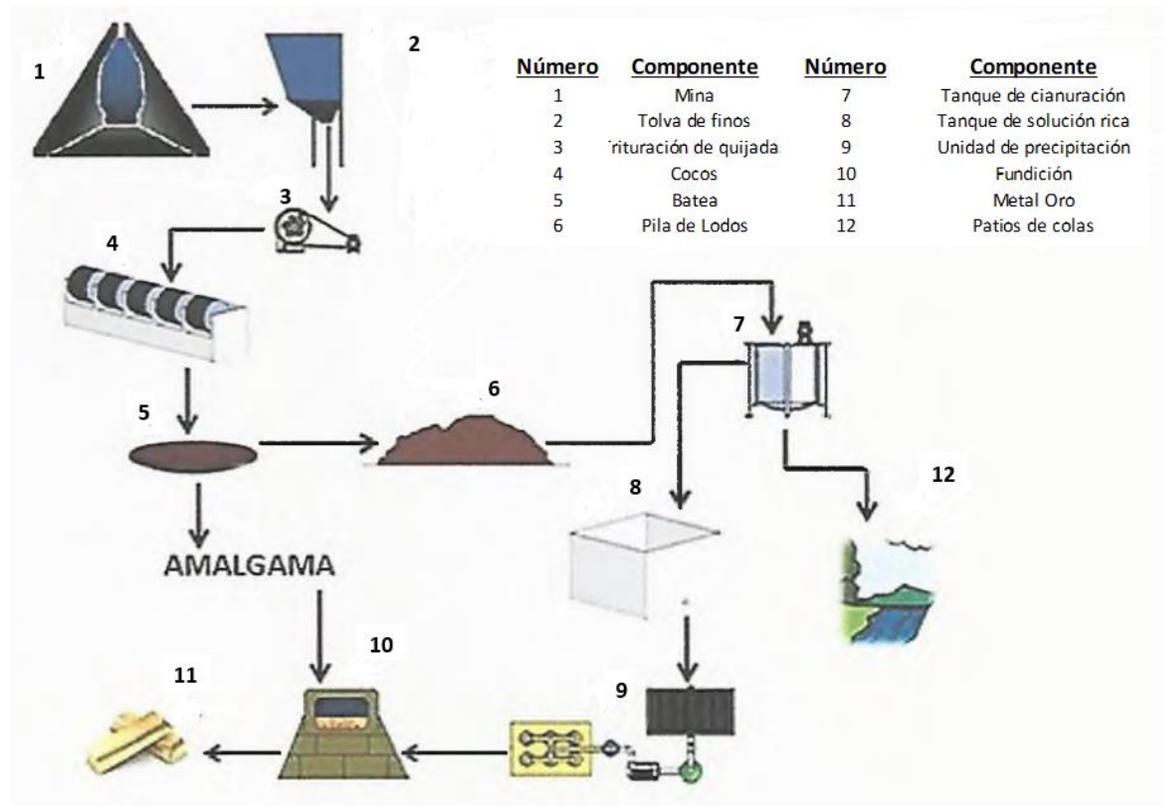
De acuerdo a lo anteriormente expuesto, se tienen varias formas de amalgamar el oro como lo son: amalgamación in situ, en molinos, en canaleta, con concentradores centrífugos, amalgamadores tipo "jackpot", con planchas amalgamadoras, manual y en tambores amalgamadores.

### **Monitoreo del mercurio en el proceso de beneficio de oro en Segovia**

La consultoría realizada por Teknidata Consultores, (Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia (CORANTIOQUIA), 2012), realizó un documento diagnóstico, donde elaboraron un balance metalúrgico para las plantas de procesamiento de minerales auríferos, las cuales operan bajo 3 esquemas diferentes de beneficio.

El primer esquema, es la amalgamación en cocos, y cianuración por agitación de las colas de amalgamación. Dentro del proceso de beneficio del oro, se realiza la amalgamación del oro libre y la cianuración en las colas de lodos dentro del proceso. Las descargas en las quebradas no tienen tratamiento y llevan consigo, cianuro, mercurio, zinc, cobre y otros iones ver **Figura 2-2**.

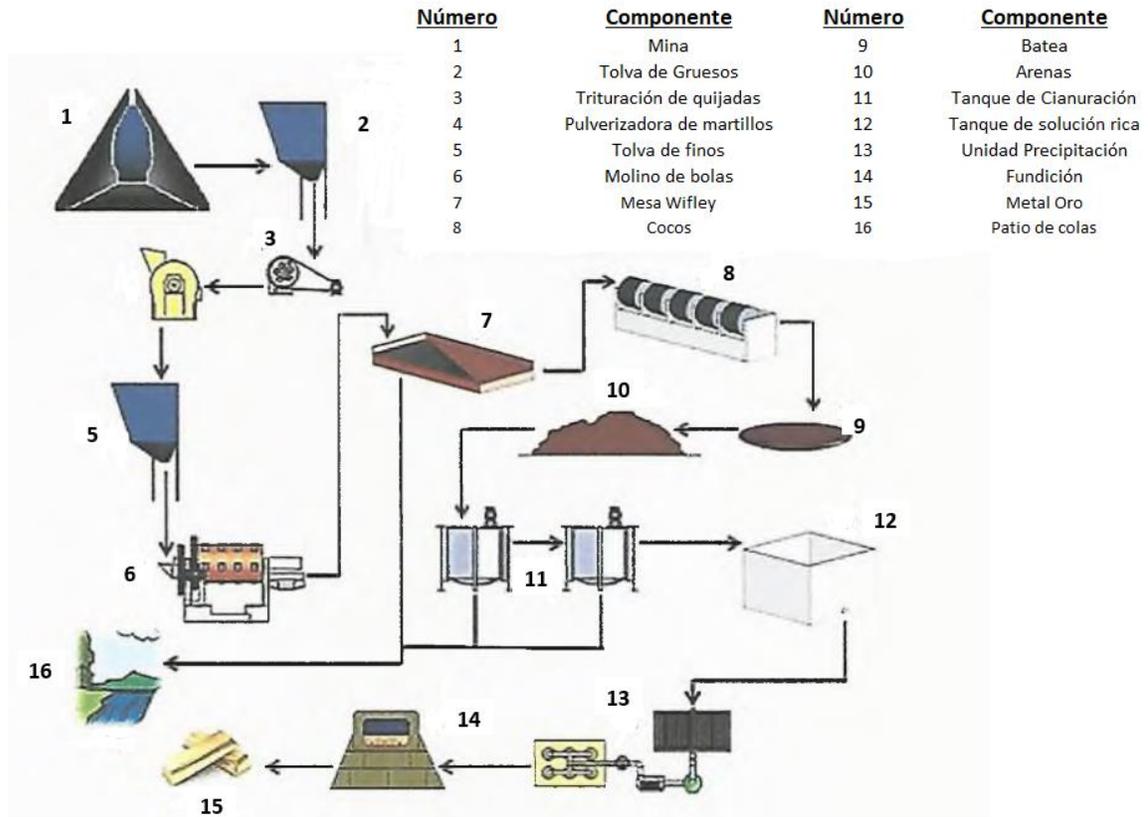
**Figura 2-2.** Esquema de amalgamación en cocos y cianuración por agitación.



Fuente: Modificado de Luis Meza 2012.

El segundo esquema, combina la amalgamación, molienda- concentración gravimétrica y cianuración ver **Figura 2-3**.

**Figura 2-3.** Esquema de flujo combinado con concentración gravimétrica, amalgamación en cocos y cianuración por agitación.

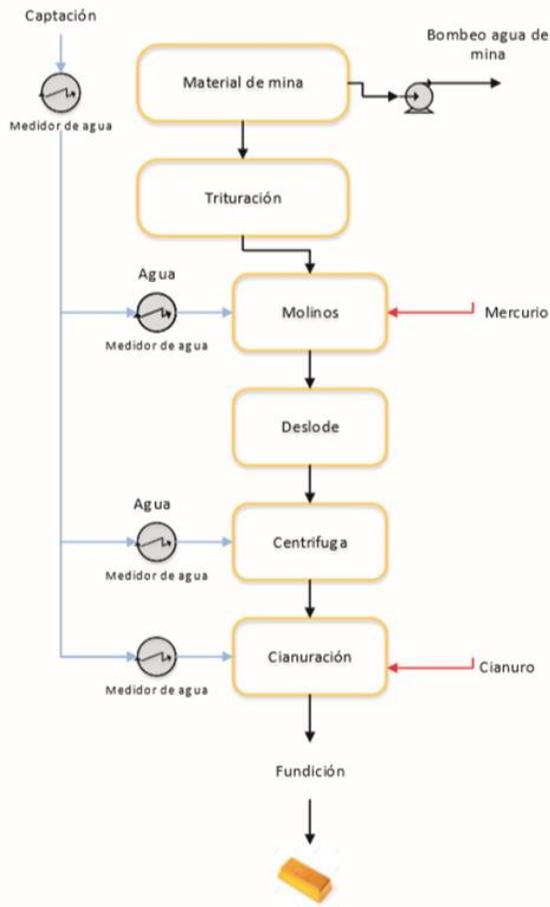


Fuente: Modificado de Luis Meza 2012.

Según el informe mencionado, el mineral rico seleccionado manualmente se amalgama en los cocos, mientras que el mineral más pobre se muele en molinos de bolas y se concentra en una mesa tipo Wilfley. El concentrado también se amalgama en los cocos. Posteriormente, las colas finales de los dos productos amalgamados son cianurados en tanques de agitación. Los efluentes finales tanto líquidos como sólidos no son tratados y son lanzados a los flujos de agua. El tercer esquema de beneficio, se realiza en pequeñas plantas constituidas principalmente de: reducción de tamaño en trituradoras de quijadas seguidas de una trituradora de martillo, conocida en la región como pulverizadora y molienda en molinos primarios de bolas. El material molido se concentra generalmente en Jig y mesas vibratorias con posterior remolienda de los concentrados para llevarlos a la



**Figura 2-5.** Extracción del oro en entables, municipio de Segovia.



Fuente: Manual del recurso hídrico Corantioquia 2016.

La cantidad de mercurio no recuperado en el 2013 en Antioquia fue de 141.944 kilogramos, (Corporacion Autonoma de Antiquía, 2016), de este cálculo se excluyen la minería formal, los municipios donde se recupera menos mercurio son el Bagre, Caucasia y Segovia. Igualmente, el consumo de agua en los entables mineros es muy alto el volumen de agua que se consume en un mes es de aproximadamente 448.876 m<sup>3</sup>, igual que con el mercurio los municipios que presentan mayor consumo son el Bagre, Caucasia y Segovia. El cálculo de consumo de agua se hace con un módulo de consumo de 0,22 m<sup>3</sup>/gramo de oro producido (UPME – Universidad de Córdoba 2014).

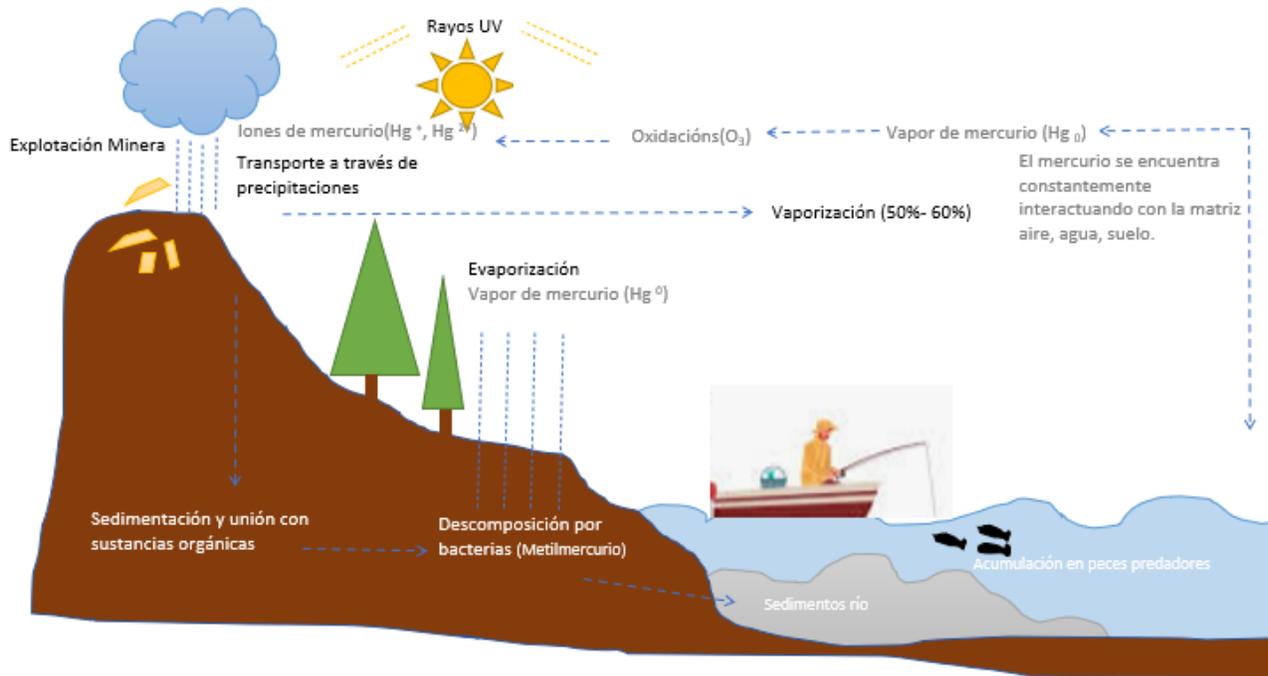
En los procesos de beneficio de las MAPE, utilizan agua, que generalmente es agua limpia tomada de las fuentes hídricas de la región. En las MAPE se tiene minería de oro de veta y minería de oro de aluvión, para lo cual son dos procesos de beneficios diferentes. En la minería de veta como se observa en la **Figura 2-5**, el mineral extraído se tritura para bajar el tamaño de las partículas, una vez es triturado pasa a un proceso de molienda donde el agua es adicionada con mercurio para la amalgamación en los llamados “Cocos”. La amalgama se toma para pasar al proceso de fundición donde se separa el oro del mercurio. Esta separación trae consigo emisiones atmosféricas del mercurio causante de enfermedades como lo es el hidrargirismo, la cual es una enfermedad ocasionada por envenenamiento por el metal mercurio. El remanente del proceso, pasa a una segunda fase de lixiviación con cianuro para recuperar el oro que no fue posible amalgamar, dando como resultados las colas del proceso que se depositan en piscinas que generalmente son tratadas para su posterior vertimiento de nuevo a los afluentes ya mencionados. Para el caso del oro de aluvión, o de lecho de ríos o quebradas, el oro, es recuperado con mercurio, obteniendo la amalgama que es llevada a la fundición.

De acuerdo a los esquemas ya mencionados, elaborados por científicos y entes gubernamentales competentes en la materia desde el año 2012, (CORANTIOQUIA, 2012) muestran que aún los procesos de recuperación de oro en las MAPE, carecen de tecnologías apropiadas para una buena recuperación de oro sin el uso del mercurio. Estos procesos de beneficio que son usados desde hace muchos años, utilizan gran cantidad del recurso hídrico, además de sustancias químicas que son depositadas en los afluentes sin ningún tratamiento para la mayoría de los casos. Muchos de estos procesos, no recirculan el agua, ni existe un control de caudales, en donde se pueda llevar una trazabilidad de las fugas y pérdidas durante el proceso. En cuanto a las recuperaciones de oro en este tipo de procesos, se estima según (Veiga et al., 2014b), que rara vez supera el 30%.

## **3.Relación del medio ambiente y la MAPE**

### **3.1 Enfoque del Medio Ambiente y los grupos de interés.**

De acuerdo a la (Londoño, 2005) “el mercurio en estado cero es móvil en el ambiente, debido a que es ligeramente soluble en el agua (56 ug/l); por tanto produce contaminación de las aguas subterráneas y fuentes superficiales, cuando ocurre la disposición de colas de procesos de amalgamación. No todos los acuíferos resultan con concentraciones extremas de mercurio (Barringer et al., 2005). Sin embargo, de acuerdo con el estudio (Foucher et al., 2012) quien determinó, que, en una mina de oro y plata, el mercurio de las colas del proceso se lixivió y contaminó las aguas subterráneas, alcanzando concentraciones hasta de 15 ug/l. Otro riesgo, es la práctica de cianuración de arenas previamente usadas en amalgamación, donde el cianuro forma con el mercurio complejos estables, solubles y difíciles de remover ( $\text{Hg}(\text{CN})_2$  y  $\text{Hg}(\text{CN})_4$ ). La lixiviación de complejos cianuro-mercurio (usualmente en forma  $\text{Hg}^{+2}$ ), incrementa la concentración de mercurio en las aguas subterráneas (Coles y Cochrane, 2006)”.

**Figura 3-1.** Ciclo dinámico del mercurio en el medio ambiente modificado de Ruiz (2013).

Fuente: Modificado de Ruiz (2013).

Cuando el mercurio es utilizado en las explotaciones mineras, inicia una interacción con el medio ambiente, incluyendo el agua, el aire y los suelos. Permite de acuerdo a su concentración y formación de complejos la contaminación en los seres humanos y los animales. De acuerdo a “Reducing mercury pollution by training Peruvian artisanal gold miners”, en los países como Colombia, Perú y Ecuador donde son utilizados los “chanchas” o “Cocos” en Colombia, que son pequeños molinos de bolas y “quimbaletes”, o mortero gigante formado por una gran piedra de granito, las pérdidas de mercurio pueden ser de 5 a 10 veces la cantidad de oro producido (Veiga, 2015).

Se realizó un estado del arte en Colombia, para evaluar la gestión de aguas residuales industriales con Hg proveniente de la MAPE a nivel mundial, (2014), donde el método utilizado para el análisis se puede evidenciar en la , (Garzón & Rodríguez, 2015).

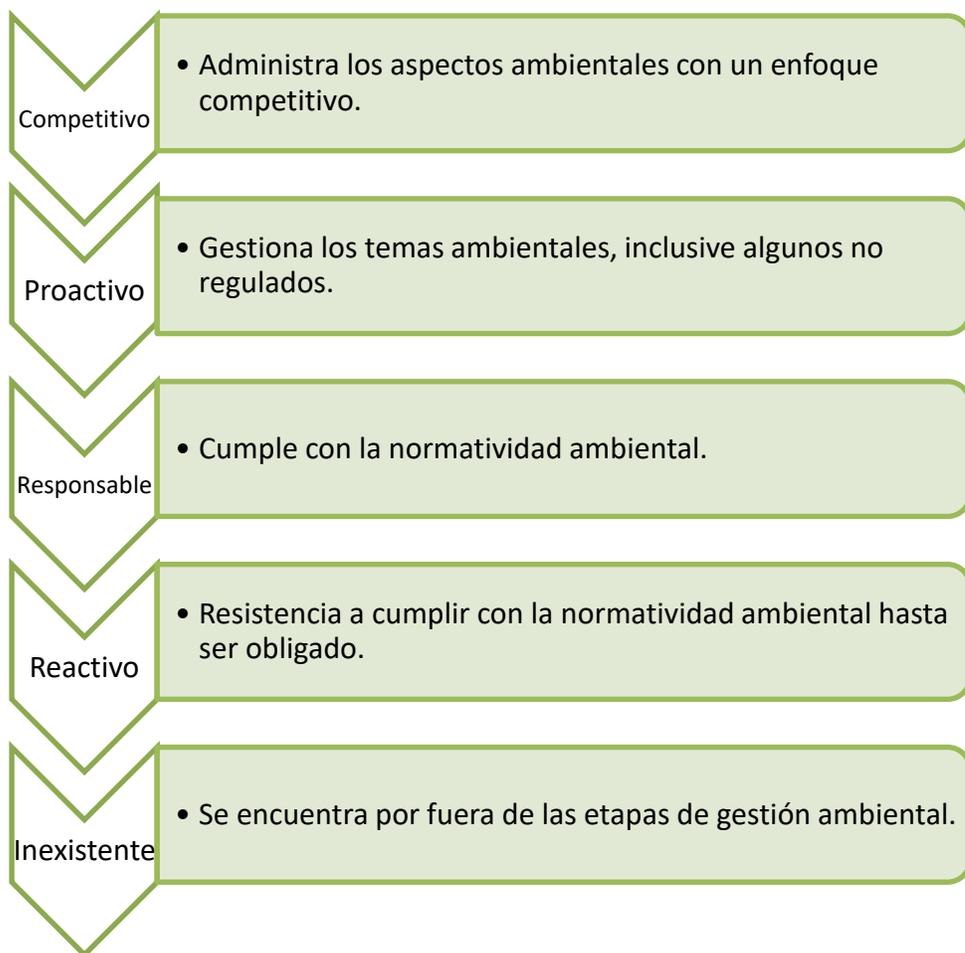
**Figura 3-2;** en este estudio se evaluó la etapa de gestión ambiental de aguas residuales industriales con mercurio en la que se encuentra la actividad minera, clasificándola de tipo

reactivo (R); responsable (Re); proactivo (P); competitivo (C) e inexistente (I), (Garzón & Rodríguez, 2015).

A partir del conjunto de artículos que abordaban la temática del tratamiento de vertimientos con Hg en la MAPE y las teorías de las etapas de la gestión ambiental organizacional, se elaboró una tabla de resultados donde incluyó el autor de la publicación, la localización (país, región, municipio) y el tipo de gestión ambiental realizado. Ver **Figura 3-3**.

Diferentes métodos de tratamientos se han gestionado para el tratamiento de las aguas residuales con mercurio en Colombia, como es el caso de columnas de absorción con carbón activado, ver **Figura 3-4**. También se puede observar que se están utilizando métodos de biorremediación, electrocoagulación, nanotecnología, reducción química, la Fito remediación con la *Typha domingensis* entre otros, (Garzón & Rodríguez, 2015).

**Figura 3-2.** Nivel de madurez de la gestión ambiental.



Fuente: (Garzón, 2014).

Así mismo, han sido poco eficientes las inversiones de donantes como Banco Mundial, la Unión Europea (UE), (ONUDI) y el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), las cuales han buscado sin éxito el desarrollo de programas de reducción del uso del mercurio, así como su gestión. Dado que han demostrado ser ineficaces en la difusión del conocimiento, especialmente porque los programas no son incluyentes con los mineros artesanales y ancestrales de las regiones, no cuentan en muchos casos con el apoyo gubernamental y no han tenido en cuenta el contexto cultural, social, económico y de organización de los mineros, razón que evidencia la necesidad de avanzar hacia la adopción de estrategias orientadas a la comunidad minera artesanal y a pequeña escala. En este contexto, se demuestra que la eficacia de leyes y programas de reducción y gestión del uso del Hg es muy baja y por ende la gestión de los residuos con este metal es inexistente en un alto porcentaje de los sitios evaluados, contando con algunas zonas en donde se pretende llevar a cabo mejoras en los procesos para disminuir la utilización de Hg, pero que no incluyen el manejo de los vertimientos que generan.

**Figura 3-3.** Revisión de la gestión ambiental aplicada en la minería aurífera MAPE a nivel mundial.

Localización	Método de tratamiento establecido o propuesto	Tipo de gestión ambiental				
		I	R	Re	P	C
Portovelo-Zaruma, Ecuador	La mayoría de las plantas de procesamiento descargan sus desechos cerca de los ríos locales, o descargan los relaves alrededor de los centros de procesamiento. <sup>28,29</sup>	X				
Garimpo Ouro Roxo, Brasil	Se generó una planta piloto transportable en la cual se genera concentración por gravedad seguida de cianuración en un molino esférico. <sup>26</sup>			X		
Rio Gualaxodo Mariana, Brasil	Se implementó un programa de gestión ambiental, que incluyó la construcción de un laboratorio amalgamación, la retorta en el proceso de fusión y eliminación controlada de residuos de amalgama. <sup>30</sup>			X		
Isla de Baru Indonesia	Los relaves de cianuración, junto con el Hg en solución, son depositados en estanques rudimentarios o simplemente lo descargan en los ríos. <sup>21,22</sup>	X				
Galangan Indonesia	Existen programas de la ONU, para capacitar a los mineros sobre los riesgos del Hg. <sup>31</sup>	X				
Lwamgasa Matundasi y Londoni /Tanzania	La legislación minera en Tanzania dicta el uso de retortas (con el cual reutilizan hasta el 95% de Hg) para la recuperación de oro, aunque prácticamente los mineros no lo utilizan. <sup>32,24</sup>	X				
Munhena Mozambique	El proceso de concentración por gravedad se produce en piscinas excavadas. Los relaves mal dispuestos, hacen que el Hg(CN) <sub>2</sub> sea fácilmente movillizado. <sup>25</sup>		X			
Colombia	A raíz del Proyecto Mundial sobre el Mercurio Iniciado por la ONU en 2002, persisten campañas de capacitación para utilizar retortas, sin embargo no se realiza tratamiento a los vertimientos. <sup>6,3,2</sup>	X				
Población de Misky, Arequipa, Perú	Se propone sistemas de recuperación mediante la mesa de Holman-Willfley previamente al empleo de los quimbaletes para reducir la cantidad de Hg utilizado. <sup>27</sup>			X		
Distrito de Lomas Perú	Los relaves de amalgamación son preconcentrados con el concentrador Falcon. <sup>33</sup>			X		
Ghana	Varios ghaneses y extranjeros, practican ilegalmente la MAAPE, sin ningún manejo de los vertimientos. <sup>20</sup>	X				
Zimbadwe	El proceso se basa en las tecnologías introducidas hace más de 100 años. Alrededor de 5 Ton de Hg se pierden anualmente en la región, el 70% en los relaves y el 30% a la atmósfera. <sup>34</sup>	X				
Burkina Faso	El exceso de Hg es generalmente eliminado por escurrimiento. <sup>35</sup>	X				
<b>Total (%)</b>		<b>62</b>	<b>8</b>	<b>31</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

Fuente: (Garzón, 2014).

**Figura 3-4.** Métodos de tratamiento de aguas contaminadas con Hg en fase experimental.

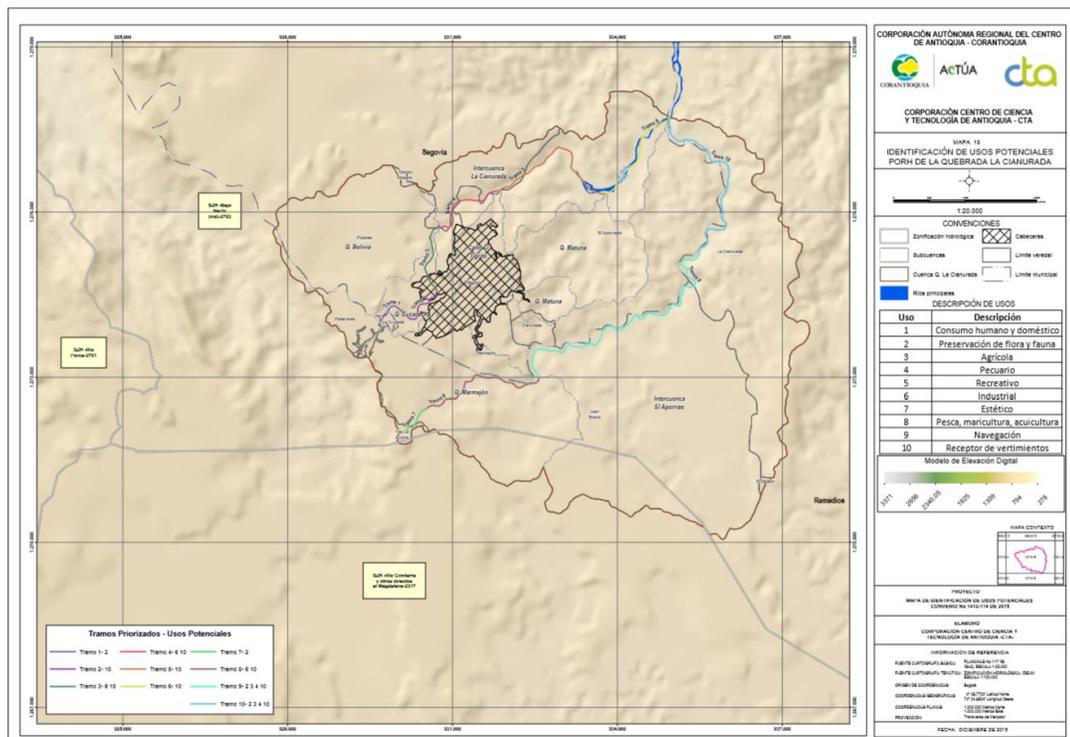
País	Método de tratamiento	Eficiencia y condiciones
Portugal	Biorreactor de membrana de intercambio iónico. <sup>9</sup>	Remoción = 98 % del Hg (II) removido
EEUU	Precipitación: Sulfuro de hierro (FeS) reactivo soportado por ultrafiltración. <sup>9</sup>	Poros= 500 μM = remoción 99 % Poros= 1000-1250μM = remoción 94%
Camerún	Electrocoagulación electrodos Al y Fe. <sup>10</sup>	Remoción = 99,9 %
Argelia	Adsorción mediante material basado en quitosano. <sup>11</sup>	Capacidad máxima = 850 mg Hg/g quitosano
Japón	Biorremediación a partir de <i>B. megaterium</i> inmovilizadas en alginato. <sup>43</sup>	Remoción = 80% [ ] inicial 10 mg/L HgCl <sub>2</sub>
Brasil	<i>Typha domingensis</i> . <sup>40</sup>	Remoción = 99,6 ± 0,4 %
Portugal	Adsorción mediante tapones de corcho. <sup>40</sup>	25 mg/l de adsorbente Remoción = 94% [ ] inicial = 500 μg/L
EEUU	Nanotecnología. <sup>50</sup>	Remoción = 97%
Colombia	Adsorción con carbón activado granular; a partir de cuesco de coco. <sup>51</sup>	Tiempo de ruptura = 20 minutos Columna = 1,7 cm diámetro y 2 cm de lecho. [ ] 5 y 10 mg Hg/L; Ph=2,5
India	Bioacumulación por células de <i>Bacillus cereus</i> inmovilizadas. <sup>52</sup>	La capacidad máxima de bioacumulación = 104,1 mg/g.
India	Biorremediación a partir de inmovilización en alginato de células <i>Enterobacter sp.</i> <sup>53</sup>	7,3 mg Hg/L Remoción = 100% Tiempo de contacto = 72 horas
España	Bioadsorción a de algas de <i>Sargassum muticum</i> . <sup>44</sup>	70 % se reduce 30 % se adsorbe
India	Adsorción a partir de papaina inmovilizada en esfera de alginato. <sup>45</sup>	Remoción = 98,88 % con 5g de adsorbente 30 ml de Hg (II); [ ] 10 mg Hg/L pH 7 y 35 ° C durante 8 min
Malaysia	Adsorción con carbón activado obtenido a partir de cáscara de la palma. <sup>54</sup>	Capacidad máxima = 83,33 mg/g pH 8. Tiempo de contacto = 3 horas [ ] 10-200 mg/L
EEUU	Reducción química. <sup>55</sup>	Remoción = 94 %
Grecia	Adsorción a partir de raicillas de malta. <sup>46</sup>	[ ] 0,3 g Hg/L = remoción 71 % [ ] 1 g Hg/L = remoción 100 %
España	Adsorción en una columna de lecho fijo de tiol funcionalizado con sílice mesoporosa. <sup>56</sup>	Tamaño de poro = 0,5 a 1 mm 25 mg de adsorbente, 45 ml de Solución Hg Remoción = 100%
Egipto	Adsorción por nanotubos de quitosano. <sup>57</sup>	pH = 4 y 70 °C. Capacidad máxima = 183,2 mg Hg /g
India	Adsorción por nanopartículas de Plata. <sup>58</sup>	Capacidad máxima = 0,8 g Hg/ g Ag
India	Electrocoagulación. <sup>59</sup>	Densidad de corriente = 0,15 A/dm <sup>2</sup> [ ] inicial = 0,1 mg Hg/L; pH = 7,0 Remoción = 99%

Fuente: (Garzón, 2014).

### 3.2 Usos actuales del agua en la cuenca de La Cianurada

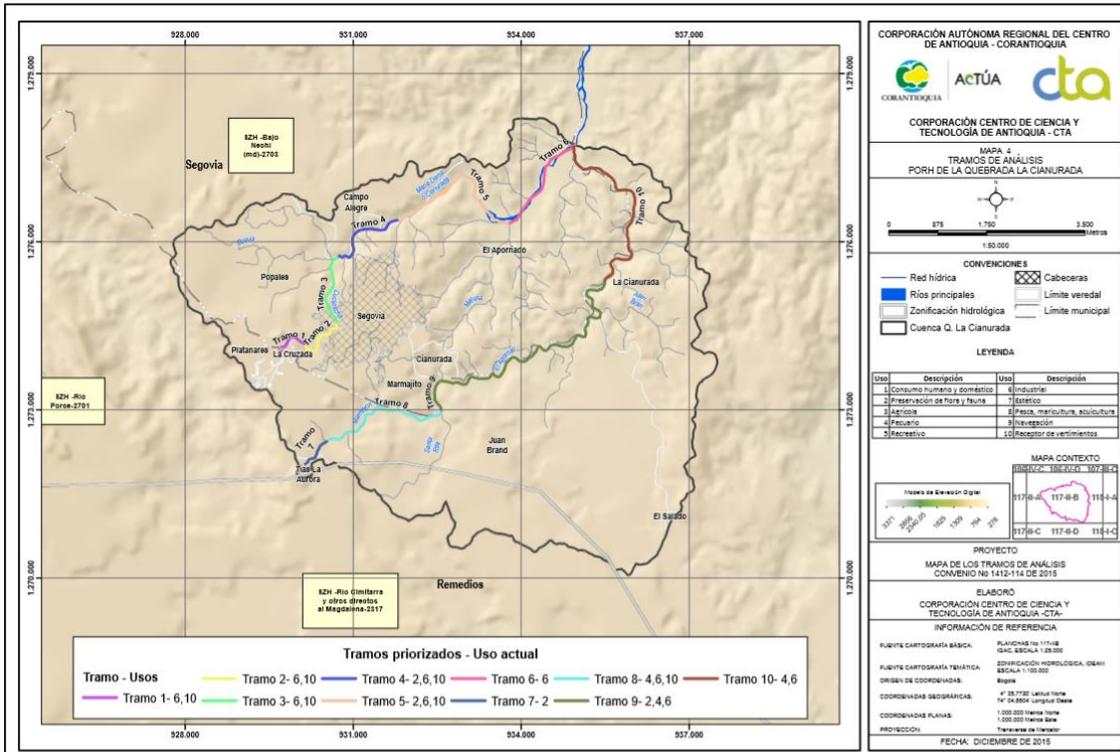
Para la identificación de los usos del recurso hídrico en mención, se realizó una clasificación del 1 al 10, ver **Figura 3-5**. según PORH 2014, priorizándose unos tramos dentro de la quebrada la Cianurada donde se desarrollan los diferentes usos, esto con base en las características actuales de los afluentes y de sus tramos, tomando en cuenta la información recopilada sobre usos del suelo y coberturas, información del instrumentos de planeación, concesiones, vertimientos, actividades económicas y mediante un trabajo interdisciplinario, verificación en campo y con la comunidad de la cuenca a través de los encuentros, se establecieron los usos del recurso hídrico para cada tramo de corriente (según lo estipulan los Decretos 1594 de 1984 y 3930 del 2010).

**Figura 3-5.** Identificación de los usos potenciales en la cuenca La Cianurada.



Una vez son identificados los usos se analizaron los tramos identificados y con ello los diferentes usos asociados, ver **Figura 3-6**.

Figura 3-6. Tramos de análisis por el uso del recurso hídrico.

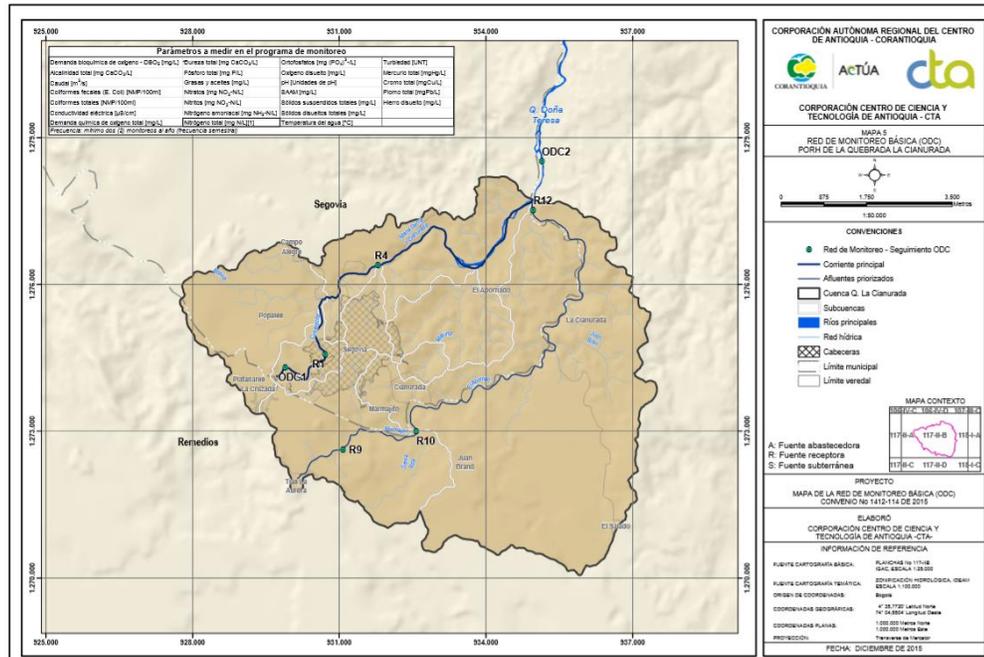


Fuente: PORH 2014.

Se puede observar en la **Figura 3-6**, que el uso industrial se encuentra en todos los tramos, es de resaltar que éste uso corresponde a las actividades mineras del municipio de Segovia acuerdo a la información suministrada por el estudio.

Para el estudio de la calidad del agua, se realiza una red de monitoreo básica (ODC), donde se analizan los datos de entrada a la cuenca y los datos a la salida de la cuenca La Cianurada. La información analizada va desde la demanda de oxígeno disuelto, los coliformes, sólidos suspendidos, y metales pesados, entre ellos el mercurio. Ver **Figura 3-7**.

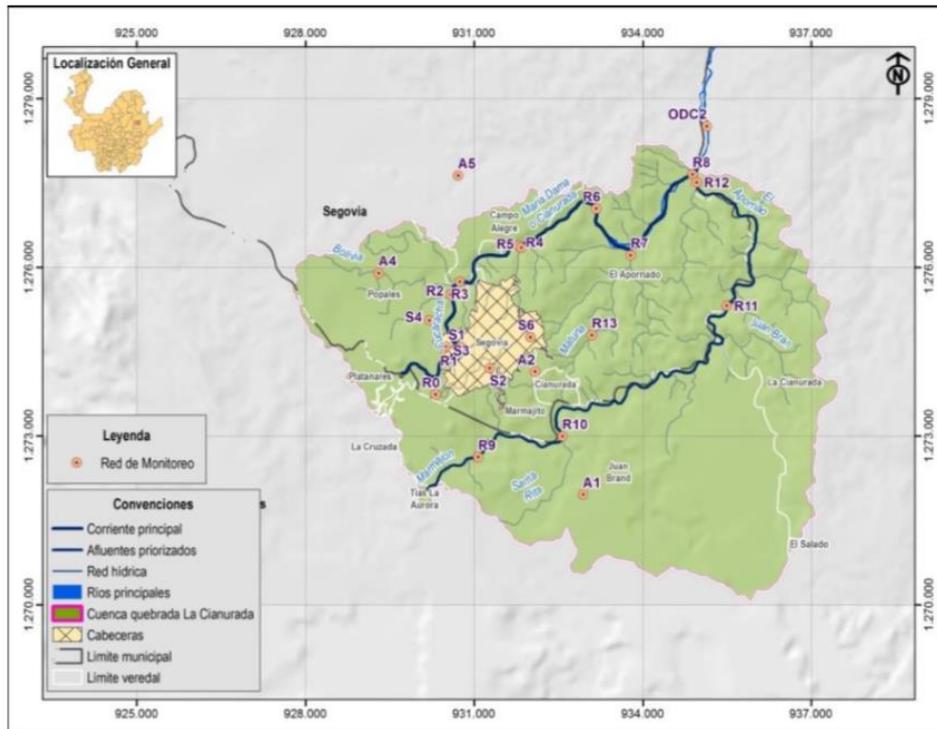
**Figura 3-7.** Red de monitoreo básica en la quebrada la Cianurada (ODC).



Fuente: PORH 2014.

Para el caso de Segovia y el manejo del recurso hídrico, se tiene la relación del indicador ICA o índice de calidad del agua en la cuenca la Cianurada, ver **Figura 3-9**.

Para determinar la calidad del agua, en el PORH, se realizó una caracterización fisicoquímica y microbiológica de los afluentes priorizados en la cuenca, con lo que se pudo calcular el índice de calidad del agua – ICA IDEAM (2011) y se definieron los objetivos de calidad según sus usos. Para este tema se diseñó un plan de monitoreo, donde se seleccionaron 24 sitios que representaron de forma adecuada los cambios en la calidad a lo largo del cuerpo de agua principal y los afluentes priorizados (**Figura 3-8**). De éstos, cuatro (4) sitios corresponden a bocatomas o fuentes abastecedoras de centros poblados y cinco (5) sitios en pozos y aljibes para el monitoreo del agua subterránea.

**Figura 3-8.** Mapa de sitios de monitoreo de calidad del agua.

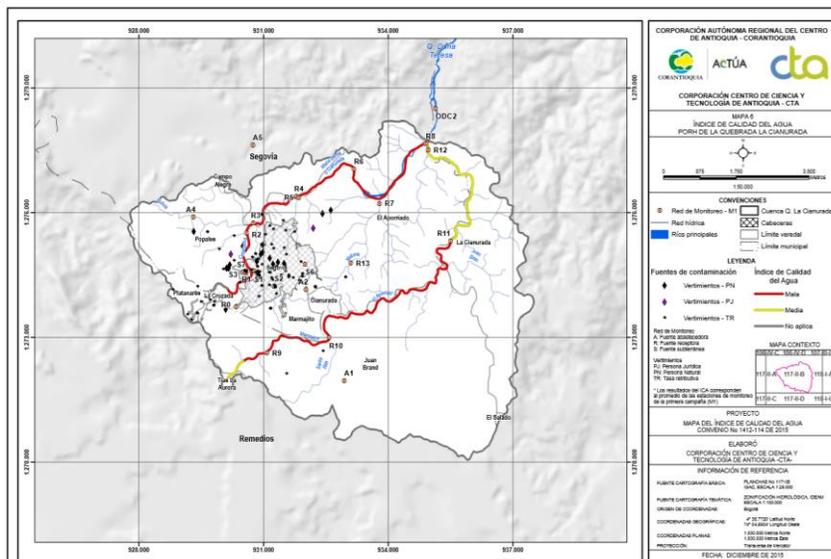
Fuente: PORH 2014.

Uno de los resultados de estos análisis, es la representación del ICA dentro de la cuenca de La Cianurada, como se puede evidenciar en la **Figura 3-9**. Se encuentran más de 50 puntos de vertimientos TR o de tasas retributivas, con un índice de calidad del agua mala, en más del 80 % de la red hídrica principal. Si observamos la **Figura 3-6**, todos los tramos tienen uso industrial, catalogado como número 6. Siendo este resultado de gran preocupación para la calidad de los sistemas hídricos aguas abajo de la cuenca en estudio.

De acuerdo al estudio realizado por (Remedios, 2019), donde relaciona el impacto de la intensa actividad minera que se desarrolla en la zona y las alteraciones en las trayectorias de flujo subterráneo y sus propiedades químicas; es decir, se incrementa la permeabilidad

de la roca por la construcción de túneles al interior del macizo rocoso; y que actúan como canales preferenciales para el flujo de agua dentro del macizo o generando superficies de contacto y que eventualmente, permiten el flujo de agua entre unidades hidrogeológicas que estaban desconectadas o entre la superficie y el subsuelo. Los efectos de subsidencia que se generan en la zona a causa de la deformación y/o colapso de las labores (túneles) construidas para la extracción minera, causan la proliferación de fracturas induciendo el aumento en su apertura y longitud al igual que el flujo vertical, aumentando directamente la permeabilidad de las formaciones rocosas, de especial índole si estas alcanzan la superficie. Esto produce junto con lo anterior, un incremento de la recarga en los túneles forzando al incremento del caudal de desagüe y por ende el abatimiento del nivel freático.

Según (Blodgett, 2002), la química del agua subterránea puede ser potencialmente ácida dada la interacción de esta con los sulfuros presentes en las rocas. Este proceso, complementado a la presencia de oxígeno, son potenciales generadores de drenajes ácidos provenientes de las actividades mineras, con lo cual el contacto con rocas inalteradas recientemente expuestas por la construcción de los túneles puede producir reacciones que cambien la calidad del agua subterránea. Por ejemplo, cuando el agua subterránea atraviesa una roca altamente mineralizada en un área minera puede arrastrar consigo altas concentraciones de metales que luego descarga en otros acuíferos o en cuerpos de agua superficiales. La magnitud el impacto derivado de esta dinámica dependerá del tratamiento del agua que pueda ser implementado en dichas actividades y de la localización de la descarga.

**Figura 3-9.** Índice de calidad del agua (ICA), Quebrada la Cianurada.

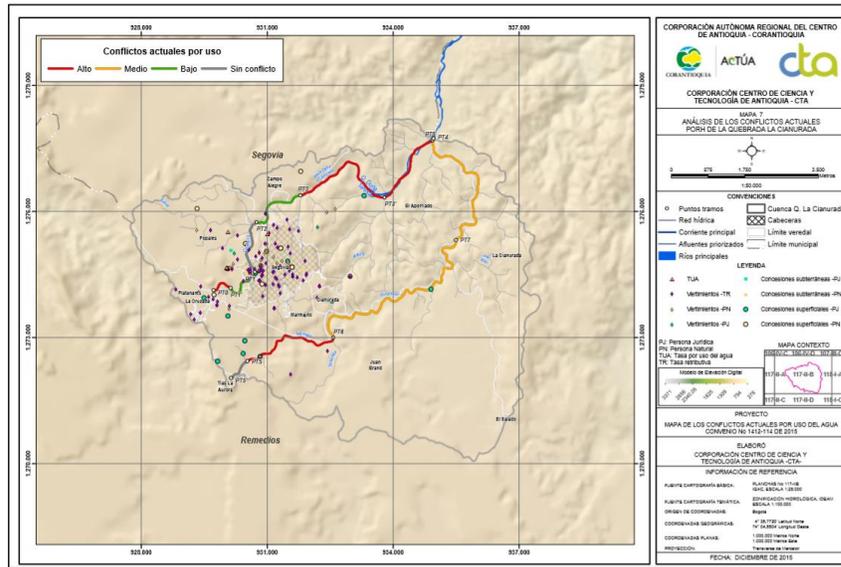
Fuente: PORH 2014.

## Conflictos socioambientales por uso de agua

Un conflicto por el agua es el resultado de la interacción entre los actores del territorio, donde surge una dinámica de visiones opuestas y grupos de interés que crean polémica, a causa de las diferencias creadas o percibidas por el uso y aprovechamiento del recurso hídrico y de los ecosistemas de los que depende su disponibilidad (DGIRH, IDEAM 2021).

Como se puede evidenciar en la **Figura 3-10**, los conflictos actuales por el uso del agua están catalogado por Alta, según el (PORH, 2014). Partiendo de este resultado, se puede apreciar que esta cuenca cuenta con varios vertimientos a su red hídrica, que no están siendo tratados con anterioridad a su descarga, además de ello se cuenta con una ausencia de tratamientos de las aguas residuales y una deficiente red de alcantarillado en los usos domésticos. En el caso de los vertimientos mineros, hay un uso excesivo de materiales pesados como el cianuro y el mercurio por la minería informal según el resultado del árbol de problemas por calidad del agua (PORH, 2014).

**Figura 3-10.** Conflictos por el uso del agua en la cuenca La Cianurada.



Fuente: PORH 2014.

**Figura 3-11.** Actores estratégicos para resolver los conflictos por el uso del agua, IDEAM 2021.



Fuente: IDEAM 2021.

La alta demanda del recurso hídrico, sumado esto a la contaminación por los vertimientos de las actividades industriales y doméstica, además de la inequidad en las relaciones sociales, económicas, políticas de las comunidades para el acceso y uso del recurso, reúnen una serie de características de cada territorio, que en el caso de la cuenca La Cianurada, conllevan a generar conflictos que evidencian un bajo compromiso de los grupos de interés en la sostenibilidad de las actividades industriales y el medio ambiente

en que las desarrollan. Los tramos donde mayor concurren los conflictos por el uso del agua son aquellos en los que se tiene actividades industriales, caso de la minería de oro.

### **3.3 Políticas Públicas Ambientales relacionadas con el uso y manejo del agua.**

Según la política nacional para la gestión del recurso hídrico (MAVDT, 2010) Pg11. Lo establecido por la Ley 99 de 1993 y el Decreto-Ley 216 de 2003, el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial –MAVDT, como coordinador del Sistema Nacional Ambiental, es el organismo rector de la gestión del medio ambiente y de los recursos naturales renovables, encargado de definir y formular, garantizando la participación de la comunidad, las políticas y regulaciones a las que se sujetarán la recuperación, conservación, protección, ordenamiento, manejo, uso y aprovechamiento de los recursos naturales renovables, entre ellos el agua. Por su parte, la Unidad Administrativa Especial del Sistema de Parques Nacionales Naturales – UAESPNN que hace parte de la estructura orgánica del MAVDT es la encargada del manejo y administración del Sistema de Parques Nacionales Naturales y de la coordinación del Sistema Nacional de Áreas Protegidas – SINAP, según lo establecido en el Decreto Ley 2811 de 1974, el Decreto 622 de 1977 y en la Ley 99 de 1993.

Tiene además las funciones de otorgar permisos, concesiones y autorizaciones para el uso y aprovechamiento de recursos naturales, cobrar tasas y participar en procesos de licenciamiento ambiental. El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales –IDEAM, el cual gestiona información relacionada, entre otros temas, con hidrología, hidrogeología, meteorología y ecosistemas, realiza estudios e investigaciones y emite conceptos en dichas materias. El IDEAM tiene una infraestructura propia para acopio de información a nivel nacional y apoya el trabajo de las autoridades ambientales regionales para el desarrollo de las funciones relativas al ordenamiento, manejo y uso del agua; también coordina el Sistema de Información Ambiental.

Colombia por medio de la Ley 1658 del 2013, se prohíbe el uso del mercurio para la minería de oro. ARTÍCULO 2. *Acuerdos y convenios de cooperación internacional. Se adoptará*

*una política nacional en materia de salud, seguridad y medio ambiente para la reducción y eliminación del uso del mercurio en las diferentes actividades industriales del país donde se utilice dicha sustancia; para lo cual se podrán suscribir convenios, desarrollar programas y ejecutar proyectos de cooperación internacional con el fin de aprovechar la experiencia, la asesoría, la capacitación, la tecnología y los recursos humanos, financieros y técnicos de dichos organismos, para promover la reducción y eliminación del uso del mercurio.*

*ARTÍCULO 3. Reducción y eliminación del uso de mercurio. Los Ministerios de Ambiente y Desarrollo Sostenible; Minas y Energía; Salud y Protección Social y Trabajo, establecerán las medidas regulatorias necesarias que permitan reducir y eliminar de manera segura y sostenible, el uso del mercurio en las diferentes actividades industriales del país. Erradíquese el uso del mercurio en todo el territorio nacional, en todos los procesos industriales y productivos en un plazo no mayor a diez (10) años y para la minería en un plazo máximo de cinco (5) años. El Gobierno Nacional dispondrá de todos los instrumentos tecnológicos y las respectivas decisiones con los entes y organizaciones responsables del ambiente y el desarrollo sostenible.*

La Ley 1658 hace referencia a las denominadas “alternativas limpias”. Min Ciencias fomentó la realización de investigaciones de tecnologías limpias para la reducción y la eliminación del mercurio en los diferentes procesos para obtener el metal precioso. Los ministerios de Minas y Energía; Comercio, Industria y Turismo; Educación y el Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA) promoverán y desarrollarán, en el marco de sus competencias, la realización de programas de formación, capacitación, fortalecimiento empresarial y asistencia técnica, para la inserción de las tecnologías limpias en los procesos de beneficio de oro y demás procesos industriales y productivos asociados que requieren la utilización del mercurio (Congreso de la República, 2013).

Para Antioquia se establece según la ordenanza 24 del 2017 pg. 3, ARTÍCULO 8 alternativas limpias. “*La Secretaría de Minas promoverá y desarrollará en el marco de sus competencias la realización de programas de formación, capacitación y fortalecimiento empresarial, transferencia tecnológica y asistencia técnica, para la inserción de tecnologías limpias en los procesos de beneficio de oro que estén utilizando mercurio*”.

El estado colombiano tiene un compromiso ante la sociedad y el mundo entero, que establece un acompañamiento, programas y acuerdos de cooperación internacional para la financiación en tecnologías limpias y los cambios necesarios en los procesos del uso del

---

mercurio para la minería del oro, caso Segovia Antioquia. Para llevar a cabo este propósito, es necesario obtener información confiable, para la cual se estable en este caso en particular sobre los temas relacionados a los recursos hídricos, información proveniente del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales "IDEAM", dentro de la cual tiene como función, determinar la situación actual y posibles escenarios futuros del agua en Colombia, considera los componentes de oferta, demanda, calidad y riesgo hidrológico, a partir de las características de ocurrencia natural y afectaciones por su interrelación con el medio natural y la sociedad. El análisis del origen, distribución, oferta, demanda y calidad del recurso hídrico donde con esta información, permite evaluar su estado actual.

Con el propósito de dar a conocer la situación actual y posibles escenarios futuros del agua en Colombia, el IDEAM realizó el Estudio Nacional del Agua 2010, el cual generó información y escenarios que se constituyeron en el insumo técnico para el diagnóstico de la Política Nacional para la Gestión Integrada del Recurso Hídrico (PNGIRH), expedida en 2010, en relación con los grandes temas de los objetivos específicos de oferta, demanda, calidad de agua y riesgo asociado con la disponibilidad del recurso (MAVDT, 2010a). Los niveles de la información y resultados del ENA 2010 son particularmente representativos para la toma de decisiones en el nivel nacional e importante referente para avanzar en el escalamiento en el orden regional y a las necesidades de información para la formulación de planes nacionales y regionales empezando por el Plan Nacional de Desarrollo (PND).

Como estrategia para la generación e integración de la información sobre el recurso hídrico y su evaluación a nivel regional el IDEAM planteó las Evaluaciones Regionales del Agua ERA. La ERA es un proceso de evaluación del agua en las regiones a partir de la actualización permanente de información y construcción de conocimiento. Se pretende que se constituya en un insumo técnico para la planificación, priorización de acciones y toma de decisiones en área de jurisdicción de las autoridades ambientales y en las unidades de análisis hídricas que la integran. Se busca que se genere información en forma sistemática y que facilite la articulación de los sistemas de información al interior de las autoridades ambientales, entre ellas y con las entidades nacionales. En este sentido el IDEAM en 2013 publicó el documento de Lineamientos Conceptuales y Metodológicos para las Evaluación Regional del Agua -2013.

El ENA incluye un sistema de indicadores para el nivel nacional y se amplía una propuesta para el nivel regional en la ERA.

Dentro los mecanismos para conformar y operar el Sistema de Información Ambiental en lo referente al recurso hídrico, el IDEAM coordina el Sistema de Información del Recurso Hídrico – SIRH. En el cual se pretende integrar información en cuanto a componentes de oferta, demanda, calidad y riesgos asociados al recurso hídrico. Toda esta información se encuentra registrada dentro del sistema de información ambiental de Colombia “SIAC”. Ver **Figura 3-12**.

El SIRH, se encarga de integrar y estandariza el acopio, registro, manejo y consulta de datos, bases de datos, estadísticas, sistemas, modelos, información documental y bibliográfica, reglamentos y protocolos que facilitan la gestión integral del recurso hídrico.

**Figura 3-12.** Sistema de información ambiental de Colombia “SIAC”.

Fuente: Sistema de información ambiental de Colombia “SIAC” <http://www.siac.gov.co/gestionagua>.

El desarrollo conceptual y metodológico para las ERA y su aplicación regional permitirán a las autoridades ambientales avanzar en el conocimiento, la disponibilidad y eficiencia en generación de información sobre el comportamiento y estado del agua en Colombia, presiones y escenarios futuros para el mejoramiento de su gestión.

Las Corporaciones Autónomas Regionales, las Corporaciones de Desarrollo Sostenible, las Autoridades Ambientales Urbanas y la Unidad Administrativa de Parques Nacionales a

---

partir de la Ley 99 de 1993 son las entidades encargadas de administrar, dentro del área de su jurisdicción, el medio ambiente y los recursos naturales renovables y propender por su desarrollo sostenible. Tienen como objeto la ejecución de las políticas, planes, programas y proyectos sobre medio ambiente (Marco general de las Evaluaciones Regionales del Agua ERA). Así como dar cumplida y oportuna aplicación a las disposiciones legales vigentes sobre su disposición, administración, manejo y aprovechamiento (Ley 99 de 1993).

Por otra parte, se lleva el registro de usuarios, el cual es un instrumento diseñado para consolidar la información de concesiones de agua y permisos de vertimiento, estandarizando la información básica requerida para el otorgamiento de los mismos en las autoridades ambientales, en el marco de los decretos 1324 de 2007 y 303 de 2012, ofreciendo la información que soporta la asignación de los mismos y que cumpla con algunas de las premisas de un registro administrativo (IDEAM & MAVDT, 2011a). La información objeto de recolección a través de este instrumento, en la medida que disminuya el subregistro y se encuentre disponible la información en el sistema de información ambiental y regional, se constituye en soporte fundamental para la evaluación permanente del agua en las regiones en relación con los componentes de demanda, calidad e indicadores hídricos, puesto que permite agregar información desde el usuario relacionada con localización de sitios de captación y usos del agua.

Por otra parte, a nivel internacional, la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), formuló para el año 2015 los principios de gobernanza del agua que se representan en la **Figura 3-13**. Estos principios han sido formulados sobre las presiones globas ejercidas sobre el agua enfocados en futuros pronósticos del estrés hídrico y demanda futura del recurso, los cuales se encuentran directamente relacionados con la seguridad alimentaria, debido a la contaminación de las fuentes hídricas y la sobre-explotación. Se espera que para el año 2050, 240 millones de personas sigan aún sin acceso al agua potable y que 1400 millones tampoco al saneamiento básico, con una inversión considerable, que se estima en USD 6,7 billones hasta el 2050, para renovar y modernizar la infraestructura de suministro de agua y saneamiento. Si a ésta se incluye una gama más amplia de la infraestructura relacionada con el agua, la factura podría triplicarse para el 2030 (OCDE, 2015c).

Los desafíos futuros del agua para hacer frente a su problemática, plantea a nivel de gobierno, quien hace qué, de que hacer y el cómo se haría. Solo se podría aprobar una política con actores acoplados, con una adecuada y accesible información con transparencia en cualquier momento. La continuidad de las políticas y su forma de adaptabilidad a circunstancias cambiantes, determinan práctica incluyentes y sostenibles a lo largo del tiempo.

**Figura 3-13.** Visión general de los principios de gobernanza del agua de la OCDE, 2015.



Fuente: OCDE, 2015.

### **3.4 Impacto sobre el agua de la Minería Artesanal y de Pequeña Escala en Segovia.**

#### **3.4.1 Calidad del agua**

El término “calidad del agua” tiene importancia en relación con el uso que se le pretenda dar, es decir, para decidir si ésta puede tener un propósito particular, su calidad debe caracterizarse en función de unos atributos físicos, químicos y biológicos, los cuales son definidos para diferentes usos. Bajo estas consideraciones, se dice que el agua está contaminada cuando sufre cambios que afectan su uso real o potencial. ICA IDEAM (2011).

La Ley de Aguas de España define la contaminación (artículo 85) como “la acción y el efecto de introducir materias o formas de energía, o inducir condiciones en el agua que, de modo directo o indirecto, impliquen una alteración perjudicial de su calidad”. En el Glosario Hidrológico Internacional se define contaminación como “Introducción en el agua de sustancias no deseables, no presentes normalmente en la misma, por ejemplo, microorganismos, productos químicos, residuos o vertidos que la hacen inadecuada para el uso previsto (Unesco, s.f.). La Directiva Marco Europea define igualmente la contaminación como “La introducción directa o indirecta, como consecuencia de la actividad humana, de sustancias o calor en la atmósfera, el agua o el suelo, que puedan ser perjudiciales para la salud humana o para la calidad de los ecosistemas acuáticos, o de los ecosistemas terrestres que dependen directamente de ecosistemas acuáticos y que causen daños a los bienes materiales o deterioren o dificulten el disfrute y otros usos legítimos del medio ambiente”. Los residuos líquidos contaminantes generados por las diferentes actividades se presentan de dos formas: puntual o difusa (no puntual). En el primer caso, la contaminación es directa a las fuentes hídricas receptoras o a los sistemas de alcantarillado y está ligada principalmente a las actividades urbanas e industriales. En el segundo la contaminación se da de forma indirecta procedente de la agricultura a través de la escorrentía superficial, subsuperficial relacionada con fertilizantes y plaguicidas, los cuales además de los efectos sobre las corrientes pueden provocar problemas de eutrofización en los lagos, embalses y contaminación de las aguas subterráneas.

En la legislación colombiana se define vertimiento como “Descarga final a un cuerpo de agua, a un alcantarillado o al suelo, de elementos, sustancias o compuestos contenidos en un medio líquido” y el vertimiento puntual como “El que se realiza a partir de un medio de conducción, del cual se puede precisar el punto exacto de descarga al cuerpo de agua, al alcantarillado o al suelo”. Igualmente define el vertimiento no puntual como “Aquel en el cual no se puede precisar el punto exacto de descarga al cuerpo de agua o al suelo, tal es el caso de vertimientos provenientes de escorrentía, aplicación de agroquímicos u otros similares” (Decreto 3930, 2010).

### **3.4.2 Monitoreo, protocolos y procedimientos de calidad del agua**

En el marco del Programa Nacional de Monitoreo del Recurso Hídrico, el MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL (MAVDT) ahora MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE (MADS), en coordinación con el IDEAM, adelanta el componente de Protocolos y Procedimientos para la Calidad del Agua. Estos protocolos se elaboran con base en una revisión y complementación de los documentos desarrollados por el IDEAM, en especial los instructivos y protocolos de muestreo y análisis de laboratorio de calidad ambiental, así como de los de INVEMAR relativos a la Red de Vigilancia de la Calidad de las Aguas Marinas y Costeras (REDCAM). Igualmente, tienen como referente recomendaciones de la Organización Meteorológica Mundial, en especial los contenidos en la Guía de Prácticas Hidrológicas de la Organización Meteorológica Mundial (WMO, 2008).

Para modelar la calidad del agua de una corriente es necesario simular los procesos de transformación de los diferentes compuestos que son vertidos a su cauce. Es decir que se deben simular el transporte y la degradación o transformación de los componentes de la calidad del agua (CVC, Universidad del Valle, s.f.).

Los modelos matemáticos de calidad del agua se utilizan para conocer los cambios resultantes en la calidad de los cuerpos de agua como respuesta a las cargas de los vertimientos, basados en el comportamiento de los contaminantes en el agua, es decir, en los cambios de sus concentraciones en el tiempo y en el espacio, los cuales dependen de las características específicas de los cuerpos hídricos y de la interacción de las sustancias contaminantes con otras sustancias presentes en el agua. Adicionalmente, los modelos son necesarios para predecir condiciones de calidad del agua en situaciones críticas o

potenciales. Dentro de los aspectos mínimos para el Ordenamiento del Recurso Hídrico que aborda la normatividad ambiental del país (artículo 6 del Decreto 3930 de 2010), la autoridad ambiental competente debe incluir la aplicación y calibración de modelos de simulación de la calidad del agua, que permitan determinar la capacidad asimilativa de sustancias biodegradables o acumulativas y la capacidad de dilución de sustancias no biodegradables y/o utilización de índices de calidad del agua, de acuerdo con la información disponible.

La Red Básica de Calidad del agua operada por el IDEAM consta de 154 puntos, los cuales son monitoreados de 2 a 4 veces por año, de manera que se refleje el comportamiento hidrológico del cauce. En caso de estaciones ubicadas en regiones con regímenes bimodales, lo deseable es que se realice monitoreo en los dos períodos de aguas bajas para encontrar el estado más crítico, y en los dos períodos de aguas altas. Si se trata de áreas con regímenes monomodales se debe monitorear en la época seca y también durante la época lluviosa. El objetivo de la Red Básica de Calidad del agua es evaluar el estado, la degradación y/o recuperación del recurso hídrico, mediante el monitoreo sistemático en estaciones representativas de la actividad económica del país y la realización de análisis fisicoquímicos que indiquen afectación por vertimientos domésticos, industriales, actividad agrícola y minería.

Los parámetros de calidad incluyen parámetros medidos in situ (temperatura, CE, pH y OD), SST, turbiedad, DQO, nutrientes (NO<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, PO<sub>4</sub>, nitrógeno total, fósforo total), sulfatos, metales pesados en agua y en sedimentos y plaguicidas (organoclorados, organofosforados y triazínicos). Los parámetros que se miden en cada estación dependen del tipo de actividades económicas que se desarrollen en las áreas de drenaje de los cauces monitoreados.

En este documento, sólo se hará referencia a los parámetros de oxígeno disuelto, coliformes fecales, cianuro total y mercurio total en la quebrada La Cianurada.

El oxígeno disuelto (OD), es importante en los cuerpos de agua ya que es un requisito nutricional esencial para la mayoría de los organismos vivos, dada su dependencia del proceso de respiración aeróbica para la generación de energía y para la movilización del carbono en la célula.

La quebrada La Cianurada, en general, presentó valores de OD superiores a 4,0mg/L cumpliendo lo establecido en la normatividad del Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible 1076 de 2015 (Artículos 2.2.3.3.4, 2.2.3.3.9 y 2.2.3.3.10). Sin embargo, el problema de contaminación de las aguas de la cuenca de la quebrada La Cianurada, se ven reflejadas en otras variables de interés sanitario como los coliformes fecales, el cianuro total, el mercurio total y los sólidos.

Los coliformes fecales (CF) en el agua son indicadores de la presencia de bacterias o virus patógenos ya que estos siempre están presentes en las heces humanas y de los animales (Sierra Ramírez, 2011). Este indicador es importante para determinar los usos potenciales del agua. Los resultados obtenidos de CF en la quebrada La Cianurada, sobrepasan lo estipulado en la normatividad colombiana para los diferentes usos el agua, reflejan el alto grado de contaminación microbiológica que se encuentra en la cuenca.

Si bien el cianuro reacciona con rapidez en el medio ambiente y se degrada o forma complejos y sales de estabildades variables, es tóxico para muchos organismos vivientes, incluso en concentraciones muy bajas. El perfil longitudinal de cianuro en la quebrada La Cianurada, a pesar de evidenciar una disminución en los valores medidos hacia aguas abajo, registra en todos los sitios concentraciones muy altas que sobrepasan los estándares de la OMS ( $>0,07$  mg/L) y pueden ocasionar problemas para la salud humana. La mayor concentración se midió en el sitio R2 en el municipio de Segovia con un valor 5,94 mg/L seguido de los sitios R3 y R4. Resultados PORH 2014.

Resultados similares se obtuvieron de mercurio total, el cual registró concentraciones muy altas en la quebrada La Cianurada, principalmente en los sitios R1 (0,186 mgHg/L), R2 (0,252 mgHg/L) y R3 (0,182 mgHg/L) en el primer monitoreo. Estas altas concentraciones de mercurio pueden ocasionar problemas para la salud como: daños al sistema nervioso, daño a las funciones del cerebro, daño al ADN y cromosomas, reacciones alérgicas, irritación de la piel y efectos negativos en la reproducción. Resultados PORH 2014.

En general, la quebrada La Cianurada presentó un alto nivel de contaminación no sólo por la concentración de la materia orgánica y por microorganismos patógenos, sino también por metales pesados y cianuro. Los sitios más afectados son los asociados al casco urbano del municipio de Segovia (R1, R2 y R3) en los que se incluye los sitios aguas abajo del vertimiento de la minera El Silencio, propiedad de la empresa Zandor Capital S.A. (R3) y

en menor grado R4, R6 y R8 en donde también, se observaron vertimientos domésticos y de minería directos a la quebrada sin ningún tipo de control. Resultados PORH 2014.

En general, el ICA para la cuenca de la quebrada La Cianurada indicó que sus aguas se clasificaron en un rango de calidad entre malo y medio. Las fuentes abastecedoras de los acueductos Marmajón (A1), Los Patios (A2), Doña Ana (A4) y el acueducto municipal de Segovia (A5), presentaron un índice de calidad ICA bueno.

El índice ICA evidenció la afectación que produce el ingreso de las aguas residuales provenientes de la actividad minera del municipio de Segovia, mostrando un grado de contaminación alto, lo que puede ocasionar problemas para la salud humana y además cohibir que sus aguas puedan ser destinadas para la mayoría de los usos establecidos en la normatividad colombiana.

Es importante resaltar que el índice ICA representa principalmente la contaminación debida a los coliformes fecales y a la contaminación por material suspendido y disuelto y no incluye en su cálculo variables como el mercurio, el cianuro, el cobre y el plomo, los cuales tienen niveles muy altos en la quebrada La Cianurada.

Aunque se tiene la Red Básica de Calidad del agua para evaluar su estado, mediante el monitoreo sistemático en estaciones representativas, no hay información suficiente para poder arrojar datos por unidades mineras, caso las MAPE para el municipio de Segovia. Es decir, Colombia dentro de sus planes de monitoreo y control, aún no cuenta como otros sistemas de medición de calidad del agua para los vertimientos de las actividades mineras, información que debe presentarse en línea, con resultados puntuales de los indicadores anteriormente mencionados en este documento. Por tal motivo, no es posible calificar el manejo que se le dé al agua en el territorio por unidades mineras de forma específica; sólo se podría revisar información general, por medio de estos estudios reportados a nivel de estado por las autoridades ambientales. Como ejemplo en otros países, caso Brasil, su sistema nacional de información sobre recursos hídricos (SNIRH), se puede controlar, verificar el uso del Recurso Hídrico y realizar acciones de mejora a los sistemas de tratamiento de cada unidad minera. El sistema SNIRH está estructurado para generar información en línea de acuerdo con los estándares internacionales del desarrollo sostenible, es una plataforma confiable, segura y de rápido acceso, portal web <https://www.snirh.gov.br/>.

### 3.4.3 Estimación de la Huella Hídrica en Segovia

Para el año 2012, J Gonzales,(3.Huella Hidrica.Pdf, n.d.), realizó una estimación de los cálculos de huella hídrica azul, verde y gris con las metodologías de “the Water Footprint assessment Manual”. La información para el estudio, fue tomada de dos minas en Segovia Antioquia, datos arrojados por Veiga en el 2010 y Corantioquia para el 2006. Este estudio en mención fue realizado en el marco del proyecto de “Huella Hídrica en la cuenca del río Porce”, liderado por el Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia (CTA), en convenio con 15 entidades nacionales e internacionales (CONSUDE)<sup>2</sup>. Su propósito fue estimar el impacto ambiental de la minería de oro mediante el indicador de la huella hídrica en el municipio de Segovia (Antioquia).

#### Huella Hídrica azul:

Los cálculos realizados para utilizar este indicador fue el de estimar los consumos de caudales de agua superficial o subterránea necesarios para la producción, en este caso del oro. Este cálculo tiene en cuenta: el agua que se evapora durante el proceso, el agua que es incorporada durante el producto, el agua que no retorna a la misma cuenca de captación, el agua que retorna a la misma cuenca de captación, pero en diferentes épocas climáticas (invierno o verano). Este indicador hace referencia al consumo de los metros cúbicos de agua por kilogramos de oro producido.

$$\text{Indicador HHA} = \frac{\text{Caudal de entrada} - \text{caudal de salida}}{\text{Producción}} \quad (1)$$

Revisando los resultados de esta investigación donde analizaron las pérdidas totales de agua en el proceso, tanto por evaporación en las piscinas de cianuración como en las pérdidas de la infraestructura de los entables, se obtiene una huella hídrica azul de 27.21 m<sup>3</sup> de agua / kg de oro producido en las 2 minas estudiadas por J Gonzales,(3.Huella

---

<sup>2</sup> Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación en Colombia

*Hídrica.Pdf*, n.d.),.Al extrapolar esta información para todo el municipio de Segovia, se genera un resultado promedio de 200.778.49 m<sup>3</sup> de agua / kg de oro producido.

### **Huella Hídrica Gris:**

Este indicador refleja un valor teórico que representa el volumen de agua necesaria para diluir la concentración del contaminante hasta el momento en que se garantice la calidad ambiental del afluente receptor. Calculándose mediante esta ecuación:

$$\text{Indicador HHG} = \frac{\text{Carga contaminante/ Producción}}{(C_{\text{max}} - C_{\text{max}})} \quad (2)$$

La carga contaminante hace referencia a la alteración en la calidad fisicoquímica del agua durante el proceso, para este caso especial el mercurio. Dentro de los resultado que obtuvo el estudio de J Gonzales,(3.*Huella Hídrica.Pdf*, n.d.). Se determinó una huella hídrica gris de 1.743 millones de m<sup>3</sup> de agua necesarios para diluir el mercurio utilizado en el municipio de Segovia, la cual comparan con la huella hídrica gris de 2047.99 (World Wide fund of Nature, 2012) millones de m<sup>3</sup> de agua por la agricultura de toda Colombia, valores de impactos muy similares. Si los procesos en las MAPE estuvieran tecnificados completamente dentro del municipio, estos valores serian inferiores, ya que tendrían recirculación de aguas, dentro de su proceso se sumarían equipos que disminuirían el uso del mercurio y un estricto monitoreo y control del recurso hídrico antes del vertimiento.

La relación entre el medio ambiente y las MAPE, podría estar predeterminada por la cultura dentro de la comunidad minera, las políticas públicas y su implementación, el territorio y las complejas áreas de las economías rurales, la educación técnica suministrada, las oportunidades de desarrollo de nuevas tecnologías, el acompañamiento del estado y las filosofías ancestrales que los representa. Los datos de estudios anteriores solo demuestran, una relación que busca la madurez, un fortalecimiento, que llevaría a conversar sobre minería sostenible, en cuanto coexista la participación del valor de los recursos naturales, en el proceso productivo del oro, caso puntual de las fuentes hídricas utilizadas. La medición de la Huella Hídrica por unidades mineras alcanzaría a desarrollar oportunidades de mejora, para el manejo y tratamiento de las fuentes hídricas intervenidas por la actividad productiva del oro, caso las MAPE.

## **4. Tecnologías limpias para implementar en la MAPE.**

Dentro de la información técnica relacionada a través del tiempo para el reemplazo del mercurio en el beneficio del oro, se tienen diferentes trabajos de investigación que se han desarrollado con la ayuda de universidades como la Universidad Nacional de Colombia, Universidad de Antioquia entre otros. Para el 2016, Perea evaluó la lixiviación de oro con solventes orgánicos, utilizando como solventes orgánicos la glicina y el glutamato monosódico en presencia de peróxido de hidrógeno y permanganato de potasio a pH alcalino. Otros estudios para el mismo año por, Gaviria (2016), analizó la oxidación electroquímica como alternativa para el tratamiento de aguas residuales del proceso de beneficio de oro con cianuro. Además de ello, Cardona (2015), estudió la degradación del cianuro con bacterias, como resultado, encontrando seis morfotipos de bacterias tolerantes y capaces de degradar las concentraciones de cianuro de 100 a 400 ppm.

De acuerdo con (Tobón, 2014) realizó su investigación en la flotación espumante directa como alternativa para el uso de mercurio, en la recuperación de oro nativo a partir de un depósito aluvial. Realizando el proceso de concentración en celda flash y celda en columna, con un 97.5% de recuperación, usando ditiofosfato di-isoamílico de sodio (DTPI) como colector e hidróxido de sodio como regulador de pH.

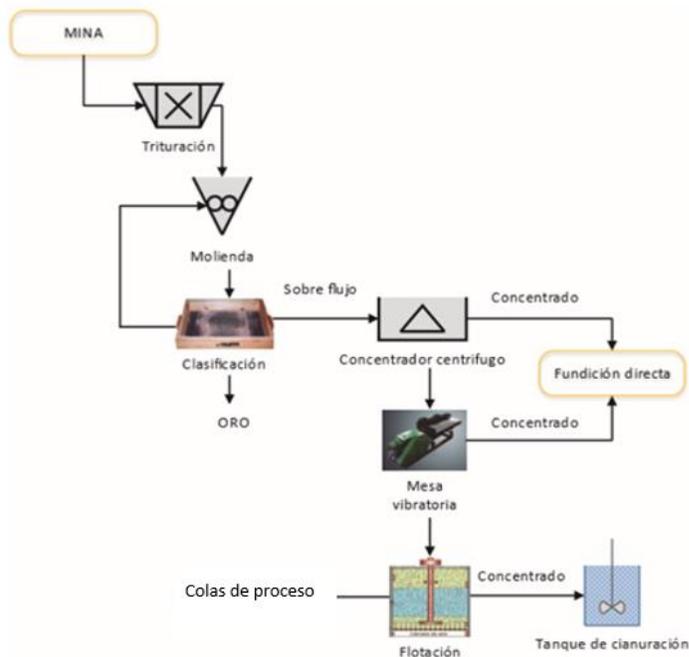
Como reemplazo del mercurio en el beneficio del oro se realizó un estudio sobre la flotación de oro nativo por (Naranjo,2012), se realizó una caracterización fisicoquímica de las superficies de oro libre, y se logró determinar un reactivo de flotación que, bajo un

escenario de flotabilidad determinado, generó una recuperación mayor al 90%, debido a la hidrofobicidad que se indujo selectivamente en las partículas de oro y de plata cuando estuvo presente.

Otros estudios realizados en el 2010, por Marcello Veiga para la Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUUDI), en visitas a Segovia y otros municipios, relacionó las cantidades de mercurio emitidos a los medioambientales acuáticos y atmosféricos con una relación de entre 19 y 76 toneladas de Hg por año.

El Centro de Investigación de Metalurgia Extractiva (CIMEX) de la Universidad Nacional de Colombia con Sede en Medellín, ha propuesto alternativas para el beneficio del mineral de filón en el municipio de Segovia, donde garantizan técnicamente un beneficio sin mercurio, mediante el uso de procesos de clasificación gravimétricos y flotación espumante.

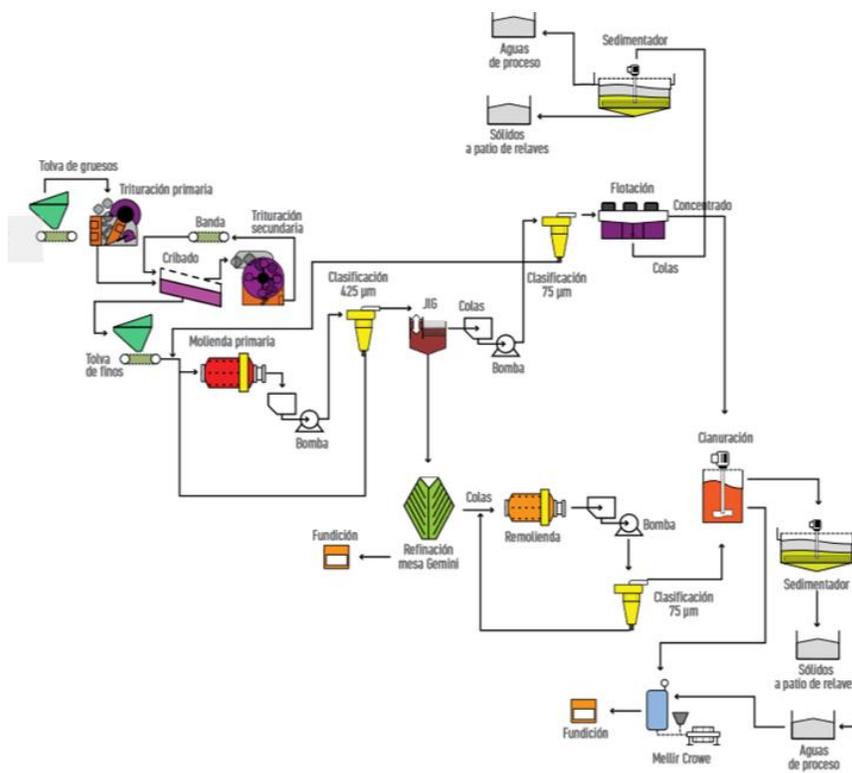
**Figura 4-1.** Circuito de producción de oro sin mercurio, propuesto por el CIMEX Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.



Fuente: Modificado de Manual del recurso hídrico Corantioquia 2016.

El Ministerio de Minas y Energía y el Servicio Geológico Colombiano, realizaron una guía metodológica para el Municipio de Remedios Antioquia donde hacen una propuesta de planta de beneficio sin el uso del mercurio, la cual se muestra en la **Figura 4-2**. Es de aclarar que estos estudios son válidos en el sentido de que su mineralogía pertenece al batolito de Segovia, la mineralización es predominantemente vetiforme, controlada estructuralmente debido a esfuerzos tectónicos originados en el sistema de fallas de Palestina y se alojan principalmente en rocas del Jurásico medio y tardío.

**Figura 4-2.** Diagrama de flujo de la planta de beneficio sugerida para la zona minera de Remedios (Antioquia).



Fuente: Servicio Geológico Colombiano 2017.

Dentro de la guía Metodológica, 2017, se concluye que con este método extractivo propuesto se obtendría una recuperación de oro del 93%. El circuito de reducción de tamaño que se acostumbra en la zona consiste en trituradora de quijadas-molino primario y barriles amalgamadores “cocos” ver **Figura 4-2**. Al no haber clasificación del producto de molienda, muchas partículas de tamaño excesivo van a la concentración, distorsionando la operación. Se plantea una preparación del material sometiéndolo a una reducción de tamaño secuencial, primero con la trituradora de mandíbulas, seguido por el pulverizador que puede ser de martillo y siguiendo con la molienda en molino de bolas.

También proponen mejorar las operaciones de concentración gravimétrica, haciendo énfasis en el tamaño de la partícula del material e implementar otro medio gravimétrico como la mesa Wilfley, el JIG o los centrífugos. Hacen énfasis en que, en la zona minera, en general, y las plantas de beneficio, en particular los entables, requieren de laboratorios para medir y controlar operativamente sus procesos.

Dentro de los estudios de coexistencia minera realizados por, (Veiga, 2020), identifica varios factores dentro de los mineros artesanales, el primero, es una desinformación de sus pérdidas dentro de los centros de procesamiento, pues propone realizar un seguimiento a sus relaves con un proceso más sofisticado gravimétrico + flotación + lixiviación que puede ser la cianuración. En los centros de procesamiento les informan que los procesos de extracción por amalgamación recuperan desde un 50% hasta un 70% del oro de sus menas, siendo no siempre cierta esta afirmación.

Otro de los factores es que presentan un problema de homogenización del mineral, para lo cual propone como se observa en la **Figura 4-3**, una planta de procesamiento independiente que pertenezca al estado, los cuales les provean de trituración primaria o secundaria, con una buena homogenización de la muestra, para generar mayor confiabilidad a la hora de realizar los análisis químicos.

**Figura 4-3.** Propuesta de proceso de innovación de Co- Existencia

Fuente: Marcello Veiga 2020.

Luego de años de estudio, (Restrepo; Veiga 2021) concluyen “desde el punto de vista técnico, parece claro que La concentración por gravedad no es la solución final para eliminar el uso de mercurio en la extracción de oro artesanal, pero puede reducir drásticamente el uso y las pérdidas de mercurio. Los concentradores de gravedad que trabajan en ciclos discontinuos, como compuertas y centrifugadoras, pueden reducir la masa de concentrado a menos del 0.1 por ciento de la masa original. Esto reduce la cantidad de material a fusionar o lixiviar. Las centrífugas con agua a contracorriente pueden concentrar cuidadosamente las partículas de oro finas y gruesas. Permiten un mayor rendimiento de mineral que cualquier otro equipo de separación por gravedad

utilizado en la MAPE y proporcionan mejores recuperaciones de oro que otros concentradores”.

Las tecnologías limpias tienen la función de eliminar algunos procesos utilizados en la antigüedad, que a su vez necesitan de mayores recursos, entre ellos el agua y sustancias químicas como es el caso del mercurio. Por ello, al utilizar concentradores gravimétricos eficientes en el proceso, además de la flotación y la lixiviación, reemplazarían el uso del mercurio, sustancia utilizada en los cocos, planchas amalgamadoras y canalones. Este proceso de beneficio planteado por las entidades mencionadas e investigadores competentes, evidencian para este mineral, una mayor recuperación de oro y un menor consumo del agua sin el uso del mercurio.

# 5. Conclusiones y recomendaciones

## 5.1 Conclusiones

- La alta demanda de los recursos hídricos en las MAPE, se vuelve mayor, en cuanto a aumentado la explotación del oro, esto debido, a la falta de otras oportunidades y en especial a la pandemia actual.
- Los datos arrojados por los indicadores hídricos en la cuenca de la Cianurada del municipio de Segovia, muestra una alta preocupación por el manejo que se le ha dado en general, evidenciando una falta de gobernanza y aplicación de los estándares internacionales. Esto acompañado de una falta de información con datos en línea en cuanto a vertimientos por el sistema nacional de información que se tiene actualmente en Colombia para la evaluación de los recursos hídricos.
- Considerando que aún gran parte de las MAPE, no cuentan con permisos de concesiones de aguas y vertimientos por parte de las autoridades ambientales, es de alta complejidad su evaluación y control, puesto que no se encuentran dentro de las estadísticas ni de los estudios realizados.
- Las acciones de mejora en las MAPE deben enfocarse en la adopción de nuevas tecnologías para la sustitución del mercurio en los procesos de beneficio del oro.
- El uso del mercurio en los “cocos” es un proceso ineficiente en el que se pierde oro y mercurio que entra en el proceso, generando así contaminación al medio ambiente y en especial a los recursos hídricos del municipio.
- Los programas internacionales en conjunto con el estado colombiano, no han tenido éxito a la hora de establecer unas políticas claras y de acompañamiento, luego de que en el tiempo no se establecen proyectos que puedan tener continuidad ni tampoco accesibilidad a la financiación de nuevas tecnologías que puedan ser adaptables para las unidades mineras.

- Deben implementarse las políticas de la gobernanza del agua, una vez que ya existen las políticas en los diferentes escenarios políticos y administrativos.
- La gobernanza del agua debe regirse bajo los estándares internacionales, donde sea clave la participación ciudadana para determinar práctica incluyentes y sostenibles a lo largo del tiempo.
- No se tienen modelos matemáticos de calidad del agua para conocer los cambios resultantes en la calidad de los cuerpos de agua como respuesta a las cargas de los vertimientos en las unidades mineras de las MAPE.
- La información arrojada por el SIAC no comprende la calidad del agua de los recursos hídricos en estudio, caso la Cuenca de la Cianurada, como tampoco un POMCA en el que se pueda identificar la planificación y acciones de mejoras que deben determinarse en conjunto con las comunidades.
- El manejo en la MAPE no es posible calificarlo en cuanto, no se cuenta con datos confiables de concesiones y vertimientos producto de dichas labores mineras; más, sin embargo, se evidencian resultados poco favorables en las mediciones que se han realizado por las autoridades ambientales, que reflejan la poca gobernanza del agua y su compromiso colectivo en la conservación del recurso hídrico.
- Debe reevaluarse la caracterización fisicoquímica y microbiológica de los afluentes priorizados en el 2014, datos que fueron utilizados para calcular la calidad del agua de la cuenca la Cianurada, con el fin de rediseñar los planes de monitoreo y seguimiento del recurso hídrico.

## 5.2 Recomendaciones

Minimizar el consumo del recurso hídrico en las MAPE con las siguientes recomendaciones:



Reducir el consumo de agua por kilogramos de mineral procesado.  
Determinación de áreas de mejora.



Maximizar el reciclaje de agua mediante nuevas tecnologías.  
Enfocarse en los tratamientos adecuados para permitir su recirculación.



Realizar acciones de mejora para los tratamientos de aguas residuales.

- Realizar mediciones periódicas del consumo del agua y su calidad tanto a las entradas como a los vertimientos por unidad minera en las MPAE.
- Cumplir los requisitos legales de disposición del agua tratada y minimizar el impacto ambiental.
- Implantar un “Sistema de Gestión Sostenible de las Aguas”, con el objetivo de reducir el consumo de agua procedente de fuentes externas mediante la puesta en marcha de un plan para el uso eficiente y sostenible de este recurso.
- Deben los actores de esta problemática ambiental, iniciar la implementación de propuestas realizadas por investigadores como Marcello Veiga, para unificar las plantas de beneficio colectivas en el municipio de Segovia, esto con el fin de mejorar los procesos de beneficio para sustituir el uso del mercurio y establecer una gobernanza sostenible enfocada en la optimización del recurso hídrico.

- Tomar la información existente, dentro de los cuales están los estudios de diferentes investigaciones realizadas por universidades, como también de científicos mencionados en capítulos anteriores; esto con el fin de, establecer una estrategia de cambio, en el proceso de beneficio del oro y eliminar o disminuir en algunos casos el uso del mercurio. Esta estrategia, debe tener un fuerte acompañamiento técnico de parte del estado colombiano, con fuentes y estructuras de financiación adaptables al territorio, en visión de una minería sostenible. Además de ello, esta propuesta enmarcaría, la gobernanza del agua como política internacional, que debe prosperar dentro de un interés general, en la conservación del recurso hídrico.
- Realizar mediciones periódicas del consumo de agua, de igual manera que la calidad de la misma, tanto a la entrada como a la salida en los procesos productivos de oro; incluyendo la recirculación interna que garantice el mínimo caudal utilizado. Para ello, se necesita tener un control del agua utilizada dentro de los socavones y el agua tomada a nivel superficial, dado que las condiciones fisicoquímicas son diferentes. Una vez medido estos valores, se debe tener control en el proceso interno de molienda y cianuración en cuanto a las mediciones de caudales necesarios y los consumos actuales por unidad minera.
- Revisar los sistemas actuales de tratamientos de agua, con el fin de compararlos con las nuevas tecnologías utilizadas, en los sistemas de tratamiento de aguas provenientes de procesos de beneficio de oro propuestos por personal idóneo en la materia.
- Suprimir el mercurio en las unidades mineras, una vez que existen otras técnicas utilizadas, como lo son los concentradores gravimétricos para la recuperación del oro propuesto por el instituto de minerales CIMEX de la Universidad Nacional.

# Bibliografía

- 3.*Huella Hídrica.pdf*. (n.d.). Professor in Water Management – University of Twente – the Netherlands Scientific Director – Water Footprint Networkl. Arjen Y. Hoekstra (2009).
- Bustamante, N., Danoucaras, N., McIntyre, N., Díaz-Martínez, J. C., & Restrepo-Baena, O. J. (2016). Review of improving the water management for the informal gold mining in Colombia. *Revista Facultad de Ingeniería*, 2016(79), 174–184.  
<https://doi.org/10.17533/udea.redin.n79a16>
- Gaviria Cartagena, A, Restrepo Baena O, & Bustamante Rúa O (2007). *NOTAS DE CLASE PROGRAMA DE LA ASIGNATURA : HIDROMETALURGIA APLICADA LINEA DE METALES PRECIOSOS*.
- Corporacion Autonoma de Antioquia. (2016). *Manual de Producción y Consumo Sostenible Gestión del Recurso Hídrico: Minería de Oro*. 73.
- Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia (CORANTIOQUIA). (2012). *Propuesta Detallada Del Monitoreo a Establecer Con El Propósito De Evaluar La Mejoras O Disminución En El Uso De Mercurio*. 2.  
[http://www.corantioquia.gov.co/sitios/ExtranetCorantioquia/ciadoc/PRODUCCION MAS LIMPIA/AIRNR\\_CN\\_9018\\_2011\\_1.pdf](http://www.corantioquia.gov.co/sitios/ExtranetCorantioquia/ciadoc/PRODUCCION MAS LIMPIA/AIRNR_CN_9018_2011_1.pdf)
- Garzón-Gutiérrez, J. M., & Rodríguez-Miranda, J. P. (2015). Gestión ambiental de aguas residuales industriales con mercurio proveniente de la minería aurífera a nivel mundial: Estado del arte. *Universidad y Salud*, 17(1), 132–144.
- Hernandez Antolin, M., Sanz Rodriguez, L., & Mancebo Piqueras, J. (2014). Tratamiento de bajo coste para aguas contaminadas por actividades de minería. *Diseño y Tecnología Para El Desarrollo*, 0(1), 131–146.
- Hoekstra, A. (2009). *Huella hídrica 2009*.

- IDEAM. (2013). *Zonificación y Codificación de Cuencas Hidrográficas* IDEAM. 46.  
<http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/022655/MEMORIASMAPAZONIFICACIONHIDROGRAFICA.pdf>
- IDEAM. (2019). *Estudio Nacional del Agua 2018*.  
[http://www.andi.com.co/Uploads/ENA\\_2018-comprimido.pdf](http://www.andi.com.co/Uploads/ENA_2018-comprimido.pdf)
- CORANTIOQUIA & CTA. (2014). La Cianurada, Q. (n.d.). *EL PLAN DE ORDENAMIENTO DEL RECURSO HÍDRICO*.
- Londoño, J. (2005). *Guía Metodológica para el Mejoramiento Productivo del Beneficio de Oro sin el uso de Mercurio*.
- Martinez, G., Restrepo-Baena, O. J., & Veiga, M. M. (2021). The myth of gravity concentration to eliminate mercury use in artisanal gold mining. *Extractive Industries and Society*, 8(1), 477–485. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2021.01.002>
- Tobón. (2013). *Estudio de la Hidrofobicidad de Oro Nativo y su Efecto en la Flotación Espumante Directa*.
- Remedios, S. Y. (2019). *CUENCA LA CIANURADA , MUNICIPIOS DE HYDROGEOLOGICAL CHARACTERIZATION OF THE CIANURADA BASIN , SEGOVIA AND REMEDIOS MUNICIPALITIES ( ANTIOQUIA- COLOMBIA )*.
- Rueda, X. (2020). *Minería de oro artesanal y de pequeña*. 2009–2014.
- UN-Water. (2021). *Summary Progress Update 2021 : SDG 6 — water and sanitation for all*. 58. <https://www.unwater.org/new-data-on-global-progress-towards-ensuring-water-and-sanitation-for-all-by-2030/>
- UNODC. Oficina de las Naciones Unidas Contra la Droga y el Delito. (2016). Explotación de oro de aluvión. *Oficina de Las Naciones Unidas Contra La Droga y El Delito*, 364. [https://www.unodc.org/documents/colombia/2016/junio/Explotacion\\_de\\_Oro\\_de\\_Alucion.pdf](https://www.unodc.org/documents/colombia/2016/junio/Explotacion_de_Oro_de_Alucion.pdf)
- Valencia, A. G., David, J., & Soto, R. (2016). Minería De Oro. *Manual de Producción y Consumo Sostenible Gestión Del Recurso Hídrico*, 73.
- Veiga, M. (2010). *Antioquia, Colombia: El lugar más contaminado con mercurio en el mundo: impresiones de dos visitas de campo*. 1–24.
- Veiga, M. M., & Fadina, O. (2020). A review of the failed attempts to curb mercury use at artisanal gold mines and a proposed solution. *Extractive Industries and Society*, 7(3), 1135–1146. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2020.06.023>
- Yu, D., & Ding, T. (2021). Assessment on the flow and vulnerability of water footprint

---

network of Beijing city, China. *Journal of Cleaner Production*, 293, 126126.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126126>