

**METODO DE MITIGACIÓN BARRERAS CORTAFLUJO EN SITIOS CONTAMINADOS CON
MERCURIO: UN ANALISIS COSTO/BENEFICIO**



MARIA ANGELICA GARCIA GENES

Director

Armando Sarmiento López

Codirector

Joan Manuel Larrahondo Cruz

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE ESTUDIOS AMBIENTALES Y RURALES
MAESTRIA EN GESTIÓN AMBIENTAL - MGA
BOGOTÁ D.C. - COLOMBIA
2023**

CONTENIDO

RESUMEN	4
1 Introducción.....	5
1.1 Planteamiento del problema	7
1.2 Pregunta de investigación	10
1.3 Alcance.....	10
1.4 Planteamiento de hipótesis	10
1.5 Justificación	10
2 Objetivos.....	12
2.1 Objetivo general	12
2.2 Objetivos específicos	13
3 Marcos de Referencia	13
3.1 Marco Conceptual	13
3.1.1 Gestión Ambiental	13
3.1.2 Toxicidad del Mercurio	14
3.1.3 Epidemiología de la Exposición al Mercurio	16
3.1.4 Valoración económica ambiental	17
3.1.5 Valoración de daños en salud	19
3.1.6 Retraso Mental Leve	20
3.1.7 Barreras Cortaflujo.....	21
3.1.8 Análisis Costo – Beneficio	22
3.2 Marco Teórico.....	22
3.2.1 Minería Artesanal y de Pequeña Escala MAPE	22
3.2.2 Cantidad de mercurio importado destinado a la producción de Oro.....	24
3.2.1 Valores permisibles de Concentraciones de mercurio	25
3.2.2 Variables que definen cómo el mercurio utilizado en la minería de oro artesanal y de pequeña escala se dispersa en el agua y llega a los seres humanos.....	27
3.3 Antecedentes.....	29
4 Metodología	30
4.1 Estimación económica de los efectos en la salud humana ante la exposición al mercurio en MAPE en Colombia.	31
4.1.1 Concentraciones de mercurio en una población objeto.....	31
4.1.2 Método de cálculo de la carga de morbilidad	34
4.1.3 Costos Profesional de rehabilitación	37
4.2 Costo Beneficio de la implementación de las Barreras Corta Flujo	37

4.2.1	Alternativa de mitigación de sitios contaminados por Mercurio	37
4.2.2	Costo Beneficio	38
4.3	Mercurio utilizado por la minería de oro artesanal y de pequeña escala.....	38
4.3.1	Mercurio utilizado en la minería de oro artesanal y de pequeña escala se dispersa en el agua y llega a los seres humanos.....	39
4.3.2	Entrevistas a mineros artesanales y de pequeña escaña en el bajo Cauca antioqueño 41	
4.4	Casos de estudio	43
4.4.1	Municipio de Yalí – Antioquia	44
4.4.2	Municipio Ayapel – Córdoba.....	46
5	Resultados y Discusiones	47
	Municipio Yalí – Antioquia:.....	47
	Municipio Ayapel – Córdoba:	49
5.1	Discusiones y Limitaciones	50
6	Conclusiones.....	52
7	Recomendaciones.....	52
8	Agradecimientos.....	53
9	Referencias	53
10	Anexos	60

FIGURAS

Figura 1.	<i>Comportamiento de las Importaciones de Mercurio 2013 - 2017</i>	24
Figura 2	Ejercicio de medición de extracción de oro	43
Figura 3	Área de Interés en el municipio de Yalí departamento de Antioquia	45
Figura 4	Área de Interés en el municipio de Yalí departamento de Antioquia	47
Figura 5	Cantidades de mercurio potenciales a ser consumidas en Yalí	48
Figura 6	Cantidades de mercurio potenciales a ser consumidas en Ayapel.....	50

TABLAS

Tabla 1.	Importaciones de mercurio 2013 – 2017	24
Tabla 2	Valores de referencia para mercurio de acuerdo con la matriz biológica de evaluación.....	26
Tabla 3	Datos del Hg utilizado y la producción obtenida	43
Tabla 4	Resultados de la estimación Costo/Beneficio	48
Tabla 5	Resultados de la estimación Costo/Beneficio	49

RESUMEN

La producción de oro realizada por actividades de minería artesanal y de pequeña escala (MAPE) emplea técnicas convencionales y uso del mercurio para la separación de metales, causando afectaciones en el ambiente y en la salud humana. La estimación de costos ambientales en la salud humana, asociados al mercurio usado en MAPE, permite evaluar posibles estrategias de control y gestión de estos problemas. El presente estudio tiene como objetivo aplicar una metodología de valoración económica ambiental para estimar los efectos de la enfermedad retraso mental leve (RML) asociada a la exposición al mercurio utilizado en MAPE en dos municipios de Colombia, y su mitigación mediante un método que evita la dispersión del mercurio en sitios contaminados: barreras cortaflujos. Para el análisis beneficio/costo, se revisaron los métodos de evaluación de impactos de la MAPE en la salud humana en diferentes contextos. En primera medida, a partir de la metodología de la Organización Mundial de la Salud (OMS), con la cual se estima la carga de morbilidad ambiental de una enfermedad a nivel nacional y regional, se calcularon costos para la sociedad debidos a la atención a personas que nacen con RML asociado a contaminación por mercurio a causa de la ingesta de pescado contaminado en la etapa de gestación y/o lactancia de la madre. Por otra parte, para el método ingenieril de mitigación mediante aislamiento de sitios contaminados con mercurio usando barreras cortaflujos, el cual potencialmente retarda durante décadas la propagación lateral de una zona contaminada, se estimó el costo asociado a la construcción de dicha infraestructura civil. Finalmente, los análisis se aplicaron a dos casos de estudio: 1) piscinas de disposición colas de MAPE en el municipio de Yalí, Antioquia, y 2) zonas con evidencia de explotación de oro de aluvión aguas arriba de la Ciénaga de Ayapel, Córdoba. La estimación económica ambiental para el RML asociado al mercurio, representa costos significativos para la sociedad, en Ayapel al ser una población con alta exposición al contaminante, los costos estimados aproximados son de \$3,407,583,490 COP para niños nacidos con esta enfermedad en un periodo de 25 años de vida útil de la barrera. Del mismo modo, para el caso de estudio en Yalí, al ser una población más pequeña y con exposición menor del contaminante, los costos estimados aproximados son de \$517,144,424 COP. Este estudio demuestra que la técnica de barreras cortaflujos es económicamente benéfica solo en casos donde la implementación tenga lugar alrededor de piscinas de colas y/o sitios puntuales de MAPE, como es el caso en Yalí, en base en que en su aplicabilidad son menores las longitudes y los costos asociados a la construcción de su infraestructura.

Palabras claves: Minería artesanal y de pequeña escala (MAPE), contaminación por mercurio, valoración económica, retraso mental leve, métodos de mitigación, barreras cortaflujos.

ABSTRACT

Artisanal and small-scale mining (ASM) gold production employs conventional techniques and the use of mercury for metal separation, causing environmental and human health impacts. The estimation of environmental costs on human health associated with the mercury used in ASM allows the evaluation of possible strategies for control and management of these problems. The present study aims to apply an environmental economic valuation methodology to estimate the

effects of mild mental retardation (MLR) associated with exposure to mercury used in ASM in two municipalities in Colombia, and its mitigation through a method that avoids the dispersion of mercury in contaminated sites: flow barriers. For the benefit/cost analysis, methods for assessing the impacts of ASM on human health in different contexts were reviewed. First, based on the methodology of the World Health Organization (WHO), which estimates the environmental disease burden of a disease at the national and regional level, costs to society were calculated for the care of people born with MLR associated with mercury contamination due to the ingestion of contaminated fish during gestation and/or breastfeeding of the mother. On the other hand, for the engineering method of mitigation through isolation of mercury-contaminated sites using flow barriers, which potentially slows the lateral spread of a contaminated area for decades, the cost associated with the construction of such civil infrastructure was estimated. Finally, the analyses were applied to two case studies: 1) ASM tailings disposal ponds in the municipality of Yalí, Antioquia, and 2) areas with evidence of alluvial gold mining upstream of the Ciénaga de Ayapel, Córdoba. The environmental economic estimate for the RML associated with mercury represents significant costs for society. In Ayapel, being a population with high exposure to the contaminant, the approximate estimated costs are \$3,407,583,490 COP for children born with this disease in a period of 25 years of useful life of the barrier. Similarly, for the case study in Yalí, being a smaller population and with less exposure to the contaminant, the approximate estimated costs are \$517,144,424 COP. This study demonstrates that the flow barrier technique is economically beneficial only in cases where the implementation takes place around tailing ponds and/or specific ASM sites, as is the case in Yalí, based on the fact that in its applicability the lengths and costs associated with the construction of its infrastructure are lower.

Key words: Artisanal and small-scale mining (ASM), mercury contamination, economic valuation, mild mental retardation, mitigation methods, flow barriers.

1 Introducción

De acuerdo con los informes de la evaluación mundial del mercurio, realizados por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (AMAP, 2018), las actividades de extracción de oro artesanal y en pequeña escala (MAPE), constituyen una práctica que se lleva a cabo en más de 70 países en el contexto global, y se estima que entre 14 y 19 millones de personas desarrollan de forma directa esta modalidad de minería, de la cual se obtiene aproximadamente entre 17 y un 20 % de la producción mundial de oro; El MAPE es una de las principales actividades con implicaciones a nivel global, debido a impactos sociales asociados y al uso del mercurio y otras sustancias como el cianuro para su proceso de extracción.

El mercurio es el producto químico más utilizado para amalgamar el oro en la MAPE, pese a los diferentes efectos adversos que genera para la salud humana, el medio ambiente y la sociedad en general. En 2015 las emisiones de mercurio relacionadas con la MAPE representan aproximadamente el 38 % de las emisiones globales (AMAP, 2018), causando riesgos para la

salud humana que se dimensionan en aspectos químicos, biológicos, biomecánicos, físicos y psicosociales (OMS, 2017a).

Según la OMS, “En términos generales hay dos grupos especialmente vulnerables a los efectos del mercurio. Los fetos son sensibles sobre todo a sus efectos sobre el desarrollo neurológico (...). El segundo grupo es el de las personas expuestas de forma sistemática (exposición crónica) a niveles elevados de mercurio (como poblaciones que practiquen la pesca de subsistencia o personas expuestas debido a su trabajo). En determinadas poblaciones que practican la pesca de subsistencia, en zonas de Brasil, el Canadá, China, Columbia y Groenlandia se ha observado que entre 1,5 y 17 de cada mil niños presentaban trastornos cognitivos (leve retraso mental) causados por el consumo de pescado contaminado” (OMS, 2017b).

Los efectos generados por la exposición al mercurio en la salud humana pueden configurar en el horizonte temporal altos costos sociales, representados principalmente en gastos en el sistema de salud. Por lo que cuantificar la carga de la enfermedad atribuible a la exposición al mercurio permite medir la magnitud del problema, y es el punto de partida para el diseño de estrategias, políticas y métodos de mitigación tendientes a la reducción de las emisiones contaminantes (concentración de mercurio) en el medio natural de sitios de explotación MAPE (Diaz et al., 2022).

Se identifica en el contexto internacional estudios como los de Pichery et al. (2012) en Francia, Bellanger et al. (2013) en Europa, Zhang et al. (2017) en China, de Bakker et al. (2021) en Brasil y Bansah et al. (2018) en Ghana, en los que se realizaron estimaciones de los costos económicos y beneficios asociados a la implementación de métodos de control para la reducción de la contaminación por mercurio y/o otros contaminantes tóxicos, algunos de ellos en sitios de explotación minera aurífera, enfocándose principalmente en las afectaciones a la salud ocasionadas por la exposición e ingesta de metilmercurio a través del consumo de pescado.

En Colombia, aunque se han presentado aportes enfocados en determinar las concentraciones de mercurio en alimentos como pescado, destacando las contribuciones de Marrugo, (2007), o Veiga et al. (2011) que han estimado las emisiones de mercurio a la atmósfera en la subregión del bajo Cauca, solo Diaz et al. (2022) llevaron a cabo una revisión sobre la carga de la enfermedad y los costos en salud por la exposición al mercurio, resaltando la importancia de avanzar en investigaciones que permitan cuantificar la carga de la enfermedad ocasionada por la contaminación con mercurio.

Diaz et al. (2022) afirma que son pocos los estudios que han estimado la carga de la enfermedad por exposición a Hg, y que algunos de estos evidencian afectaciones en la salud; la más estudiada a nivel del desarrollo neurológico es el retraso mental leve (RML) de madres en gestación y lactantes expuestos. Los efectos adversos sobre el desarrollo neurológico son el criterio más sensible de valoración de la toxicidad del metilmercurio (OMS, 2008).

Diversos estudios han demostrado la toxicidad para el desarrollo neurológico tras la exposición prenatal de los niños al metilmercurio por el consumo materno de pescado; esta exposición durante el embarazo tiene el potencial de causar daños irreparables en el sistema nervioso

central del feto, ya que tiene la capacidad de cruzar la barrera placentaria y afectar el sistema nervioso, que es más susceptible a la toxicidad del metilmercurio en comparación con el sistema nervioso de un adulto (NRC, 2000). Los efectos adversos en el desarrollo neurológico de los niños pueden manifestarse como retraso mental, alteración en el desarrollo cognitivo, dificultades en el habla, trastornos sensoriales como la ceguera y la sordera, parálisis, hiperreflexia o la persistencia de reflejos primitivos, falta de coordinación motora cerebelosa, parálisis cerebral, problemas en el crecimiento físico y deformidades en las extremidades (NRC, 2000).

Las implicaciones para una sociedad de tener niños nacidos con retraso mental leve asociado al metilmercurio abarcan aspectos de carga económica asociada a apoyos y servicios adicionales en la educación y atención médica a lo largo de su vida, además de la importancia de garantizar la inclusión de esos niños en la sociedad (Diaz et al., 2022).

Esta investigación se soporta en las metodologías utilizadas por la OMS (2008) donde se evalúa la carga de morbilidad ambiental asociada a la exposición a mercurio; de Bakker (2021) quien en su estudio identifica como consecuencia para la salud el retraso mental leve atribuibles a la exposición al mercurio en sitios donde se desarrolla minería MAPE, que constituye un problema de salud que trasciende al ámbito social debido a las implicaciones que representa en términos de productividad a lo largo de la vida de un individuo, a partir de la disminución progresiva del coeficiente intelectual de los niños de madres expuestas al Metilmercurio (MeHg); además de los aportes de la OMS (2009) en referencia a la base técnica necesaria para cuantificar la carga de la enfermedad originada por el retraso mental leve, a partir del cálculo de AVAD como indicador para realizar un posterior análisis de Costo – Beneficio en el que se contraste el resultado con los costos de implementación de la estrategia de mitigación propuesta.

De esta manera, se desarrollan tres segmentos fundamentales: en el primero, se realiza la estimación económica de los efectos en la salud humana en retraso mental leve ante la exposición al mercurio en MAPE en Colombia; el segundo, responde al análisis costo – beneficio de la implementación de barreras cortaflujo; y el tercero, es la aplicación de la metodología propuesta en dos casos de estudio con suelos contaminados con mercurio.

1.1 Planteamiento del problema

La minería artesanal y de pequeña escala (MAPE) ha sido una actividad económica significativa en Colombia, generando empleo e ingresos para comunidades locales. Sin embargo, esta actividad conlleva riesgos considerables para la salud humana y el medio ambiente debido a la liberación de metales pesados como el plomo, cadmio, mercurio y arsénico, durante el proceso de extracción y refinación de minerales (Marrugo et al., 2022; Salazar et al., 2022).

El uso de la técnica de extracción de oro con amalgamas de mercurio y descomposición térmica para la separación del metal; genera problemas ambientales: degradación de la tierra,

contaminación de fuentes hídricas, contaminación atmosférica, degradación de la salud de la fauna y a la salud de los seres humanos, sumado a deplorables condiciones sociales existentes durante la explotación y después de haber cesado las actividades mineras (Marrugo et al., 2022).

El mercurio es un metal pesado altamente tóxico que se acumula en los organismos y puede causar impactos negativos en el medio ambiente y en la salud humana, especialmente en las poblaciones expuestas crónicamente (como los trabajadores de la MAPE y las comunidades cercanas a las áreas mineras) (OMS, 2017a).

Colombia prohibió el uso de mercurio desde el año 2010, es decir, las minerías formales actualmente no usan este componente en su proceso de extracción. Sin embargo, la MAPE ha continuado su expansión, principalmente debido al aumento de los precios del oro (Betancur et al., 2018) y a otros factores socioculturales, políticos y económicos.

De acuerdo con la Agencia Nacional de Minería (2021), el sector minero en el 2020 logró la producción de oro más alta de los últimos cuatro años, estimándose en 47,6 toneladas de oro, lo que representó un incremento del 29,9 % en comparación con el año 2019 en el que se registraron 36,67 toneladas (ANM, 2021). Así mismo, según el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés) Colombia en el año 2021 produjo aproximadamente 50 toneladas de oro, convirtiéndolo en el decimosexto productor de oro a nivel mundial y el cuarto productor de oro en Suramérica, lo que nos demuestra la expansión que ha tenido este sector (USGS, 2022).

Para la Contraloría General de la República un 85 % del oro que exporta Colombia es producto de la minería ilegal (Contraloría, 2022). El auge de la minería artesanal a pequeña escala (MAPE), como economía de subsistencia, ha incrementado los impactos ambientales y socioeconómicos. Aunque el uso del mercurio es ilegal en muchos países, incluido Colombia, en la MAPE el proceso de amalgamación (utilizar mercurio con minerales auríferos para obtener una amalgama) para la recuperación de oro todavía se utilizaba ampliamente debido a la simplicidad del método (Veiga et al., 2018), lo que contrasta con lo que se vivencia en la actualidad, donde a partir de la entrada en vigencia de la Ley 1658 de 2013, se empezó a controlar la libre comercialización del mercurio y se ha presentado un aumento significativo en los precios del metal, que de acuerdo con la observación en sitios de explotación MAPE (trabajo de campo) ha pasado de \$2000 a \$50.000 pesos por onza aproximadamente.

El problema radica en la toxicidad del mercurio que, tanto en forma inorgánica como el mercurio elemental (Hg) al igual que en forma orgánica como el metilmercurio (MeHg), es tóxico. El primero causa daño renal y pulmonar, y el segundo (metilmercurio) es un potente agente en contra de la función neuronal, que además se propaga por las cadenas tróficas; sumado a ello, una vez el mercurio elemental se emite a la atmósfera durante el proceso de amalgamación para el beneficio minero aurífero, se oxida y se deposita mayoritariamente en los suelos y aguas

circundantes (Wang et al., 2020a). Debido a sus características y composición química, el mercurio no se degrada, por lo cual los tratamientos para minimizar su dispersión una vez liberado al medio ambiente se basan en la remoción, disposición o inmovilización (estabilización o encapsulamiento) de un sitio contaminado con mercurio.

Los métodos de mitigación utilizados para reducir la contaminación por mercurio en suelos contaminados varían según el tipo de contaminación y las características del sitio en cuestión; entre los cuales está la remediación física, tratamientos químicos, fitorremediación, biorremediación y barreras de ingeniería (Mallma et al., 2021). El método aislamiento con barreras cortaflujo propuesto en este estudio, pretende retardar durante décadas la propagación lateral de una zona del subsuelo contaminada con mercurio, con una vida útil de 25 años. Sin embargo, en términos de costos, a pesar de que si se han estimado métricas de sostenibilidad en el caso de otros contaminantes, no se conoce su relación costo beneficio de su implementación.

A pesar de la creciente conciencia sobre los riesgos asociados con la exposición al mercurio en la MAPE, existe una falta de herramientas efectivas para evaluar y comunicar los costos económicos de estos efectos en la salud humana. En Colombia, no se encuentran estudios relacionados con estimaciones de los impactos económicos, lo que dificulta la toma de decisiones informadas por parte de los actores clave, como las autoridades gubernamentales, las empresas mineras y las comunidades afectadas. Además, no cuenta con regulación específica sobre sitios contaminados (Arias et al., 2018). La comisión COMTEMA, conformada por las Contralorías latinoamericanas, concluyó recientemente que Colombia se encuentra en niveles muy bajos en cuanto a marco normativo, asignación de recursos y remediación de pasivos ambientales (Grupo de Expertos de Pasivos Ambientales, 2020).

La exposición al mercurio en la MAPE representa un riesgo para la salud de los mineros artesanales, ya que utilizan el metal para la extracción de oro debido a su capacidad para amalgamar. Sin embargo, esta práctica tiene consecuencias ambientales y para la salud humana, que se establecen a través de impactos en la salud de las comunidades involucradas, generando afectaciones a largo plazo, principalmente en el sistema neurológico; además, del deterioro de la calidad ambiental y los ecosistemas subyacentes. Por tanto, en el contexto de esta modalidad de explotación aurífera surgen desafíos y necesidades en términos de control de emisiones de mercurio, regulación, adaptación del sistema de salud y establecimiento de políticas públicas de intervención ambiental en los sitios con mayores índices de contaminación.

El problema de este estudio se basa en determinar si la inversión económica y los esfuerzos requeridos para implementar el método de "aislamiento con barreras cortaflujo" en sitios contaminados con mercurio en Colombia están justificados en términos de los beneficios de salud que se espera.

1.2 Pregunta de investigación

¿Cuál es la relación costo-beneficio de una medida para mitigar el efecto ambiental de suelos contaminados con mercurio usando el método de “aislamiento con barreras cortaflujo” en Colombia?

1.3 Alcance

El alcance de este estudio se enfoca en evaluar la relación entre el costo y los esfuerzos necesarios para llevar a cabo la implementación del método de aislamiento con barreras cortaflujo en suelos contaminados por mercurio en Colombia, y la justificación de estos en función de los beneficios esperados en términos de disminución a la exposición a suelos y agua contaminados por mercurio y sus efectos en la salud de un grupo de personas. Específicamente, el objetivo central es investigar si los costos y recursos dedicados a la implementación de esta estrategia de mitigación son proporcionales y adecuados en comparación con los beneficios potenciales en la salud de la población afectada.

Los efectos sobre la salud se estudian específicamente sobre la enfermedad de retraso mental leve, analizando en detalle cómo la implementación de las barreras cortaflujo puede contribuir a la reducción de la prevalencia y gravedad de esta enfermedad. En este contexto, se consideran los aspectos económicos, médicos y de salud pública, con el fin de proporcionar una evaluación integral que permita tomar decisiones informadas sobre la implementación de dicha estrategia en los sitios afectados por la contaminación de mercurio en Colombia.

1.4 Planteamiento de hipótesis

Hipótesis Principal: El beneficio generado por el método de mitigación es mayor a su costo de implementación.

Hipótesis Nula: El costo del método de mitigación es mayor al beneficio.

1.5 Justificación

Ante la gravedad de la problemática asociada al uso indiscriminado de mercurio en la producción aurífera MAPE, Colombia no ha desarrollado prácticas de análisis costo-beneficio, ni estimación de sostenibilidad para gestión de sitios contaminados (Arias et al., 2018). Un estudio reciente estimó que los costos morales, legales y económicos asociados a conflictos ambientales en

minería de carbón en Cesar, son mayores que el costo comercial del carbón exportado (Cardoso, 2015), y otro estudio calculó los daños causados por actividad petrolera histórica sobre comunidades en Bolívar, con énfasis en recursos hídricos y pesqueros (Moreno & Ussa, 2008), pero en relación al mercurio destinado a la producción de MAPE, no existe avance en la consolidación de un sistema que permita estimar mediante un análisis costo – beneficio, la pertinencia de implementar acciones de mitigación.

En Colombia, son escasos los estudios técnico-científicos sobre sitios contaminados (Acosta et al., 2008). Por ejemplo, un estudio en 2015 encontró 1843 sitios potencialmente contaminados, principalmente por minería (42%), hidrocarburos (24%) y residuos domiciliarios (14%) (Arias et al., 2018). La contaminación por mercurio derivada de minería informal, ilegal y artesanal constituye una amenaza para la salud pública y de los ecosistemas (Acosta et al., 2008; Arias et al., 2018). En 2014, varios ministerios desarrollaron el Plan Único Nacional de Mercurio (Minminas, Minambiente, et al., 2018) el cual busca “lograr la reducción y eliminación progresiva del uso del mercurio en todo el territorio nacional” mediante gestión pública interinstitucional.

El desarrollo de acciones de remoción, disposición y/o remediación en sitios contaminados con mercurio (SCM), aunque deseable, pueden ser prohibitiva en términos de costo; por lo tanto, el encapsulamiento y aislamiento de SCM se considera una alternativa para mitigar significativamente la amenaza a ecosistemas y comunidades. En particular, las barreras cortaflujo verticales subsuperficiales (Wang et al., 2020a) son una posibilidad de tecnología efectiva y económica para aislar y retardar durante décadas la propagación lateral de una zona contaminada, para este caso una vida útil de 25 años, incluso facilitando la eventual implementación de medidas de mitigación.

Considerar la aplicación de este método de mitigación hace necesaria una estimación costo/beneficio, donde se contemple el beneficio ambiental, social y económico de su aplicabilidad frente a la alternativa de no intervención; brindando una herramienta pertinente al gobierno o entidades regionales colombianas para la regulación de sitios contaminados con mercurio (Minambiente et al., 2018).

Es preciso dimensionar los efectos o impactos que este tipo de actividad minera genera, no solo en el ecosistema, sino en el desarrollo humano de las poblaciones arraigadas en área geográfica de explotación aurífera artesanal (Bansah et al., 2018). Ante la observación e identificación de los riesgos asociados a la contaminación con mercurio como consecuencia de la explotación informal, ilegal de oro y MAPE, se plantea la existencia de costos derivados de este tipo de actividad, que se enmarcan en el valor económico que implica la atención de problemas de salud ocasionados en las personas a causa de la contaminación con mercurio.

Al implementar una técnica o procedimiento de mitigación para contrarrestar los impactos negativos de la contaminación con mercurio, se espera la obtención de beneficios potenciales

representados en: la reducción de los costos generados al Sistema de Salud por la atención y tratamiento de patologías derivadas de la contaminación con mercurio, disminución de los costos sociales representados en la oferta institucional para promover programas de educación diferencial para la población con déficit cognitivo y reducción de los costos económicos que implica la recuperación de los ecosistemas: suelo, hídrico, atmosfera, fauna y flora (Cadavid et al., 2020).

Autores como De Bakker et al. (2021) consideran los impactos económicos en la salud humana por el uso de mercurio en la minería ilegal en la Amazonía brasileña. Su evaluación de los impactos en la salud, incluido el retraso mental leve, resalta los daños causados por el mercurio y cuantifica las pérdidas económicas.

La investigación es relevante porque permitirá una estimación económica de los impactos ambientales por causa del mercurio utilizado en MAPE (representados en la disminución de costos del sistema de salud, específicamente en la enfermedad de Retraso Mental Leve) y de los costos en los que incurre la posible implementación de la alternativa de mitigación, es decir, establecer una razón costo beneficio. Proporcionará a las partes una base sólida para comprender y evaluar los impactos económicos de la exposición al mercurio, lo que a su vez podría fomentar la adopción de medidas de mitigación más efectivas y la formulación de políticas más informadas en relación con la MAPE y la salud humana. Además, esta herramienta podría contribuir a la sensibilización pública sobre los riesgos y costos ocultos de la MAPE, lo que podría motivar un cambio hacia prácticas más sostenibles y seguras en la industria minera, por ejemplo, la propuesta de Veiga (2018) para micromineros en Colombia, en la implementación de equipos simples y asequibles para concentrar oro utilizando materiales disponibles localmente que se encuentran en depósitos de chatarra y talleres de metal, logrando en los ensayos tasas de recuperación de oro que oscilan entre el 30% y 80%, con una variabilidad relativa de acuerdo con las toneladas procesadas por día.

2 Objetivos

2.1 Objetivo general

Estimar una relación Costo/Beneficio que permita evaluar el método “aislamiento con barreras cortaflujo” como posible medida de mitigación ambiental de sitios contaminados por mercurio.

2.2 Objetivos específicos

- Implementar una herramienta de cálculo para la estimación económica del efecto en la salud humana ante la exposición de poblaciones expuestas al mercurio en MAPE en Colombia.
- Estimar la relación Costo/Beneficio del método de mitigación “aislamiento con barreras cortaflujo”.

3 Marcos de Referencia

Este marco aborda la estimación de costos y beneficios asociados con la remediación y gestión de sitios contaminados por mercurio a través de la implementación del método de aislamiento del mercurio mediante barreras cortaflujo; abordando impactos en la salud de poblaciones afectadas en relación con la contaminación por mercurio.

La actividad minera de extracción de oro conlleva efectos en los ecosistemas, ya que en ocasiones las prácticas empleadas no cumplen con los estándares ambientales y legales establecidos por los países o regiones pertinentes. Por lo tanto, la realización de este estudio implica la exploración de investigaciones previas relacionadas con las repercusiones de la exposición humana al mercurio proveniente de la MAPE.

3.1 Marco Conceptual

La estimación económica de los efectos en la salud humana ante la exposición al mercurio en la Minería Artesanal y de Pequeña Escala (MAPE) en Colombia requiere un enfoque interdisciplinario que involucre conceptos de toxicología, economía de la salud, epidemiología y minería:

3.1.1 Gestión Ambiental

La gestión ambiental desempeña un papel fundamental en el enfoque y desarrollo de este estudio. En su esencia, este estudio se fundamenta en comprender y abordar los desafíos asociados a la contaminación por mercurio en sitios de explotación minera de pequeña escala (MAPE) en Colombia desde una perspectiva integral de gestión ambiental, tomando como casos de estudio municipios entre el departamento de Antioquia y Córdoba. Lo que implica la planificación, coordinación y ejecución de estrategias destinadas a minimizar los impactos negativos de la actividad humana en el entorno natural y la salud de las poblaciones (Marrugo et al., 2022).

En este contexto, el estudio busca analizar la viabilidad de la implementación del método de "aislamiento con barreras cortaflujo" como una medida de mitigación para reducir la liberación de mercurio en el ambiente y sus consecuencias en la salud de las personas. Esta aproximación se inscribe directamente en la gestión ambiental al proponer una acción concreta para controlar y reducir la contaminación, protegiendo tanto el medio ambiente como la salud humana.

Además, la gestión ambiental implica considerar una amplia gama de factores interconectados, tales como aspectos económicos, sociales, normativos y políticos. Este estudio, al abordar la relación entre la inversión económica y los beneficios de salud esperados, no solo contempla los aspectos médicos y de salud pública, sino también aspectos socioeconómicos, evaluando la relación costo-beneficio y la toma de decisiones informadas (Marrugo et al., 2022).

En resumen, la gestión ambiental es el marco conceptual que guía la perspectiva multidimensional de este estudio, ya que busca encontrar soluciones efectivas para los problemas de contaminación por mercurio en la minería de pequeña escala en Colombia, considerando tanto los impactos ambientales como los beneficios socioeconómicos y de salud (Arias et al., 2018).

3.1.2 Toxicidad del Mercurio

La toxicología es el estudio de la manera en que sustancias naturales o los fabricados por el hombre producen efectos nocivos en los organismos vivos; así mismo, la toxicidad describe el grado en el cual una sustancia puede causar una lesión. La toxicidad depende de diferentes factores: dosis, duración y ruta de exposición, forma y estructura de la sustancia química misma y factores humanos individuales (ATSDR, 2019).

La toxicidad del mercurio es un campo que se enfoca en comprender los efectos perjudiciales que este metal pesado puede tener en la salud humana. Comprender los diferentes tipos de mercurio, sus rutas de exposición y sus efectos en la salud humana. Analizar cómo el mercurio se acumula en el cuerpo y causa daños a nivel neurológico, cardiovascular y renal. Las siguientes definiciones son tomadas del curso "Efectos del mercurio en la salud y en el ambiente y consideraciones bajo el Convenio de Minamata sobre Mercurio (edición 2021 - con tutoría)" (OMS, 2021).

El mercurio es un elemento químico que existe en diferentes formas y compuestos, y su exposición puede provenir de diversas fuentes:

Tipos de Mercurio:

- **Mercurio Elemental (Hg⁰):** Es la forma más común de mercurio gaseoso. Puede ser liberado a la atmósfera principalmente por actividades industriales, como la quema de

carbón. Una vez liberado, puede transformarse en mercurio inorgánico a través de procesos químicos.

- **Mercurio Inorgánico:** Incluye el mercurio elemental que se ha transformado en compuestos inorgánicos, mediante la combinación con elementos tales como en cloro, azufre u oxígeno, como el mercurio inorgánico divalente.
- **Mercurio Orgánico:** Incluye compuestos de mercurio en los que el mercurio está unido a moléculas orgánicas. El metilmercurio, que es el resultado de la transformación química del mercurio inorgánico disponible en medios terrestres y acuáticos, que a través de procesos biológicos se transforma en metilmercurio, bioacumulable en las cadenas tróficas, por lo tanto, una de las fuentes alimenticias para los humanos donde se puede encontrar es en pescados y mariscos.

Rutas de Exposición: Las principales vías de exposición al mercurio incluyen:

- **Inhalación:** La exposición al mercurio elemental ocurre a menudo por inhalación de vapores liberados por actividades industriales y/o en la quema de amalgamas en la extracción artesanal de oro. El mercurio inorgánico también puede ser inhalado.
- **Ingestión:** La exposición al mercurio inorgánico y orgánico puede ocurrir al consumir alimentos contaminados, principalmente pescados y mariscos, así como otras fuentes alimentarias que contengan concentraciones de metilmercurio.
- **Contacto Dérmico:** Si bien es menos común, el mercurio también puede ser absorbido a través de la piel en algunas situaciones.

Acumulación en el Cuerpo y Efectos en la Salud: Una vez en el cuerpo, el mercurio puede acumularse en varios tejidos y sistemas(Minsalud, 2022), lo que con el tiempo puede dar lugar a efectos adversos en la salud. Los principales sistemas afectados incluyen:

- **Sistema Nervioso:** El metilmercurio tiene una afinidad por el tejido nervioso y puede cruzar la barrera hematoencefálica. Puede causar daño a nivel neurológico, especialmente en el desarrollo del cerebro en niños en gestación y durante la infancia; puede llevar a problemas de aprendizaje, retrasos en el desarrollo y deterioro cognitivo.
- **Sistema Cardiovascular:** La exposición crónica al mercurio también puede estar relacionada con problemas cardiovasculares, como hipertensión arterial y daño a los vasos sanguíneos.
- **Sistema Renal:** El mercurio puede acumularse en los riñones y causar daño renal, esto puede afectar la función de filtración y excreción de toxinas del cuerpo.
- **Otros efectos:** Además de los efectos en el sistema nervioso, cardiovascular y renal, la exposición crónica al mercurio también puede tener impactos en otros sistemas, como el sistema inmunológico y el sistema reproductivo.

La exposición al mercurio en sus diversas formas puede tener efectos graves en la salud humana. Es importante comprender las diferentes vías de exposición y los efectos acumulativos para tomar medidas preventivas y limitar la exposición a este metal tóxico, especialmente en poblaciones vulnerables como mujeres embarazadas, niños y comunidades expuestas a actividades mineras y de procesamiento que liberan mercurio en el ambiente (OMS, 2008).

3.1.3 Epidemiología de la Exposición al Mercurio

La epidemiología es una disciplina científica que se dedica a estudiar la distribución y los determinantes de las enfermedades y los problemas de salud en las poblaciones humanas (Beaglehole et al., 1993). En el contexto de la exposición al mercurio, la epidemiología desempeña un papel fundamental en cómo comprender la exposición a este metal se relaciona con los efectos en la salud humana.

- **Investigaciones Epidemiológicas:** Las investigaciones epidemiológicas sobre la exposición al mercurio se basan en la recopilación de datos sobre la exposición de diferentes poblaciones a través de diversas fuentes, como el consumo de alimentos contaminados, la inhalación de vapores industriales o la cercanía a fuentes de liberación de mercurio. A través de estas investigaciones, se busca establecer relaciones causales entre la exposición al mercurio y los efectos en la salud.
- **Dosis-Respuesta:** Un aspecto esencial de la epidemiología de la exposición al mercurio es comprender la relación dosis-respuesta. Esto significa analizar cómo la magnitud de la exposición al mercurio se relaciona con la probabilidad y la gravedad de los efectos en la salud. En general, se espera que a medida que aumente la dosis de exposición al mercurio, aumenten los riesgos para la salud.
- **Identificación de Poblaciones Vulnerables:** La epidemiología también se centra en identificar grupos de población particularmente vulnerables a los efectos negativos de la exposición al mercurio. Estos grupos pueden incluir mujeres embarazadas, fetos en desarrollo, lactantes, niños pequeños y personas con enfermedades crónicas preexistentes. Estos pueden ser grupos más susceptibles debido a su etapa de desarrollo, sus sistemas inmunológicos inmaduros o su mayor absorción de mercurio en comparación con adultos (OMS, 2021).
- **Duración e Intensidad de la Exposición:** Las investigaciones epidemiológicas buscan comprender cómo la duración y la intensidad de la exposición al mercurio se relacionan con los efectos en la salud. Por ejemplo, una exposición crónica y prolongada a bajas concentraciones de mercurio podría tener efectos acumulativos diferentes en comparación con una exposición aguda a concentraciones más altas. Estos aspectos ayudan a diseñar estrategias de mitigación y regulación más efectivas (OMS, 2021).

- **Estudios de Cohortes y Casos-Control:** Los estudios epidemiológicos pueden llevarse a cabo utilizando diferentes diseños, como estudios de cohortes y estudios de casos-control. En los estudios de cohortes, se sigue a una población expuesta y no expuesta a lo largo del tiempo para evaluar los efectos en la salud en función de la exposición al mercurio. En los estudios de casos-control, se comparan individuos con efectos adversos en la salud (casos) con individuos sin efectos (controles) para analizar la exposición previa al mercurio (OPS, 2002).

La epidemiología del mercurio implica el estudio de cómo la exposición a este metal se relaciona con los efectos en la salud humana. Esto se logra a través de investigaciones que analizan la dosis-respuesta, identifican poblaciones vulnerables y consideran la duración e intensidad de la exposición. La información recopilada a través de estas investigaciones es crucial para la formulación de políticas y estrategias de prevención (OMS, 2008).

Aunque en Colombia existe información sobre el uso y la contaminación por mercurio, cada vez se han venido desarrollando estudios sobre mediciones de las concentraciones de este elemento en agua, suelo, humanos. Sin embargo, es cierto que los estudios epidemiológicos son muy escasos (Verbel, 2010).

3.1.4 Valoración económica ambiental

La economía ambiental se encuentra interrelacionada con la economía de la salud cuando se trata de evaluar los impactos de la contaminación y los riesgos ambientales en la salud humana. En el caso específico de la exposición al mercurio y su impacto en la salud, la economía de la salud se une con la economía ambiental para entender cómo los efectos en la salud causados por la exposición al mercurio en su forma orgánica (metilmercurio) florecen los aspectos económicos y ambientales (Vargas, 2005).

Familiarizarse con los conceptos económicos relacionados con la salud, como los costos directos (tratamientos médicos) e indirectos (pérdida de productividad laboral y calidad de vida disminuida) permite comprender cómo se valora la salud en términos monetarios y cómo se cuantifican los efectos a lo largo del tiempo (Minambiente et al., 2018).

La economía de la salud se ocupa de analizar cómo los recursos se asignan para promover la salud y tratar enfermedades en una sociedad. En el contexto de la exposición al mercurio y sus efectos en la salud humana; juega un papel fundamental al cuantificar los costos y beneficios asociados con los impactos en la salud y la calidad de vida (Minambiente et al., 2018). Aquí se exploran los conceptos clave de la economía de la salud relacionados con la exposición al mercurio:

Costos Directos e Indirectos:

- **Costos Directos:** Estos incluyen los gastos médicos directos necesarios para detectar y tratar los efectos en la salud causados por la exposición al mercurio. Esto puede abarcar visitas médicas, tratamientos, medicamentos, hospitalizaciones y terapias de rehabilitación (OMS, 2008).
- **Costos Indirectos:** Se refiere a los impactos económicos que no están directamente relacionados con los gastos médicos, pero que resultan de los efectos en la salud. Esto puede incluir la pérdida de productividad laboral debido a la incapacidad para trabajar, así como la disminución de la calidad de vida (OMS, 2008).

Valoración Monetaria de la Salud: La valoración económica de los efectos en la salud debido a la exposición al mercurio implica asignar un valor monetario a estos efectos. Para la metodología de valoración ambiental económica (Minambiente et al., 2018) utilizada en este estudio se sigue la siguiente línea:

- 1) Valoración de Costos Evitados o inducidos (Costos en Salud):** Son aquellos métodos que buscan estimar los costos evitados por las personas gracias a un mejoramiento de la calidad ambiental o los inducidos debido a un detrimento de la misma; consiste en calcular los costos que se evitarían si se tomaran medidas para prevenir o reducir los efectos en la salud causados por la exposición al mercurio. Esto puede incluir ahorros en gastos médicos y pérdida de productividad.
- 2) Valoración de la morbilidad** a través del enfoque de costo de la enfermedad se estima la variación de los gastos incurridos por los individuos como resultado de un cambio en la incidencia de una enfermedad en particular. Tanto los costos directos (por ejemplo, los costos de las visitas al médico, los costos de tratamiento, etc.), como los costos indirectos (por ejemplo, salarios), se incluyen en la estimación.
- 3) El método de carga de enfermedad utilizado es la Valoración de Años de Vida Ajustada por Discapacidad (AVAD),** este enfoque mide los años de vida ajustados por la calidad de vida. Se considera la cantidad y la calidad de los años de vida y el tiempo vivido con dicha discapacidad en función de la salud. Del mismo modo, los impactos en la salud debido a la exposición al mercurio no siempre son inmediatos; pueden manifestarse a lo largo del tiempo. La economía de la salud utiliza herramientas como la tasa de descuento para evaluar los costos y beneficios en el futuro en términos de su valor presente.

3.1.5 Valoración de daños en salud

La valoración de los daños en la salud en términos económicos es un componente esencial de la economía de la salud y la evaluación de políticas y decisiones relacionadas con la salud y el medio ambiente. Permite estimar el valor económico de los efectos sobre la salud y comparar los costos y beneficios de diferentes acciones y políticas.

De acuerdo con Romero (2014), se utiliza la definición propuesta por la OMS que concibe la carga de la enfermedad como el impacto de un problema de salud en un área específica medida por la mortalidad y la morbilidad, usualmente cuantificada en términos de años de vida ajustados por discapacidad (AVAD). La carga global de la enfermedad se puede considerar como un indicador de brecha entre el estado de salud actual y el estado de salud ideal, donde vive el individuo hasta la vejez libre de enfermedad y discapacidad. Estas medidas permiten la comparación de la carga de la enfermedad de diferentes regiones, naciones o localidades y también se han utilizado para predecir los posibles impactos de las intervenciones realizadas para mejorar la salud de la población (Romero, 2014).

De esta forma, (Romero, 2014) distingue las ventajas de utilizar el indicador carga de la enfermedad por factores ambientales, identificando su utilidad en la fijación de prioridades en los servicios de salud; estandarización de la medida para establecer la magnitud de los problemas de salud, evaluar y planificar las actividades e intervenciones del sector; comparar y cuantificar las desigualdades de las condiciones de salud entre dos poblaciones en igual periodo de tiempo; identificar grupos o segmentos poblacionales vulnerables; analizar los beneficios de las intervenciones para su uso en análisis de costo – beneficio.

Años de Vida Ajustados por Discapacidad AVAD:

El indicador “Años de Vida Ajustados por Discapacidad” AVAD es una medida sintética del estado de salud de la población que tiene dos dimensiones: el tiempo perdido por morir antes de lo que se tenía previsto según la expectativa de vida (Años de Vida Perdidos o AVP) y el tiempo vivido con una discapacidad (Años Vividos con Discapacidad o AVD), es decir, los AVAD son un indicador compuesto que combina la mortalidad y la morbilidad (Murray, 1994).

La OMS ha adoptado por utilizar el indicador AVAD para medir la carga de las enfermedades a nivel internacional desde mediados de la década de los noventa, convirtiéndose en una herramienta que, pese al subjetivismo para medir la severidad de enfermedades y secuelas, puede representar estimaciones confiables frente al riesgo asociado a la salud humana (OMS, 2008).

Así mismo la OMS propone un método para la Evaluación de la carga de morbilidad debido a la exposición prenatal al metilmercurio en grupos poblacionales de alto riesgo, donde se explican las relaciones entre la exposición y el riesgo, en el cual solo se está teniendo en cuenta los trastornos del desarrollo neurológicos causados por la exposición prenatal al metilmercurio, causante de Retraso Mental Leve.

3.1.6 Retraso Mental Leve

Los autores definen el conjunto de variables necesarias para el cálculo de los AVAD en relación con el Retraso Mental Leve, lo que permite establecer las características sociales de los riesgos en la salud en sitios contaminados por mercurio, toda vez, que se requiere la incorporación de información demográfica y otros valores establecidos por la OMS de acuerdo con las investigaciones desarrolladas en distintos contextos.

Los efectos del mercurio asociados al retraso mental leve pueden estar relacionados con la exposición crónica al metilmercurio, que es una forma orgánica de mercurio que puede afectar el desarrollo neurológico, especialmente en etapas tempranas de la vida. Una descripción más detallada de cómo la exposición al mercurio podría estar relacionada con el retraso mental leve (González et al., 2014) es:

- Impacto en el desarrollo cerebral: La exposición al metilmercurio puede interferir con la formación normal del cerebro en desarrollo, especialmente durante la gestación y en los primeros años de vida. Esto puede llevar a cambios en la estructura cerebral y en la conectividad neuronal que, a su vez, pueden afectar diversas habilidades cognitivas y de desarrollo.
- Dificultades cognitivas y de aprendizaje: La exposición al metilmercurio se ha asociado con dificultades en el aprendizaje y en las funciones cognitivas en general. Los niños expuestos al mercurio pueden presentar dificultades en áreas como la memoria, la atención, la resolución de problemas y la adquisición de nuevas habilidades.
- Retraso en el desarrollo de habilidades motoras y del lenguaje: Además de los aspectos cognitivos, la exposición al mercurio también puede influir en el desarrollo de habilidades motoras finas y gruesas, así como en el desarrollo del lenguaje. Estas dificultades pueden contribuir a un retraso en el desarrollo general de los niños.
- Variabilidad individual: La susceptibilidad a los efectos del mercurio puede variar de una persona a otra. Algunos individuos pueden ser más sensibles a los efectos tóxicos del mercurio debido a factores genéticos u otras condiciones de salud.

Es importante tener en cuenta que el retraso mental leve puede ser causado por múltiples factores además de la exposición al mercurio. Las influencias genéticas, el entorno familiar, la nutrición y otros factores ambientales también pueden desempeñar un papel en el desarrollo cognitivo.

Los efectos en el desarrollo neurológico debidos a la exposición prenatal al metilmercurio están ampliamente registrados y pueden utilizarse para evaluar los impactos en la salud de una población. En una evaluación de la inocuidad de metilmercurio en los alimentos, la OMS declaró que «se consideró al desarrollo neurológico el resultado de salud más vulnerable, y a la vida intrauterina, el periodo de exposición más sensible»(FAO/OMS, 2004).

Coeficiente Intelectual

El coeficiente intelectual (CI), conocido también como cociente intelectual, es un valor numérico que resulta de la aplicación de una evaluación estandarizada diseñada para evaluar las habilidades cognitivas de un individuo en comparación con su grupo de edad. Es un índice global que emplean frecuentemente las pruebas de inteligencia para puntuar habilidad general de inteligencia de un sujeto (Abregú, 2017). La Organización Mundial de la Salud (OMS) clasifica la inteligencia límite según el Coeficiente Intelectual (CI), obtenido en la aplicación de una escala de inteligencia mediante un proceso de evaluación neuropsicológica, situado por debajo de la media o normalidad, es decir, un CI entre 70 y 85 (Alvarán et al., 2016).

Los déficits cognitivos de los lactantes se representan como pérdidas de puntos de CI causadas por la exposición prenatal al metilmercurio. La carga de morbilidad se evalúa utilizando la distribución de las concentraciones de mercurio en el cabello de las embarazadas o de las mujeres en edad fértil como medida de la exposición de los lactantes. Aunque es probable que los descensos pequeños del CI no sean visibles a escala individual, pueden ser importantes en una población con una alta exposición o entre los aquejados de enfermedades endémicas que afectan a las funciones neurológicas. El mayor impacto poblacional de estos descensos se da entre los niños con un CI inmediatamente superior a 69, en los que la pérdida de puntos de CI supondría presentar un retraso mental leve (definido como un CI de entre 50 y 69 puntos). (Axelrad et al., 2007).

3.1.7 Barreras Cortaflujo

Las Barreras de contención construidas con escoria-cemento-bentonita son la forma más común de barrera vertical contra contaminantes en suelo en el Reino Unido, Europa y Japón, y se utiliza cada vez más en Estados Unidos (Joshi et al., 2010).

Esta tecnología controla la propagación de partículas procedentes de terrenos contaminados y rellenos o vertederos de residuos peligrosos, actúan como barreras en sitio para confinar los

contaminantes dentro de un área cerrada. Su baja conductividad hidráulica redirige el flujo de aguas subterráneas para evitar la migración de contaminantes a través del transporte de aguas subterráneas. Los muros de barrera suelen tener unos 0,6 metros de ancho y menos de 12 metros de profundidad. A menudo dichos muros se construyen in situ utilizando escoria, cemento y bentonita o lechadas de lleno de tierra y bentonita (Huang et al., 2021).

Estas barreras son una tecnología que consiste en una construcción vertical que encapsula el contaminante, aislando y retardando durante décadas la propagación lateral de una zona contaminada (Huang et al., 2021). La aplicabilidad de la barrera en suelos contaminados con mercurio podría aportar una potencial disminución a amenazas al medio ambiental y a la salud humana.

3.1.8 *Análisis Costo – Beneficio*

El análisis costo-beneficio es una herramienta fundamental en la toma de decisiones y la evaluación de políticas y proyectos, ya que permite cuantificar y comparar de manera sistemática los impactos económicos de una acción propuesta (Raffo Lecca, 2015). Para este estudio se estiman los costos y beneficios que resultarían de la implementación del método de "aislamiento con barreras cortaflujo". Esto implica, cuantificar los costos y beneficios en términos de unidades monetarias (por ejemplo, pesos) poder compararlos de manera uniforme; se realiza un análisis de los costos y beneficios monetarios para determinar si la inversión en la implementación del método en mención está justificada en términos de los beneficios esperados. Se compara la suma de los beneficios monetarios con la suma de los costos monetarios para determinar si hay un saldo positivo neto.

Con base en los resultados del análisis costo-beneficio y la evaluación de sensibilidad, se toma una decisión informada sobre la viabilidad de la implementación del método de "aislamiento con barreras cortaflujo". Si los beneficios monetarios superan los costos, la medida podría estar económicamente justificada.

3.2 Marco Teórico

3.2.1 *Minería Artesanal y de Pequeña Escala MAPE*

De acuerdo con el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS & PNUD, 2012), la Minería Artesanal y de Pequeña Escala MAPE es el conjunto de actividades de explotación minera en el que se integran formas de producción ejercidas desde la informalidad, con muy poca

capacidad de gestión y baja aplicación de tecnología, donde, además, no se interiorizan los impactos y efectos generados sobre el medio ambiente.

De manera análoga, cabe incorporar el término de minería ilegal descrito en la Ley 685 del 2001 como todo tipo de trabajos de exploración, extracción o captación de minerales que se realice sin el respectivo título minero, lo que de acuerdo con la (UNODC, 2021) representa el 69% de la producción total de oro de aluvión en Colombia. Categoría dentro de la cual, puede anidarse la producción MAPE dado que por sus características sociales, culturales, técnicas y ambientales, no registra título de explotación minera.

La Minería Artesanal y de Pequeña Escala (MAPE) es una actividad significativa en Colombia, especialmente en áreas rurales y remotas. Contribuye a la generación de empleo y a la economía local en muchas regiones. Sin embargo, debido a su naturaleza informal y a menudo no regulado, también puede tener impactos negativos en términos de salud, medio ambiente y seguridad laboral (Marrugo et al., 2022).

La MAPE se caracteriza por la extracción de minerales utilizando métodos tradicionales y manuales. Suele involucrar a comunidades locales, mineros individuales o pequeños grupos. Los mineros artesanales pueden carecer de acceso a tecnologías modernas y de buenas prácticas de minería sostenible, lo que aumenta los riesgos para la salud y el medio ambiente.

En Colombia, la MAPE está regulada por normativas específicas que buscan establecer reglas para su operación y reducir sus impactos negativos (Ley 1658, 2013). A pesar de la existencia de estas regulaciones, la MAPE en Colombia a menudo se enfrenta a desafíos en términos de cumplimiento debido a la informalidad de la actividad, la falta de recursos para la supervisión adecuada y otros factores socioeconómicos. El gobierno colombiano ha trabajado en iniciativas para promover la formalización y el cumplimiento de estas normas en la MAPE, con el objetivo de reducir los impactos negativos en la salud humana y el medio ambiente (Marrugo et al., 2022).

De acuerdo con la OMS (2017), la minería artesanal y de pequeña escala, representa una compleja interacción de factores sociales, económicos, tecnológicos, medioambientales y de salud que pueden sufrir alteraciones de acuerdo con las características específicas del contexto local, regional y nacional en que se desarrollen. Por tal motivo, existe cierta variabilidad en el establecimiento de una definición que represente de manera uniforme el concepto que reside en este tipo de explotación aurífera, que son relacionadas por la OMS en su documento sobre la minería aurífera o de pequeña escala y la salud, desde la perspectiva de diferentes organizaciones y entidades (OMS, 2017a).

Las comunidades de MAPE se caracterizan por desarrollar en su gran mayoría actividades de tipo ilegal o informal, de manera permanente o estacional y abarcando por lo general grandes extensiones de territorio en sitios alejados de los grandes centros poblados. De igual manera, la

MAPE representa en el contexto global el medio de subsistencia para familias asentadas en zonas de explotación aurífera, incorporando la fuerza laboral de hombres, mujeres e incluso niños. Además, al distribirse las labores al interior y en los alrededores de la mina, se incrementa el riesgo de generar problemas en la salud de los mineros, sus familias y las comunidades aledañas, especialmente por el uso indiscriminado de mercurio en el proceso de producción de oro. En ese sentido, MAPE suele ser sinónimo de subdesarrollo y pobreza, puesto que las interacciones sociales de producción se presentan dentro de un contexto de informalidad, lejos de la regulación e intervención estatal, lo que conlleva a fenómenos que alteran el bienestar y la calidad de vida de los mineros, sus entornos y las comunidades del territorio (OMS, 2017a).

3.2.2 Cantidad de mercurio importado destinado a la producción de Oro

Colombia es un país que no produce mercurio; se asume que todo el que se encuentre dentro del territorio nacional, proviene de importaciones (Ley 1658, 2013). Por tanto, en aras de consolidar información y avanzar en la cuantificación de las variables objeto de estudio, es preciso dimensionar las cantidades de mercurio importadas a Colombia. En Colombia hasta el año 2018 el uso del mercurio para minería fue legal, por lo que, para obtener valores referenciales se acude a las cifras que muestra el Plan Estratégico Sectorial del Mercurio sobre las importaciones de mercurio entre los años 2013 y 2017 (Mincomercio, 2018).

Figura 1. Comportamiento de las Importaciones de Mercurio 2013 - 2017

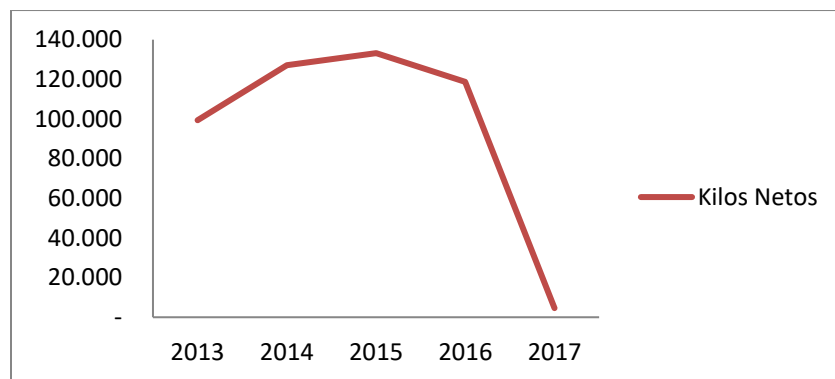


Tabla 1. Importaciones de mercurio 2013 – 2017

Año	2013	2014	2015	2016	2017
Kilos Netos	99.440	127.167	133.206	118.805	4.605

Fuente: (Ministerio de Comercio, Industria y Turismo, 2018)

Como se observa en la tabla y figura anterior, existe una tendencia creciente en las importaciones de mercurio hasta el año 2015, donde se ubica el mayor volumen de entrada al país de manera legal de este producto. A partir de ese año, se observa una disminución progresiva debido a la entrada en vigencia de sistemas regulatorios que limitan la comercialización y uso de mercurio en diferentes actividades, entre ellas la explotación minera, específicamente en la producción de oro.

Para el caso colombiano, las iniciativas legislativas tendientes a mejorar la calidad ambiental a partir de la erradicación progresiva del uso de mercurio en actividades de explotación minera, se sintetizan con la promulgación de la Ley 1658 de 2013 en la que se definen los lineamientos e instrumentos de política pública para proteger y salvaguardar la salud humana y preservar los recursos naturales renovables y el ambiente a partir de la regulación del uso del mercurio en la minería (producción aurífera).

3.2.1 Valores permisibles de Concentraciones de mercurio

Para la estimación de la contaminación por mercurio a causa de la ingesta de pescado de poblaciones en riesgo, es preciso conocer los valores de tolerables establecidos por las diferentes entidades reguladoras de alimentos a diferentes escalas, tomando como referencia lo que establece la OMS, la FAO, la Unión Europea y el Ministerio de Salud en Colombia. Lo anterior, va a facilitar el análisis de la cantidad de mercurio que ingresa al organismo de los seres humanos y sus potenciales efectos nocivos en la salud de los mismos.

- **Límites máximos de concentración mercurio en pescado:** La seguridad alimentaria es una prioridad fundamental en la sociedad actual, y el consumo de pescado desempeña un papel crucial en la dieta de muchas personas en todo el mundo. Sin embargo, en la medida que la contaminación ambiental se convierte en un problema global, surge la necesidad de establecer medidas que protejan a los consumidores de los riesgos asociados con la ingesta de contaminantes en los alimentos. Uno de los contaminantes que merece atención especial es el mercurio, un metal pesado tóxico que puede acumularse en los cuerpos de agua y, posteriormente, en los peces que los habitan.

Los efectos adversos para la salud humana derivados del consumo de pescado contaminado con mercurio han llevado a la implementación de límites máximos permisibles en las concentraciones de este metal en el pescado. Estos límites son regulaciones establecidas por agencias de salud y organismos gubernamentales con el

propósito de salvar la salud de los consumidores al reducir la exposición a niveles dañinos de mercurio y otros contaminantes similares.

En Colombia mediante Resolución 122 de 2012 del Ministerio de Salud y Seguridad Social, los límites de concentración de mercurio en pescado son de 0,5 µg/g para las especies no depredadoras y de 1,0 µg/g para especies depredadoras (µg/g), equivalentes a 500 ppb y 1000 ppb respectivamente.

- **Valores de referencia de las matrices biológicas:** La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha establecido biomarcadores de referencia como herramientas cruciales para evaluar la exposición humana a diversos contaminantes y sustancias tóxicas presentes en el medio ambiente. Estos biomarcadores permiten a los científicos y profesionales de la salud determinar la presencia y concentración de sustancias en el cuerpo humano, brindando una visión más precisa de la exposición y sus posibles impactos en la salud.

Los valores de referencia de las matrices biológicas son indicadores que la OMS ha identificado como puntos de referencia clave para la evaluación de la exposición humana a contaminantes específicos. Estos biomarcadores son herramientas importantes para evaluar la exposición humana al mercurio y sus posibles efectos en la salud. Algunos de los biomarcadores de referencia recomendados por la OMS para el mercurio incluyen:

Concentraciones de mercurio en sangre: Las concentraciones de mercurio en la sangre proporcionan una indicación de la exposición reciente o a corto plazo a este metal tóxico.

Concentraciones de mercurio en orina: Los niveles de mercurio en la orina reflejan la exposición acumulativa a lo largo del tiempo y son especialmente útiles para evaluar la exposición crónica.

Concentraciones de mercurio en cabello: El cabello puede acumular mercurio de forma continua a lo largo del tiempo, por lo que las concentraciones en el cabello pueden brindar información sobre la exposición a largo plazo.

Tabla 2 Valores de referencia para mercurio de acuerdo con la matriz biológica de evaluación

Matriz	Expuesto ocupacional	Unidad de medida	Expuesto ambiental	Unidad de medida
Orina	25	µg/L	7	µg/L
Sangre	15	µg/L	5	µg/L
Cabello	5	µg /g	1	µg /g

Fuente: (WHO et al., 2008)

- **Ingesta Admisible:** El Comité Mixto FAO/OMS de Expertos en Aditivos Alimentarios (JECFA, por sus siglas en inglés) estableció una ingesta tolerable de 1,6 µg MeHg/kg de peso corporal por semana (con un peso corporal de 60 kg) para la población en general, incluyendo niños, niñas y mujeres en embarazo. Este nivel de exposición no genera efectos neurotóxicos adversos apreciables en los fetos en los hijos de mujeres expuestas durante el embarazo, considerándose suficiente para la protección del feto en desarrollo (FAO/OMS, 2004).

3.2.2 Variables que definen cómo el mercurio utilizado en la minería de oro artesanal y de pequeña escala se dispersa en el agua y llega a los seres humanos

Según de Bakker et al. (2021) , desde la cantidad de oro extraído es posible conocer la cantidad de mercurio utilizado, la proporción de mercurio liberado en agua y suelo y emitido a la atmósfera, y la proporción de mercurio que se transforma en metilmercurio (metilación), mediante las siguientes variables:

- **Proporción de mercurio utilizado en la extracción de oro:** Para la separación del oro fino con las arenas se realiza el proceso de amalgamación utilizando mercurio, el cual, forma una aleación metalizada llamada amalgama. Según la literatura la cantidad de mercurio utilizado en este proceso varía a nivel mundial, dependiendo de las diferentes formas en como realizan la extracción del mineral, el proceso de la amalgamación y los sistemas normativos (AMAP, 2018) .
- **Proporción de mercurio liberado en el agua y el suelo y emitido a la atmósfera:** El mercurio utilizado para la extracción del oro es emitido en la atmósfera y liberado en suelos y agua como lo confirma Veiga (2011) en su estudio desarrollado en Antioquia, donde la liberación se produce como resultado del proceso de quema de amalgama de oro realizada en asentamientos urbanos sin ningún sistema de filtrado o condensación; lo que proporciona otra perspectiva al análisis planteado por De Bakker que utiliza en esta proporción únicamente las liberaciones a suelo y agua, ya que lo que se busca es comprender los efectos del metilmercurio en la salud humana mediante la ingesta de pescado contaminado. Así como también por sus características y efectos esperados en la disminución de mercurio en el suelo y agua ante la implementación de las barreras cortaflujo.

En la Amazonia Brasileira la proporción de mercurio liberado en agua y suelo oscila entre 12% y 35% lo que se caracteriza por la existencia de controles ambientales (de Bakker et al., 2021); mientras que, en Ecuador esta proporción corresponde a valores que se encuentran entre

14,9% y 39,7% con una media de 29%, donde también existen controles ambientales para recuperar mercurio luego del proceso de amalgamación (Colon, 2010).

La proporción de mercurio liberado a agua y suelo, según el informe de Evaluación Mundial de Mercurio (AMAP, 2018), en el contexto global el 55% del mercurio es liberado a suelos y agua, mientras que, para Colombia se sitúa en el 71%.

- **Proporción de mercurio que se transforma en metilmercurio:** Un porcentaje de la proporción de mercurio liberado en suelo y agua, en el medio acuático se transforma en un compuesto orgánico llamado metilmercurio, el cual puede ser directamente bioacumulado por organismos acuáticos y biomagnificado a través de la cadena alimenticia. Se estima que cerca del 90% de todo el metilmercurio presente en los alimentos, es absorbido a través del sistema digestivo tanto en seres humanos como en animales (Español, 2012), cifra que es corroborada por la OMS (2017) que manifiesta que la tasa de absorción de metilmercurio generalmente supera el 90%.

La contaminación con metilmercurio genera preocupación generalizada en la medida en que se considera que este compuesto orgánico, tiene una toxicidad más alta que la del mercurio inorgánico, incrementando el riesgo para la salud humana ante la ingesta de alimentos contaminados, específicamente pescado, con afectaciones al sistema nervioso central, lo que puede causar pérdida de coeficiente intelectual en los niños y enfermedades cardiovasculares (OMS, 2008).

En base a la literatura de Bakker et al. (2021) evidencia que la tasa de metilación está asociada al nivel del pH del medio acuático, potencial redox, altos niveles de carbono orgánico disuelto que favorece la oxidación y metilación del mercurio, entre otros grupos presentes con los cuales el mercurio puede formar complejos estables (Jiménez, 2005a); la tasa de metilación puede variar entre 3% y el 22% (de Bakker et al., 2021).

De Bakker asume un valor conservador para la región Amazonas una tasa de metilación del 3%, donde el pH del río Amazonas es de 8.02. Para cada zona y/o región se requiere tener en cuenta dichas características y establecer una estimación de la tasa de metilación, teniendo en cuenta variaciones del pH; es decir, entre mayor sea el pH, menor es la tasa de metilación.

Para la cuenca baja del Río Cauca de acuerdo con Jiménez (2005) el Sistema de Información del Medio Ambiente de los Países de la Comunidad Andina, en el bajo Cauca Antioqueño el pH de se ubica en 7,63 lo que conduce a inferir que se puede utilizar una tasa de metilación superior debido a que la evidencia indica que la disminución del pH del agua aumenta la tasa de transformación del mercurio en metilmercurio.

3.3 Antecedentes

En la revisión sistemática no se encontró información sobre la problemática en estudio en Colombia, a nivel internacional existen una serie de investigaciones en las que se plantea análisis costo – beneficio para establecer la carga de las enfermedades provocadas por la exposición al mercurio y las afectaciones que ello implica en la salud humana. La mayoría de los estudios encontrados brindan información sobre métodos de remediación para disminuir la contaminación por mercurio, costos en la salud de enfermedades causadas por el mercurio en el cuerpo humano, efectos en el medio ambiente y sistemas sociales de la contaminación por mercurio, como se mencionan a continuación:

Los estudios de Gould (2009) y Pichery et al. (2012) se centran en los beneficios económicos y sociales de abordar problemas de contaminación. Gould demostró la implementación de controles para la pintura con plomo y cuantificó beneficios al invertir en control de la contaminación por plomo, demostrando que la inversión produce beneficios sustanciales y ahorro neto significativo por cada unidad monetaria. Por otro lado, Pichery et al. (2012) evaluaron los beneficios de la exposición prenatal al mercurio, mostrando que los esfuerzos para reducir la exposición al metilmercurio generan beneficios sociales y económicos al prevenir impactos a largo plazo en la salud y el desarrollo neurológico de los niños.

En línea con estos enfoques, Bellanger et al. (2013) también considerando beneficios económicos en su estudio sobre la prevención de la neurotoxicidad del metilmercurio. Evalúan la inversión en controles para reducir la exposición al mercurio, concluyendo que esta inversión conlleva una reducción significativa en costos ambientales y sociales debido a la contaminación por mercurio.

Zhang et al. (2017) analizan los beneficios para la salud de controlar las emisiones de Hg en China y países vecinos. Su enfoque económico considera costos de enfermedad y valor de vida estadística. Esta perspectiva económica para evaluar el costo-beneficio del control del mercurio resalta la reducción de costos asociados a la atención médica y el mejoramiento de las condiciones de vida.

Bansah et al. (2018) exploran los impactos socioeconómicos y ambientales de la minería artesanal en Ghana. A pesar de que su enfoque es diferente al de los estudios previos, también ponen de manifiesto los impactos perjudiciales en la salud y la sociedad, lo que refuerza la necesidad de abordar la contaminación.

De Bakker et al. (2021) considerando los impactos económicos en la salud humana por el uso de mercurio en la minería ilegal en la Amazonía brasileña. Su evaluación de los impactos en la salud, incluido el retraso mental leve, resalta los daños causados por el mercurio y cuantifica las pérdidas económicas.

Finalmente, el análisis de Diaz et al. (2022) resalta la necesidad de cuantificar los impactos negativos en la salud y los costos económicos debido a la exposición al mercurio. Su revisión de la carga de la enfermedad subraya la importancia de formular políticas y estrategias de exposición para minimizar el costo de la carga de la enfermedad en zonas afectadas por mercurio.

En resumen, estos estudios abordan los aspectos económicos y sociales relacionados con la contaminación por mercurio, desde la estimación de beneficios hasta la cuantificación de costos y la necesidad de su implementación.

4 Metodología

El estudio se desarrolló en primer lugar, utilizando la metodología “Evaluación de la carga de morbilidad ambiental a nivel nacional y local” y la hoja de cálculo propuestas por la OMS 2008 obtenidas mediante una comunicación oficial (ver anexo C), donde a partir de la media de concentraciones de mercurio en cabello en la población objeto y su desviación estándar, y mediante el cálculo de la carga de morbilidad asociada a la enfermedad de retraso mental leve efecto de dicha contaminación, se calcula una estimación del impacto.

En caso de no contar con los datos de las concentraciones en la población objeto y a su vez generar datos comparativos, mediante la metodología propuesta por de Bakker et al. (2021), y datos de concentraciones de mercurio en los peces de una población objeto y la ingesta promedio de dicho alimento, se aplican relaciones propuestas para obtener un valor estimado de las concentraciones de mercurio en el cabello de la población.

En segundo lugar, se realizó un análisis Costo Beneficio del método de mitigación ambiental de barreras corta flujo propuesto por la tesis financiada parcialmente por el proyecto con ID 20467 de vicerrectoría de investigación de la PUJ, realizado por la estudiante Doctoral en Ingeniería Hebenly Celis.

Con el fin de generar información que contribuya al análisis y discusión de los resultados, mediante la metodología propuesta por de Bakker et al. (2021), se realizó una estimación aproximada de cómo y cuánto del mercurio utilizado en la minería de oro llega a los seres humanos por medio de la ingesta de pescado mediante la cantidad de oro producido en un municipio específico. Así mismo, con el fin de complementar la información del uso del mercurio en MAPE, se realizaron entrevistas en la zona del Bajo Cauca a pequeños mineros.

Aplicando la metodología descrita se tuvieron en cuenta dos (2) casos de estudio para evitar la mitigación hipotética de la propagación del mercurio: El primero es en el municipio de Yalí, Antioquia implementando el método de mitigación en un depósito de relave (embalse de colas) de una zona minera específica; el segundo caso es en el municipio de Ayapel, Córdoba implementando el método en el perímetro de las áreas identificadas mediante herramientas con

imágenes satelitales como explotación de oro de aluvión (EVOA) aguas arriba de la ciénaga de Ayapel.

Por último, se concluye sobre la efectividad de la implementación del método de mitigación para sitios contaminados por mercurio por MAPE en Colombia, que aporte información para la toma de decisiones en áreas similares.

4.1 Estimación económica de los efectos en la salud humana ante la exposición al mercurio en MAPE en Colombia.

Teniendo en cuenta que el método de mitigación Barreras Cortaflujo, bajo los supuestos que aísla la totalidad del mercurio y retarda durante 25 años la dispersión del contaminante en los suelos y aguas, lo que disminuiría hipotéticamente los niveles de concentración de mercurio en la cadena trófica hasta llegar a los seres humanos como MeHg; por lo que, para este caso de estudio solo se están teniendo en cuenta la toxicidad del Metilmercurio. Así mismo, considerando que los efectos de este compuesto son sobre el sistema nervioso, toxicidad para el desarrollo neurológico y efectos cardiovasculares; para efecto de este estudio solo se están teniendo en cuenta la toxicidad para el desarrollo neurológico debido al acceso a información secundaria cuantitativa sobre los parámetros a tener en cuenta para cuantificar la carga de morbilidad de efectos asociados.

Este estudio se basará en la metodología propuesta por la OMS en el año 2008, en la cual estiman la carga de morbilidad de la pérdida de coeficiente intelectual inducida por el mercurio asociado a retraso mental leve, siendo necesarios valores de media y desviación estándar de las concentraciones de mercurio en el cabello de una población.

Dichos valores son proporcionados por la literatura en regiones de interés y/o debido a que es una estimación se pueden utilizar valores de regiones cercanas con condiciones de explotación minera donde se hayan realizado muestras de concentración de metilmercurio en el cabello.

Con la finalidad de generar datos comparativos, en un escenario conservador se cuantifica los impactos en la salud por medio de la ingesta de mercurio, como se describe a continuación:

4.1.1 Concentraciones de mercurio en una población objeto

Teniendo en cuenta la dinámica del uso del mercurio y los posibles vacíos que se tienen en cuanto a la recolecta de información, un método para obtener el promedio de los niveles de

concentraciones de mercurio en cabello de una persona es inferirlo en función del consumo diario de pescado contaminado, lo que nos indica la cantidad de mercurio en una persona que conducirá a efectos negativos en la salud humana. Con base a este consumo individual se puede calcular cuántas personas se pueden ver afectadas con el mismo nivel de contaminación dentro de un área impactada dada (de Bakker et al., 2021).

Absorción del mercurio metilado por los peces: El metilmercurio (MeHg) es una de las formas orgánicas más tóxica del mercurio, la cual es fácilmente bioacumulada y biomagnificada en las cadenas alimenticias (Marrugo et al., 2007). El MeHg en ambientes acuáticos se forma principalmente por biometilación del mercurio depositado en los sedimentos; en ese sentido, mediante la cadena trófica el metilmercurio se encuentra presente en los peces, y una de las principales fuentes de exposición humana al metilmercurio es la ingesta de pescado. Estudios en Colombia, como el desarrollado en la Ciénaga de Ayapel en el 2009 arrojó mercurio en especies de peces con concentraciones media de $0.74 \pm 0.19 \mu\text{g/g}$ de peso fresco, y la menor concentración especies con $0.15 \pm 0.02 \mu\text{g/g}$ de peso fresco, teniendo en cuenta que algunas especies de peces acumulan más Hg que otras (Gracia et al., 2009).

Para esta variable es importante conocer el promedio de concentraciones de metilmercurio en pescado que es potencialmente consumido por las poblaciones a analizar.

La estimación de la contaminación por mercurio a causa de la ingesta de pescado se compara con valores tolerables establecidos por las diferentes entidades reguladoras de alimentos a diferentes escalas, tomando como referencia lo que establece la OMS, la FAO, la Unión Europea y el Ministerio de Salud en Colombia, con niveles máximos de concentración en pescado permisibles $1.0 \mu\text{g/g}$ y $0.5 \mu\text{g/g}$ para peces depredadores y no depredadores, respectivamente (FAO, 1995).

Ingesta diaria de pescado y MeHg: El cálculo de la ingesta diaria promedio de mercurio por persona está relacionado con factores contextuales del lugar que está siendo afectado por la minería (de Bakker et al., 2021).

Según las conversiones de MeHg dadas por la OMS (2008), la ingesta diaria de mercurio puede estimarse utilizando los datos de concentración del mercurio en el pescado, la cantidad de pescado que consume una persona y su peso corporal, como se indica a continuación:

$$I = \left[P * \frac{Cm * Cont}{W} \right] - e \quad (2)$$

Donde:

I: Ingesta diaria promedio de mercurio en unidades de $\mu\text{g}/(\text{kg de peso corporal})/\text{día}$

P: Proporción de población expuesta al mercurio debido a la minería artesanal de oro en el Municipio en estudio (%).

Cm: Consumo promedio de pescado por día (g/día)

Cont: Contaminación promedio en pescado ($\mu\text{g}/\text{g}$ pescado)

W: Peso corporal (kg)

e: Constante de eliminación en $\mu\text{g}/(\text{kg de peso corporal})/\text{día}$

Los consumos promedios de pescado son dependientes de las regiones, ya sea en poblaciones ribereñas o en grades centros urbanos, o por los hábitos alimenticios en la región. Este valor está dado por la revisión en la literatura de estudios de consumo de pescado en los municipios y/o región de cada caso de estudio.

La contaminación promedio en pescado ($\mu\text{g}/\text{g}$ pescado) está dada también por estudios en las zonas. Para el cálculo de la ingesta diaria de mercurio típicamente se asume un peso corporal (pc) de 65 kg para adultos; así también, siendo 65 kg un peso aproximado de una mujer embarazada y una constante de eliminación del mercurio en el cuerpo humano de $0,014 \text{ g Hg por día}^{-1}$ (OMS, 2008).

Cambios en el nivel de metilmercurio en el cabello de una persona: Es importante resaltar que cerca del 90% del total del metilmercurio que se encuentra presente en productos alimenticios, es absorbido por el tracto gastrointestinal de los seres humanos y animales (Español, 2012). En concordancia y de acuerdo con numerosos estudios previos, se ha podido demostrar que el pescado es la principal fuente de exposición al metilmercurio (MeHg) en humanos (Argumedo et al., 2013), por lo que este producto representa un elemento fundamental para este análisis, en la medida que se logre determinar asertivamente la ingesta promedio de este por tipo de población en cada área de estudio.

El nivel de mercurio en el cabello de las personas es un importante indicador de la magnitud, riesgo y prevalencia de la exposición al mercurio para determinada población. Se tiene evidencia de que la fijación del mercurio en el cabello conserva relación directa con los niveles de concentración en la sangre, que se establece a partir de la ingesta del pescado, su metabolización en la sangre y su ubicación en el folículo capilar (Raiman et al., 2014).

El riesgo reside en el consumo elevado de pescado contaminado, traducido en valores de concentración de mercurio en cabello, que se encuentren por encima de los admisibles en el contexto internacional de $1 \mu\text{g}/\text{g}$ de cabello como lo estableció en la Organización Mundial de la Salud (WHO et al., 2008). Así mismo, se estableció que una ingesta diaria media de $0.1 \mu\text{g}/\text{kg}$ peso corporal de metilmercurio conduce a una concentración de $1.0 \mu\text{g}/\text{g}$ de

metilmercurio en el cabello, por lo que mediante esta relación es posible estimar cómo influye la extracción de oro en la concentración de metilmercurio en el cabello (OMS, 2008). Con referencia al límite admisible, se supone que aquellos que se encuentren por encima pueden ser consecuencia directa de una mayor ingesta de pescado contaminado.

Por lo tanto, para estimar cómo influye el consumo de pescado contaminado con mercurio y la absorción de metilmercurio en los seres humanos, se utiliza la siguiente fórmula:

$$F = \frac{I}{0.1} \quad (4)$$

donde:

F = Concentración de metilmercurio en el cabello ($\mu\text{g/g}$)

I = Ingesta media diaria de mercurio ($\mu\text{g/kg pc/día}$)

Así, para utilizar este dato de concentraciones de mercurio en el cabello, y dado a que esta metodología no expresa una desviación estándar, se utiliza el mismo coeficiente de variación de concentraciones de mercurio en el cabello tomadas por la literatura.

4.1.2 Método de cálculo de la carga de morbilidad

a. Tasa de Incidencia del Retraso Mental Leve inducido por el mercurio

La OMS (2008) presenta una guía que utiliza la relación dosis-respuesta para estimar cuantitativamente la carga de morbilidad de la pérdida de puntos de CI inducida por el metilmercurio. Dado que dicha pérdida no se considera una enfermedad, el efecto adverso sobre la salud se define como la pérdida de puntos de CI que se traduce en un retraso mental leve. En las poblaciones humanas, la inteligencia adopta aproximadamente una distribución normal, con una media de 100 puntos de CI y una desviación estándar de 15 puntos de CI ((NRC, 2000). Existe retraso mental leve (RML) cuando el CI está comprendido entre 50 y 70 puntos.

El número de lactantes que se desplazarían a la categoría del RML si se diera una determinada exposición al metilmercurio se estima a partir de la media y la desviación estándar de las concentraciones de mercurio en el cabello de las madres de la población. La pérdida de puntos de CI se cuantifica suponiendo una relación lineal sin umbral entre cada 1 $\mu\text{g/g}$ de aumento de la concentración de mercurio en el cabello materno y el descenso de 0,18 puntos en el CI (Axelrad et al., 2007).

b. Carga de morbilidad expresada en AVAD para Retraso Mental Leve

La carga de la morbilidad para este caso específico solo estará enfocada en la afectación que ha sido mayormente abordada por la literatura, y que es en términos de la OMS (2008), la relacionada con el desarrollo neurológico de los niños, es decir, el retraso mental leve (RML) a los fetos y lactantes expuestos a la toxicidad del mercurio en zonas de extracción aurífera, propiciando una disminución en el coeficiente intelectual (CI) y desarrollo cognitivo de los menores.

La literatura muestra que, para la cuantificación de los impactos resultantes del uso del mercurio en la minería artesanal de oro, en la economía de la salud se utiliza el índice de años de vida ajustados por discapacidad (AVAD), con la finalidad de comparar el impacto de los diferentes problemas de la salud.

Ahora bien, es pertinente describir de forma sencilla, los elementos que se relacionan dentro del cálculo de los Años de Vida Ajustados por Discapacidad (AVAD), como un indicador que permite cuantificar la carga de la enfermedad, en este caso ocasionada por la contaminación por mercurio (Murray, 1994). El cálculo de los AVAD promueve entre otros propósitos definir prioridades de los sistemas de salud al diseñar estrategias para la mitigación o prevención de la enfermedad; fomentar la investigación como componente fundamental del sistema de salud; identificar los grupos vulnerables o en riesgo de padecer una determinada enfermedad y planificar otro tipo de intervenciones que permitan disminuir la carga de la enfermedad.

Para el cálculo de los AVAD, se tiene en cuenta el número de nacidos de vivos en la zona objeto de estudio y/o en el municipio de interés en un año determinado tomados del DANE. Así, se destacan las siguientes variables basadas en la OMS (2008) y la evidencia de diversos estudios sobre impactos de las actividades económicas en la salud, el medioambiente y otros análisis de corte medioambiental, para el presente estudio, se supuso los siguientes parámetros:

Cálculo del AVAD para el Retraso Mental Leve en zonas contaminadas por mercurio

En el contexto de la investigación, es preciso cuantificar mediante el uso del AVAD, la carga del retraso mental leve atribuible a la exposición prenatal al mercurio. La siguiente tabla representa los parámetros para el cálculo de AVAD propuestos por la (OMS, 2008).

Tabla 2. Parámetros para cuantificar la carga del retraso mental leve mediante el uso de AVAD

Parámetros para el cálculo del AVAD	Caracterización
Ponderación de la edad	Representa la percepción que se tiene dentro del colectivo social, de la importancia de contar con un estado de salud favorable que permita en cada etapa de la vida desarrollar actividades productivas, para

	cuantificarla se asignan valores que oscilan entre 0 (sin peso) y 1 (con peso). Para este parámetro se adoptó lo estipulado en la hoja de cálculo proporcionado por la OMS.
Ponderación de la discapacidad	Indica la valoración que dan pacientes y especialistas a una discapacidad determinada, oscila entre 0 (estado de salud) y 1 (muerte). Según la OMS para el caso del retraso mental leve en niños por la ingesta de mercurio es de 0,361.
Duración de la discapacidad	La duración de la discapacidad relaciona el año de inicio de la misma hasta su culminación. Se tiene que para el retraso mental leve la discapacidad dura toda la vida, entonces se extiende por el periodo comprendido entre el momento del nacimiento y el fallecimiento, siendo útil y pertinente utilizar valores correspondientes a la esperanza de vida al nacer en cada municipio, región o país donde se desee cuantificar la carga de la enfermedad haciendo uso de los AVAD, datos tomados del DANE.
Tasa de descuento	Importancia de los años perdidos en el futuro a causa de la discapacidad, esta tasa generalmente en estudios medioambientales y en estudios de economía de la salud se estima en 3% (Haacker et al., 2020).
Tasa de incidencia	La tasa de incidencia corresponde al número de casos potenciales de una determinada patología por cada mil personas, en este caso la población afectada por la exposición al mercurio. La OMS ilustra el modo en que el descenso de CI asociado con cada incremento de la concentración en el cabello se combina con la distribución normal del CI para calcular qué porcentaje de la población de cada intervalo se desplazaría a la categoría de RML dada la exposición al mercurio en dicho intervalo. Para ello, mediante la Hoja de Cálculo del Mercurio de la OMS se calcula dicha tasa de incidencia.
Tamaño poblacional	Los cálculos de los AVAD también exigen conocer datos sobre el tamaño de la población para determinar el número de AVAD perdidos. En el caso del RML inducido por el metilmercurio, el dato demográfico necesario es el número de niños nacidos en el año de interés.

Fuente: (OMS, 2008)

Así, la Hoja de Cálculo del Mercurio de la OMS (2008) está programada con las funciones necesarias para obtener la tasa de incidencia, el número de AVAD perdidos y la tasa de AVAD atribuibles al retraso mental leve inducido por el metilmercurio.

Para la medición monetizada de los AVAD, se recomienda que un año de vida saludable perdido (unidad de AVAD) corresponde a 1 PIB per cápita.

Para este caso de estudio, se calcula el AVAD bajo el supuesto que dentro del periodo de tiempo de vida útil de la Barrera Cortaflujo, 25 años, no nacerán niños con retraso mental leve asociado al metilmercurio. Por lo que se calculan los AVAD durante los años 2018 y 2043, considerando datos del Censo Nacional de Población y Vivienda en Colombia realizado en el año 2018.

4.1.3 Costos Profesional de rehabilitación

Una de las formas de controlar el retraso mental leve es teniendo un diagnóstico a muy temprana edad; esto permite tener un profesional que induzca una rehabilitación o reeducación de la persona enferma en sus primeros años de vida (Fernández & Calleja, 2002), por lo que el acompañamiento de un profesional a los padres en los primeros años vida del infante y en lo largo de su vida mejoraría sus capacidades adaptativas.

Así, teniendo en cuenta la tasa de incidencia de las personas nacidas con retraso mental leve asociado al mercurio durante la vida útil del método de mitigación, se propuso una estimación conservadora, donde el costo de un profesional en sociológica se asume a 2 salarios mínimos mensuales, ajustando el costo a la dedicación de una (1) hora a la semana durante toda la esperanza de vida de la persona con dicha enfermedad.

4.2 Costo Beneficio de la implementación de las Barreras Corta Flujo

4.2.1 Alternativa de mitigación de sitios contaminados por Mercurio

En este estudio se pretende llegar a una estimación del costo/beneficio de un método de mitigación ambiental para sitios contaminados por mercurio, disminuyendo significativamente la amenaza a la salud humana, mediante la implementación de barreras cortaflujo (Wang et al., 2020b) (Huang et al., 2021). Estas barreras son una tecnología para aislar y retardar durante décadas la propagación lateral de una zona contaminada.

Algunos tipos de barreras cortaflujo son usadas en ingeniería para minimizar infiltraciones de agua (Ruffing et al., 2018); actualmente su aplicabilidad para sitios contaminados por mercurio se encuentra en el desarrollo del proyecto de investigación con ID 20467 de la Estudiante Hebenly Celis del Doctorado en Ingeniería de la Pontificia Universidad Javeriana, el cual tiene como objetivo valorar la implementación de barreras cortaflujo verticales como medida de aislamiento para de sitios mineros contaminados con mercurio, desde la perspectiva conjunta de costos técnico-socio-ambientales y compatibilidad físico-química.

Para la metodología en desarrollo en este capítulo, el proyecto en ingeniería nos brindará los costos de infraestructura calculados para los dos casos de estudio, implicando un esquema de barreras con una vida útil de 25 años. Este insumo, calculado por la estudiante de Doctorado, permitirá monetizar el análisis costo-beneficio.

4.2.2 Costo Beneficio

La valoración económica de impactos ambientales (en este caso de la salud humana) nos permite conocer y cuantificar los beneficios y costos económicos de las acciones realizadas, con miras a determinar los efectos sobre la sociedad. Este análisis nos permite comparar los beneficios (asociado a la disminución de los costos que implica el impacto ambiental) que resultan de ejecutar una determinada acción (Torres, 2014).

Para establecer una relación costo beneficio se precisa contrastar el costo calculado con la metodología dada en el acápite 4.1.2 y 4.1.3 (donde permite calcular los costos asociados al retraso mental leve en un municipio, provocado por concentraciones altas de metilmercurio en el cabello de madres en gestación, ingerido mediante el consumo de pescado contaminado por mercurio proveniente de la minería artesanal de oro y de pequeña escala) con el costo asociado a la implementación de infraestructura de barreras corta flujo como se menciona en el acápite 4.2.1.

La relación de beneficio-costos representa un cociente entre los beneficios y los costos durante un período determinado; por ello es importante determinar la vida útil del método de mitigación y el comportamiento del contaminante. Se debe calcular el valor actual neto de los costos y beneficios durante la vida del método. Si esta relación beneficio-costos es mayor a uno (1) significa que el método genera mayor beneficio a la sociedad que costos (Aguilera, 2017) .

La metodología planteada en este estudio nos permite realizar análisis costo beneficio con cualquier método de mitigación que disminuya las concentraciones de mercurio en suelo y agua, mientras se tengan valores de costos asociados a su implementación. El beneficio cuantificado del impacto analizado en el acápite anterior está dado en función de los costos que dejaría de tener una región si no tuviera personas con retraso mental leve asociado al uso del mercurio utilizado en la minería de oro, y los costos, el valor de la implementación del método de mitigación.

4.3 Mercurio utilizado por la minería de oro artesanal y de pequeña escala

Con el fin de generar información que contribuya al análisis y discusión de los resultados, mediante la metodología propuesta por de Bakker et al. (2021), se realizó una estimación aproximada de cómo y cuánto del mercurio utilizado en la minería de oro llega a los seres humanos por medio de la ingesta de pescado mediante la cantidad de oro producido en un

municipio específico. Así mismo, con el fin de complementar la información del uso del mercurio en MAPE, se realizaron entrevistas en la zona del Bajo Cauca a pequeños mineros.

4.3.1 Mercurio utilizado en la minería de oro artesanal y de pequeña escala se dispersa en el agua y llega a los seres humanos

Según de Bakker et al. (2021) , desde la cantidad de oro extraído es posible conocer la cantidad de mercurio utilizado, la proporción de mercurio liberado en agua y suelo y emitido a la atmósfera, y la proporción de mercurio que se transforma en metilmercurio (metilación), mediante las siguientes variables:

- **Cantidad de Oro extraído por minería (kg) por MAPE:** La cantidad de oro extraído por minería MAPE, permite conocer la proporción de oro que se estima proviene de esta categoría de explotación aurífera. La producción de oro en Colombia por municipio es dada por la UPME (UPME & SIMCO, n.d.); y de la producción total de oro, aproximadamente el 85% corresponde a minería ilegal (Contraloría, 2022). Debido al sesgo que existe entre las prácticas de MAPE e ilegalidad, para este estudio el porcentaje de oro extraído como minería ilegal se toman para MAPE. Como dice Marrugo, citando la frase "aunque no toda la actividad de MAPE es ilegal, la mayoría de la actividad ilegal es MAPE" (Marrugo et al., 2022).

El análisis se basa en conocer la producción total de oro en cada zona de extracción objeto de estudio y/o en el municipio de interés en un año determinado, y ajustarlos a los porcentajes asumidos como proporción correspondiente a MAPE para indicar que parte del total se asocia a este.

- **Proporción de mercurio utilizado en la extracción de oro:** Los valores relacionados de gramos de Hg utilizados para la extracción de 1 gramo de oro extraído (Hg:Au) son descritos en diversos estudios, Pantoja (2000) evidencia valores de referencia obtenidos a partir de estimaciones en zonas productoras de oro MAPE en el sur de Colombia (promedio de 5:1 Hg: Au), Bolivia y Brasil (promedio de 7:1 Hg: Au). De Bakker (2021) asume 2.6:1 Hg: Au para el caso de la Amazonia Brasileira, lo que representa gran variabilidad a los valores obtenidos por (Delgado, 2019) en la región de Arequipa en Perú, quien establece una relación entre 3.7:1 y 8.7:1 Hg: Au. Para los cálculos de este estudio, mediante la consulta de literatura se asume la relación promedio en Colombia de 7:1 (Hg: Au) dada por el DNP (2016).

Con base en la proporción, a partir del valor correspondiente de la producción total de oro en un determinado sitio, zona geográfica, región o país, se puede acceder a la cantidad de mercurio utilizada para extraer un kilogramo de oro.

- **Proporción de mercurio liberado en el agua y el suelo y emitido a la atmósfera:** La proporción de mercurio liberado a agua y suelo, según el informe de Evaluación Mundial de Mercurio (AMAP, 2018), en el contexto global el 55% del mercurio es liberado a suelos y agua, mientras que, para Colombia esta liberación representa el 71% (AMAP, 2018).
- **Proporción de mercurio que se transforma en metilmercurio:** Para este estudio, teniendo en cuenta los valores tomados por de Bakker, se asume que la tasa de metilación puede fijarse para fines analíticos en 5% en un escenario similar.

A partir del análisis e interacción de las variables previamente descritas, de Bakker propone la siguiente fórmula, que estima cuanto mercurio utilizado en la minería de oro se dispersa en el agua y sufre metilación.

$$X = A * B * C * D \quad (1)$$

Dónde:

X= Mercurio utilizado por la minería, se libera en ambientes acuáticos y sufre metilación

A= Cantidad de oro extraído por minería (kg)

B= Proporción de mercurio utilizado para la extracción (kg Hg/kg oro extraído)

C= Proporción de mercurio liberado en el agua (decimal)

D= Tasa de metilación (decimal)

Al aplicar dicha fórmula al escenario colombiano, se obtiene una metodología práctica para cuantificar la cantidad de mercurio utilizado en MAPE que se libera en ambientes acuáticos y sufre metilación. Es decir, el mercurio que genera alteraciones ecosistémicas y desencadena afectaciones en la salud de los seres humanos por medio de la ingesta de pescado. Así, se aprecia que existe relación entre variables sociales y ambientales, en la medida en que la actividad aurífera mediante el uso de mercurio transfiere al entorno externalidades negativas.

4.3.2 Entrevistas a mineros artesanales y de pequeña escala en el bajo Cauca antioqueño

Para complementar la información secundaria sobre el uso del mercurio en la minería artesanal y de pequeña escala en la minería Aluvial de oro, se recolectó información mediante entrevistas semiestructuradas a familias mineras en los municipios de Caucasia, Taraza y Cáceres del departamento de Antioquia. El objetivo de las entrevistas fue conocer la forma en cómo se utiliza el mercurio en la minería artesanal y de pequeña escala y estimar la cantidad de mercurio que se utilizaba para la extracción de oro.

Debido a que desde el 2018 el uso del mercurio es ilegal en Colombia, las personas se abstienen a expresar con veracidad tal uso; se contó para este ejercicio la posibilidad de realizar entrevistas a tres (3) familias de mineros, cada una ejerciendo la minería en diferente escala (mineros de subsistencia, minidragueros y pequeños mineros).

Para guiar las entrevistas se prepararon una lista de preguntas, las cuales fueron revisadas y aprobadas por el director y codirector de este trabajo de grado (Anexo 3), en las que se incluyen: Describa el proceso de uso del mercurio para la separación de oro, ¿Cuánta cantidad de mercurio utiliza usted para extraer un gramo de oro?, ¿Existe un lugar específico destinado para llevar a cabo el proceso de amalgamación, o éste es realizado en el punto de extracción?, ¿Utiliza algún sistema o mecanismo de recuperación de mercurio posterior al proceso de amalgamación?, ¿Conoce usted algún riesgo relacionado con el uso de mercurio?.

Información recolectada:

Las familias entrevistadas coincidieron en que la cantidad de mercurio utilizado había disminuido desde la prohibición del uso del mercurio en la minería en el 2018; argumentan que, aunque empezó la prohibición ellos siguieron utilizando el mercurio para la separación efectiva del oro, pero la cantidad utilizada ha disminuido, esto debido a dos (2) factores: La regulación del transporte del mercurio y el aumento de los precios del mercurio. Los mineros no se quieren exponer a tener consecuencias penales al ser encontrados con mercurio por las autoridades y que el alto precio del mercurio los obliga a ingeniar formas de separación más efectivas, donde la cantidad de mercurio utilizado sea el menor posible.

En la zona del Bajo Cauca, la minería de oro predominante es la Aluvial, por lo que los puntos específicos donde realizan los procesos de extracción del oro no son estáticos; las familias expresaron que los puntos donde realizan la amalgamación del mercurio y la quema del mismo pueden ser en el lugar de la extracción o en cualquier otro punto donde se les facilite hacerlo, es decir, no tienen un lugar específico donde siempre realicen el uso de este metal.

Según lo recolectado en las entrevistas, la mayoría de los mineros que realizan la extracción y la posterior amalgamación del mineral no realizan la quema del mismo; estos son llevados a puntos de compraventa, donde ahí utilizan sistemas de hornos artesanales para la quema de la amalgama. Así mismo, mencionan que muy pocas veces o nunca realizan recuperación del mercurio, que esto depende del precio y de la dificultad para conseguir el elemento.

Estas familias reconocen que el mercurio tiene efectos en la salud, sin embargo, el cuidado que tienen a su exposición es casi nulo, mencionan que compañeros que utilizaban el mercurio a diario con los pasos de los años han sentido dolores en los huesos y pérdida de memoria. El hijo menor (19 años) de una de las familias mineras expresó que mediante una campaña sobre la concentración de mercurio en la orina de la Secretaria de Salud del departamento de Antioquia descubrió tener concentraciones de mercurio altas (aproximadamente concentraciones de 92 $\mu\text{g/L}$). Este joven se dedica a la compra de oro, realizando actividades de quema de amalgama; expresa que como no sufría sintomatología alguna nunca sintió la necesidad de utilizar elementos de protección personal para la manipulación de este elemento.

Hasta el momento los mineros artesanales y de pequeña escala consideran que todavía no encuentran un método de separación efectiva de la arena con el oro, por lo que para separar el oro fino de las arenas siguen utilizando el mercurio.

Con el fin de conocer cuánto mercurio utilizan actualmente por oro recuperado, junto con la profesional Diana Cárdenas (Ingeniera de Minas de la Zona en la entidad Planet Gold) y un minero de subsistencia se realizó un ejercicio de medición. Al minero en el municipio de Tarazá se le ubicó 1 m^3 de tierra en el lugar que él indico, donde tuviera acceso a agua y se sintiera cómodo al realizar la tarea. Las herramientas que el minero utilizó fueron matraca, pala, balde y batea. El minero tomo con una pala de arena con potencial oro y la agrego al balde, esta arena la fue agregando gradualmente a la batea, en la cual empezó a realizar movimientos circulares y paulatinamente desechando arena, debido a que mediante la densidad del oro y por gravimetría el oro va quedando al final de dicha batea, una vez desechada casi toda la arena, para separar el oro fino de esos desechos de arena se aplica mercurio en la batea formando una amalgama, al formarse la amalgama queda mercurio en el agua, el cual es vertido a la fuente hídrica. Al obtener la amalgama se quema en el mismo sitio donde se realiza la extracción (Figura 2).

Figura 2 Ejercicio de medición de extracción de oro



Tabla 3 Datos del Hg utilizado y la producción obtenida

Peso Hg utilizado (g)	Peso Hg recuperado (g)	Hg consumido (g)	Oro recuperado	Precio del grano de oro (COP) (23/12/22)	Precio de 1 gramo de oro (COP) (23/12/22)
0,34	0,085	0,255	1 grano	14000	254.545

Los mineros de la región suelen referirse en lo que concierne al oro extraído en unidades de granos, el cual corresponde a a 0,055 gramos. Cabe resaltar, que fue un ejercicio supervisado por los profesionales de interés, normalmente no existe una recuperación de Hg. Para este ejercicio la relación Hg:Au obtenida fue de 4.64 g Hg/g oro.

4.4 Casos de estudio

Con base en la revisión de literatura y mediante la implementación de la hoja de cálculo propuesta, se pretende calcular estimaciones de la relación costo beneficio de la implementación de la barrera cortaflujos.

Los casos de estudio son uno en el municipio de Yalí y otro en el municipio de Ayapel, ubicados en el departamento de Antioquia y Córdoba, respectivamente. Los cuales fueron escogidos por representar dos escalas de análisis diferentes y por disponibilidad de información.

Mediante la implementación de imágenes satelitales descargadas de la versión 2022 de SAS PLANET, satélite Bing Maps y mediante el uso de ArcGis se estimó la longitud de las barreras a implementar.

Para el cálculo de los AVAD de retraso mental leve se tuvo en cuenta la inclusión del valor de nacidos vivos de los municipios caso de estudio desde el año 2018 y proyecciones hasta el año 2042 debido a que se considera 25 años de vida útil de la barrera. Así como también la esperanza de vida al nacer encontrada por departamento, es decir, Antioquia y Córdoba, para el mismo rango de años (DANE, 2018), considerando los niños que nacen durante la vida útil del método de mitigación.

Se tomó de la página del DANE valores del PIB per cápita en Antioquia y Córdoba ajustados a abril del 2023, suponiendo el PIB per cápita 2021 indexado al 2023 mediante los respectivos IPC, y desde el 2023 manteniendo este valor constante para todos los años del cálculo de los AVAD, los cuales son desde el 2018 hasta el 2042.

Para complementar la información sobre la cantidad de mercurio liberado al medio acuático, se toma de la página del UPME, los datos de la producción de oro 2018 hasta el 2022 para dichos municipios.

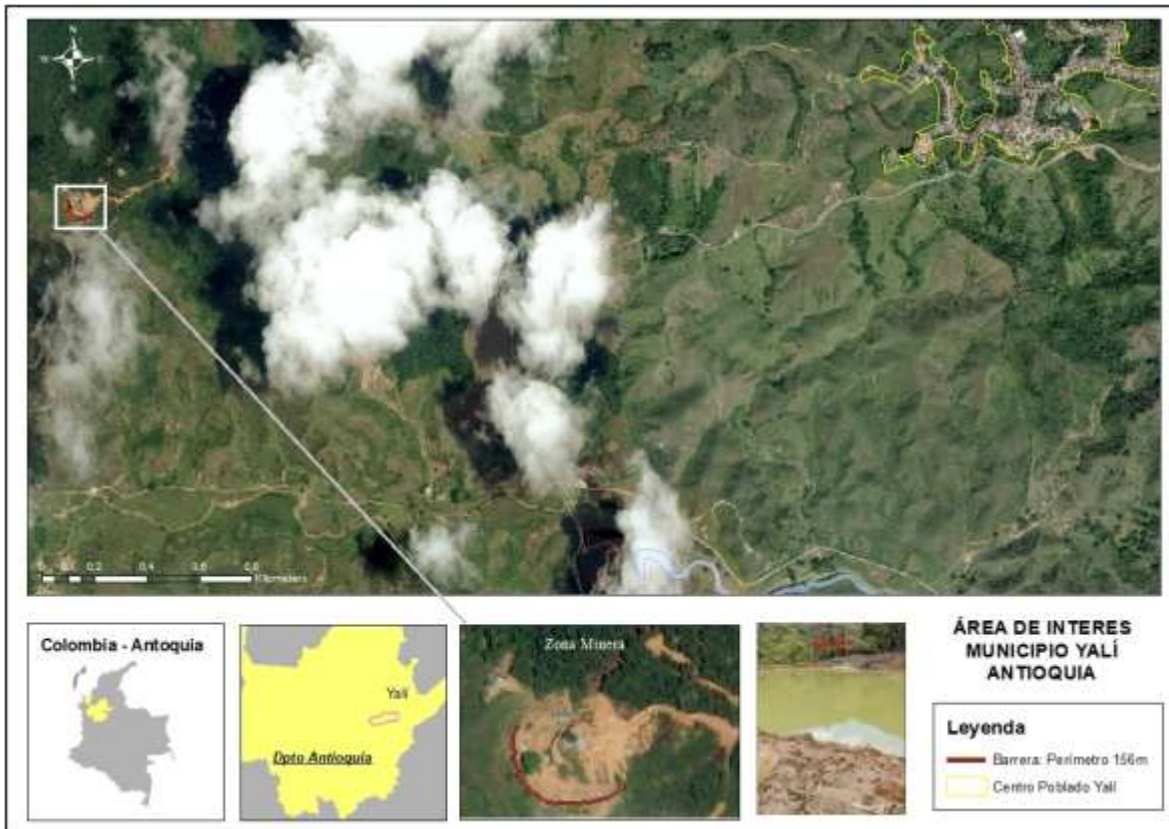
4.4.1 Municipio de Yalí – Antioquia

La zona de estudio escogida en el municipio de Yalí es una relavera (o embalse de colas), en la cual la estudiante Hebenly Celis realizó mediciones de concentración de mercurio en aguas con valor de 0,1 mg/kg y en suelo con valor de 2,46 mg/kg, concluyendo la migración del mercurio de dichas piscinas al suelo y posibles fuentes hídricas. El análisis experimental de este estudio se está realizando con información de concentraciones de mercurio de dicha zona o se zonas aledañas. Con la ayuda de las imágenes satelitales de la zona se visualizó la laguna de residuos del relave minero y mediante el uso de la herramienta de hidrología de ArcGIS, se calculó el flujo de la dirección de las corrientes hídricas para realizar la simulación de la ubicación y longitud de la barrera cortaflujo, dando una longitud de 156 metros (Figura 3), con costos de construcción asociados de \$193,054,510 (Anexo A), calculados por la estudiante doctoral Hebenly Celis.

Se pudo evidenciar, mediante el flujo de direcciones que los residuos de mercurio depositados por esta relavera se libera a fuentes hídricas, llegando a su efluente principal muy cerca de la población de la cabecera municipal de Yalí. En este municipio existen muchas zonas aptas para

la pescadería por lo que una de sus principales fuentes económicas es la pesca, contribuyendo a la seguridad alimentaria de la región (E. E. Torres et al., 2022).

Figura 3 Área de Interés en el municipio de Yalí departamento de Antioquia



Fuente: Elaboración propia; Fotos del sitio: cortesía Alfonso Rodríguez, Pure Earth Colombia

Para la estimación de la población expuesta en el área de estudio, se utilizaron los datos del censo de población y vivienda de 2018 (DANE, 2018) y la cartografía del Marco Geostadístico Nacional para el mismo año. La población reportada para la cabecera municipal del municipio Yalí es de 3048 personas, en el año 2018.

No se encontraron datos sobre estudios realizados en Yalí de muestras para el análisis de concentraciones de mercurio en el cabello, así que para este caso se tuvo en cuenta un estudio realizado en Antioquia con muestra de 150 mujeres lactantes en los municipios del Bagre, Zaragoza, Segovia y Remedios, en el cual se determinó un promedio de concentraciones de mercurio en el cabello de $1.25 \mu\text{g}/\text{kg}$ ($\pm 1,61$) para madres lactantes expuestas ambientalmente al contaminante, donde el 35.3 % de las muestras de cabello superó el límite permisible (Molina et al., 2018).

Se asume un peso promedio de 65 kg en mujeres en embarazo (OMS, 2008) y una ingesta promedio de pescado para en el bajo Cauca de 82.43 g/ día (UdeA, 2019). A su vez, un estudio

mostró en el norte de Antioquia concentraciones de MeHg en peces entre 0.3 – 0.7 µg/g (Mancera & Álvarez, 2006).

4.4.2 Municipio Ayapel – Córdoba

Ayapel es un municipio ubicado en el departamento de Córdoba, altamente reconocido por su dinámica minera, y múltiples estudios sobre concentraciones de mercurio en agua, suelo, sedimentos, pescado y en humanos, arrojando a lo largo de los años concentraciones por encima de los límites superiores permisibles por la OMS (Gracia et al., 2009).

Para el municipio de Ayapel se tiene como zona de interés la región identificada en la ilustración 2, delimitando mediante imágenes satelitales las zonas más grandes de minería de aluvión. Suponiendo que se aislara con barreras cortaflujo toda el área donde se desarrolla minería que afecta la cabecera municipal de Ayapel, la suma de los perímetros de las barreras tiene un valor de 36.8 km, con costo de construcción asociados a \$45,788,569.601 (Ver Anexo B), calculados por la estudiante doctoral Hebenly Celis.

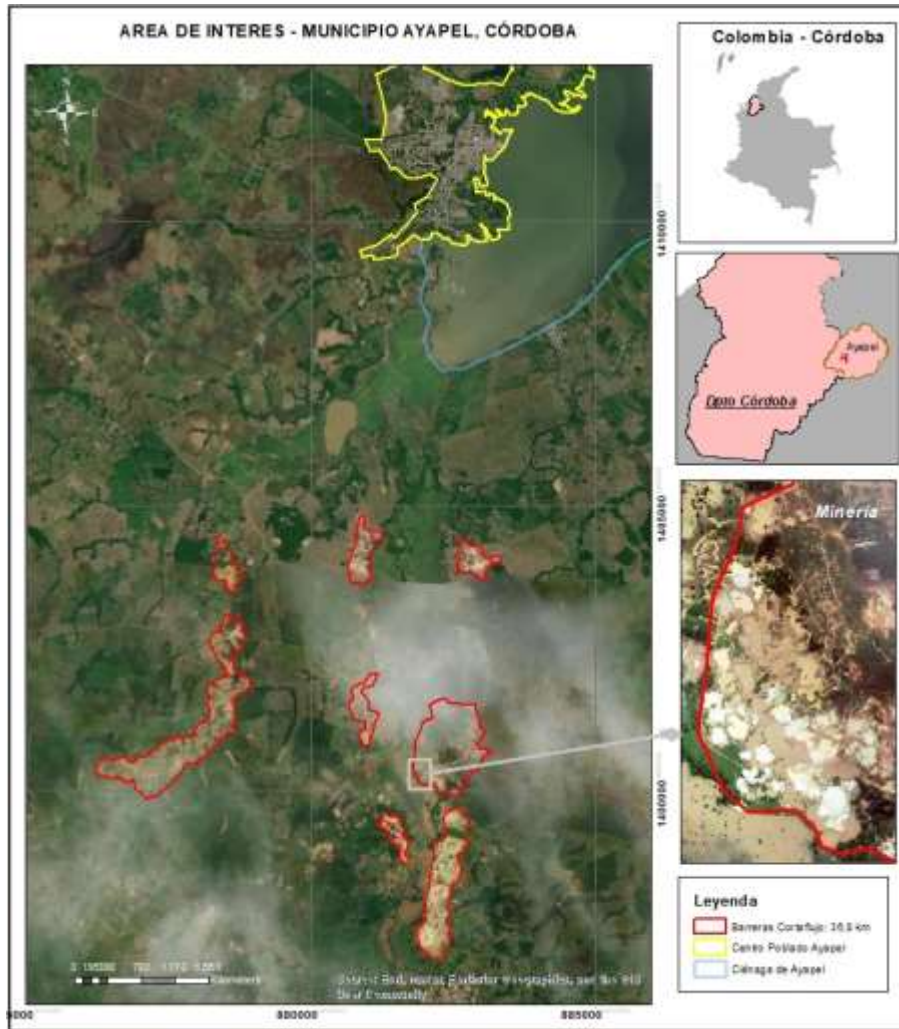
La población expuesta es la de la cabecera municipal de Ayapel, alrededor de 24482 personas (DANE, 2018).

Las concentraciones de metilmercurio en pescado son tomadas por estudios realizados en Ayapel - Córdoba, debido a su cercanía y similitud en actividades mineras. Según Gracia et al (2009) las concentraciones de MeHg en pescado tienen valores máximos de 0.7 µg/g y mínimos de 0.15 µg/g. Así mismo, otro estudio realizado en el 2006-2007 en la misma ciénaga muestra valores de concentración media de mercurio en peces de 0.298 µg/g (Marrugo et al., 2010).

Igual que en Yalí se infiere un peso promedio de la población de 65 kg (OMS, 2008) y una ingesta promedio de pescado para en el bajo cauca de 82.43 g/ día (UdeA, 2019).

Un estudio mostró en Ayapel el promedio de concentración de mercurio en el cabello de 2.18 ± 1.77 µg/g a diferencia del valor medio para Montería de 0.29 ± 0.12 µg/g, generando mayor riesgo de padecer enfermedades asociadas a la exposición al mercurio en Ayapel (Gracia et al., 2009). El valor más alto de Hg-T en peces lo presentó la especie carnívora *orubin cuspicaudus*, con concentración media de 0.74 ± 0.19 µg/g de peso fresco, y la menor concentración, la especie *iliófaga Prochilodus magdalenae*, con 0.15 ± 0.02 µg/g de peso fresco.

Figura 4 Área de Interés en el municipio de Yalí departamento de Antioquia



Fuente: Elaboración Propia

5 Resultados y Discusiones

Municipio Yalí – Antioquia:

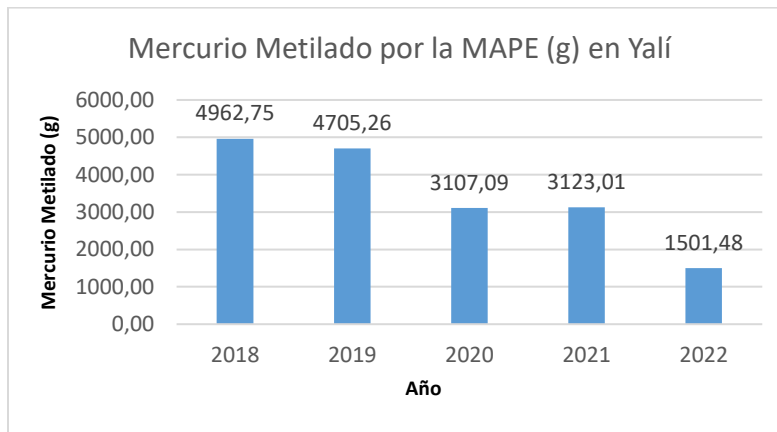
La estimación de los costos del método de mitigación del relave en el municipio de Yalí es de \$193,054,510 COP. Así, se estima el beneficio en función del costo de los impactos de mercurio asociado a la enfermedad de retraso mental, los cuales se dan entre un valor costos asociados a concentraciones de mercurio en el cabello de estudios de mediciones tomadas en poblaciones en riesgo (\$517,144,424) y entre costos asociados a las concentraciones de mercurio en el cabello asociados con datos inferidos de la ingesta promedio de pescados contaminados (\$1,529,155,913 COP), teniendo una relación beneficio/costo del método de mitigación entre 2.7 y 7.9 (ver Anexo A).

Tabla 4 Resultados de la estimación Costo/Beneficio

Simulación en Caso de Estudio en Yalí		
Costo de los impactos de mercurio asociado a la enfermedad de retraso mental	Por concentraciones de mercurio en el cabello de estudios de mediciones tomadas en poblaciones en riesgo	Por concentraciones de mercurio en el cabello relacionadas con la ingesta promedio de pescados contaminados
Tasa Incidencia	1,10	3,25
AVAD RML 25 años (2018 -2042)	\$451,443,738 COP	\$1,334,884,083 COP
Profesional en atención	\$65,700,687 COP	\$194,271,830 COP
Costo de los impactos de mercurio asociado a la enfermedad de retraso mental (B)	\$517,144,424 COP	\$1,529,155,913 COP
Beneficio/Costo		
Costos de construcción de las Barreras Cortaflujo (A)	\$193,054,510 COP	
Beneficio/Costo (B/A)	2.7	7.9

Mediante la producción de oro municipal se tiene que para los años 2018, 2019, 2020, 2021 y 2022, se estima que el mercurio que es liberado al ambiente y sufre metilación generando riesgos en la población humana, con cantidades de mercurio potenciales a ser consumidas son de 4962.7 g, 4705.3 g, 3107.1 g, 3123 g y 1501.5 g respectivamente.

Figura 5 Cantidades de mercurio potenciales a ser consumidas en Yalí



Fuente: Elaboración propia & (UPME & SIMCO, n.d.)

Municipio Ayapel – Córdoba:

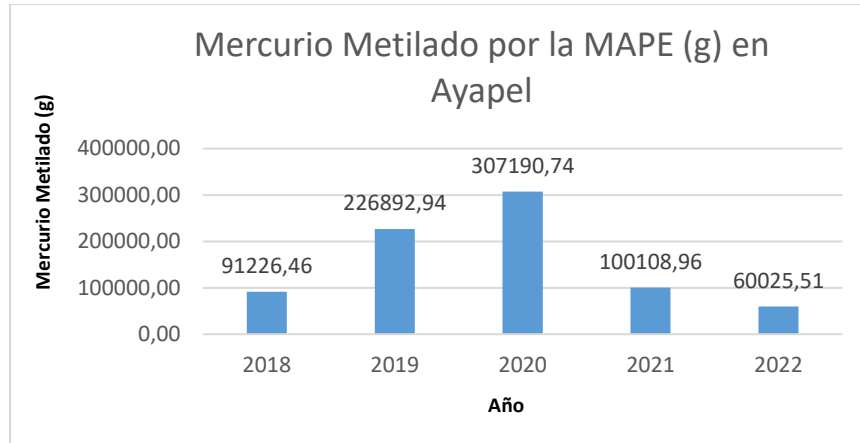
La estimación de los costos del método de mitigación en las zonas determinadas como EVOA aguas arriba de la ciénaga de Ayapel es de \$45.788.569.601 COP. Así, se estima el beneficio en función del costo de los impactos de mercurio asociado a la enfermedad de retraso mental, los cuales se dan entre un valor costos asociados a concentraciones de mercurio en el cabello de estudios de mediciones tomadas en poblaciones en riesgo (\$3,407,583,490 COP) y entre costos asociados a las concentraciones de mercurio en el cabello asociados con datos inferidos de la ingesta promedio de pescados contaminados (\$15,015,156,212 COP), teniendo una relación beneficio/costo del método de mitigación entre 0.1 y 0.3 (ver Anexo B).

Tabla 5 Resultados de la estimación Costo/Beneficio

Simulación en Caso de Estudio en Ayapel		
Costo de los impactos de mercurio asociado a la enfermedad de retraso mental	Por concentraciones de mercurio en el cabello de estudios de mediciones tomadas en poblaciones en riesgo	Por concentraciones de mercurio en el cabello relacionadas con la ingesta promedio de pescados contaminados
Tasa Incidencia	1,62	7,14
AVAD RML 25 años (2018 -2042)	\$2,554,734,304 COP	\$11,257,166,485 COP
Profesional en atención	\$852,849,186 COP	\$45,788,569,601 COP
Costo de los impactos de mercurio asociado a la enfermedad de retraso mental (B)	\$3,407,583,490 COP	\$15,015,156,212 COP
Beneficio/Costo		
Costos de construcción de las Barreras Cortaflujo (A)	\$45.788.569.601 COP	
Beneficio/Costo (B/A)	0.1	0.3

Mediante la producción de oro municipal se tiene que para los años 2018, 2019, 2020, 2021 y 2022, se estima que el mercurio que es liberado al ambiente y sufre metilación generando riesgos en la población humana mediante el consumo de pescado, con cantidades de mercurio potenciales a ser consumidas de 91226.5 g, 226892.9 g, 307190.7 g, 100108.9 g, 60025.5 g respectivamente.

Figura 6 Cantidades de mercurio potenciales a ser consumidas en Ayapel



Fuente: Elaboración propia & (UPME & SIMCO, n.d.)

En las entrevistas realizadas a campo, se dio a entender el riesgo alto que tienen los compradores de oro y trabajadores de entables a la contaminación por mercurio por medio de la inhalación.

Según las entrevistas realizadas la cantidad de mercurio utilizado tiene una proporción 4.64g:1g (Hg:Au); datos muy parecidos a lo encontrados en la literatura donde la proporción de mercurio utilizado era 7 g Hg:1g oro recuperado (DNP, 2016) .

5.1 Discusiones y Limitaciones

La estimación calculada en este estudio es conservadora, ya que nos estamos concentrando a partir de la medida de las barreras, la cual generaría una disminución en las liberaciones de mercurio al agua, por lo que disminuye la absorción de metilmercurio en los peces y consumo de pescado no contaminado por mercurio. No se están teniendo en cuenta demás exposiciones del mercurio, como son por inhalación y/o contacto del Hg Inorgánico.

Los análisis se basan en el costo-beneficio en la medida de mitigación que estamos evaluando y de la enfermedad de retraso mental leve en nacidos vivos inducido por concentraciones de mercurio en madres en gestación o en lactancia, debido que es la que más cuenta con información y herramientas para la cuantificación del impacto.

Se pueden tener en cuenta la carga de enfermedades asociadas al mercurio como la hipertensión arterial y el infarto agudo de miocardio, sin embargo, se debe contar la tasa de incidencia en dichas enfermedades inducidas por el mercurio en poblaciones objeto, lo cual requiere mayores

estudios epidemiológicos. Por lo tanto, no se están teniendo en cuenta otros efectos en la salud humana, específicamente en la población adulta.

Según las estimaciones realizadas en este estudio, las concentraciones de metilmercurio en el cabello de las poblaciones calculadas mediante la relación de ingesta de pescado son valores que superan los límites permisibles.

Para la escala de Ayapel, la cual se calcula las áreas contaminadas con mercurio en escalas de kilómetros, la barrera no es un método viable en términos económicos; No obstante, prácticas más sostenibles y seguras en la industria minera se pueden aplicar, por ejemplo, la propuesta de Veiga (2018) para micromineros en Colombia, en la implementación de equipos simples y asequibles para concentrar oro utilizando materiales disponibles localmente que se encuentran en depósitos de chatarra y talleres de metal, logrando en los ensayos tasas de recuperación de oro que oscilan entre el 30% y 80%, con una variabilidad relativa de acuerdo con las toneladas procesadas por día.

A pesar de las regulaciones políticas sobre el mercurio en Colombia para minería desde el 2018, según el ejercicio de recuperación de oro en Tarazá, el uso de mercurio no ha disminuido significativamente, además, al realizar un ejercicio vigilado los mineros pueden mostrar mayor control de uso del mercurio, por lo que, estos datos en el ejercicio diario para ellos pueden ser mayor.

La herramienta brindada por la OMS, Hoja de Cálculo para el Mercurio, se actualizó con evidencia más reciente para los casos de estudios expuestos en este estudio. Sin embargo, se recomienda ser utilizada únicamente con fines exploratorios.

En Colombia existe información sobre el uso y la contaminación por mercurio, además, cada vez los estudios epidemiológicos se han venido implementado en mayor medida. Sin embargo, los datos para el análisis de este tipo de estimaciones son escasos.

A pesar de que en el año 2018 en Colombia se prohibió el uso del mercurio en minería, no hay evidencias de una disminución en su uso. Aunque las familias manifestaron que el uso del mercurio ha disminuido, en el ejercicio realizado en campo la proporción de cantidad de mercurio utilizado es de 4.64g:1g (Hg: Au), la cual no difiere significativamente de los valores dados en la literatura antes de dicha prohibición, y según relatos de pequeños mineros no hay un método más efectivo y económico que el uso del mercurio para la separación del oro.

Este estudio enfatiza la importancia de abordar los desafíos ambientales y de salud planteados, mediante la investigación en el uso del mercurio con enfoque interdisciplinario y soluciones sostenibles para la toma de decisiones.

6 Conclusiones

- En este estudio, a partir de la metodología de la Organización Mundial de la Salud (OMS), se calcularon los costos sociales asociados con la atención y cuidado de personas que nacen con RML debido a la exposición al mercurio, principalmente a través de la ingesta de pescado contaminado durante la etapa de gestación y lactancia materna. Este enfoque ha permitido estimar la carga de morbilidad de RML en términos de años de vida ajustados por discapacidad (AVAD), proporcionando una visión cuantitativa de la gravedad de la situación.
- Por otro lado, el método ingenieril de mitigación mediante barreras cortaflujo ha sido evaluado desde una perspectiva económica, considerando los costos asociados a la construcción de esta infraestructura civil. Al calcular las pérdidas económicas que enfrentará la sociedad si no se aplica ningún método de mitigación, se ha proporcionado un análisis beneficio/costo que permite concluir sobre la efectividad económica de esta técnica.
- Los análisis específicos realizados en los casos de estudio en Yalí, Antioquia, y las zonas con explotación de oro de aluvión aguas arriba de la Ciénaga de Ayapel, Córdoba, han arrojado resultados reveladores. Se ha demostrado que la implementación de barreras cortaflujo se muestra económicamente favorable solo en situaciones donde se aplica alrededor de piscinas de colas y sitios puntuales de MAPE, como lo es el caso de estudio de Yalí.
- Para sitios con grandes extensiones de actividad MAPE y en base a su geografía como lo es Ayapel, donde la minería se realiza en los drenajes sencillos aguas arriba de la ciénaga de Ayapel, requeriría de grandes extensiones de barreras cortaflujo, lo que se muestra económicamente inviable en términos de costo - beneficio.
- Las cantidades de mercurio liberadas al medio ambiente y potenciales a ser consumidas en el municipio de Ayapel son proporcionales a las producciones de oro en la MAPE, es decir, a mayor producción de oro mayores liberaciones de Hg en el ambiente; y teniendo en cuenta, que las barreras cortaflujo no son eficiente en casos como Ayapel, se debe impulsar la promoción de prácticas de minería sin mercurio para que se contribuya la minimización de los impactos ambientales y mejorar la salud de las comunidades locales de esta zona.

7 Recomendaciones

- Para una estimación más parecida a la realidad, se recomienda para el cálculo del beneficio por medio del AVAD para retraso mental leve asociado al mercurio, realizar mediciones en el área de interés de las concentraciones de mercurio en cabello de madres en gestación o en lactancia, así como también en otras matrices como sangre, leche materna y sangre del cordón umbilical.

- En las piscinas de colas, como es el caso de Yalí, se recomienda usar el perímetro completo, debido a que representaría protección ante un eventual rebose de las piscinas.

8 Agradecimientos

Agradecimiento a Alfonso Rodríguez de la ONG Pure Earth Colombia.

Agradecimiento a Hebenly Celis, estudiante del Doctorado en Ingeniería de la PUJ

Agradecimiento a la Vicerrectoría de Investigación de la PUJ por su apoyo mediante el proyecto de investigación ID 20467

9 Referencias

- Abregú, A. (2017). *El coeficiente intelectual, las inteligencias múltiples y su relación con el rendimiento escolar en estudiantes de educación secundaria*.
- Acosta, J. M. C., Mendoza, J. C. M., Rincón, G. P., & León, G. A. N. (2008). Caracterización Mineralógica y Química de los depósitos de relaves (Colas de Proceso) en los sectores Auríferos de Cueva Loca (Bugá) y El Retiro (Ginebra - Guacarí), Departamento del Valle del Cauca. *Geología Colombiana*, 33(0), 47–56. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/geocol/article/view/32046>
- Aguilera, A. (2017). El costo-beneficio como herramienta de decisión en la inversión en actividades científicas. *Cofin Habana*, 11(2), 322–343. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2073-60612017000200022&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Alvarán, L., Sánchez, D., Diego,], & Restrepo-Ochoa, A. (2016). *Neuropsicología da inteligência limítrofe. Neuropsicología de la inteligencia limítrofe. Neuropsychological characterization of the borderline intellectual functioning*. <https://doi.org/10.7714/CNPS/10.2.207>
- AMAP. (2018). *Technical Background Report to the Global Mercury Assessment 2018*. <https://www.unep.org/globalmercurypartnership/resources/report/technical-background-report-global-mercury-assessment-2018>
- ANM. (2021). *Colombia logró en 2020 la producción de oro más alta de los últimos cuatro años | Agencia Nacional de Minería ANM*. <https://www.anm.gov.co/?q=colombia-logro-en-2020-la-produccion-de-oro-mas-alta-de-los-ultimos-cuatro-a%C3%B1os>

- Argumedo, M. P., Consuegra, A., Vidal, J. V., & Marrugo, J. (2013). Exposición a mercurio en habitantes del municipio de San Marcos (Departamento de Sucre) debida a la ingesta de arroz (*Oryza sativa*) contaminado Population exposure to mercury in the municipality of San Marcos (Sucre department) due to eating contaminated rice (*Oryza sativa*). *Rev. Salud Pública*, *15*(6), 903–915.
- Arias, V., Rodriguez, A. R., Bardos, P., & Naidu, R. (2018). Contaminated land in Colombia: A critical review of current status and future approach for the management of contaminated sites. *Science of The Total Environment*, *618*, 199–209. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2017.10.245>
- ATSDR. (2019). *Curso de Toxicología Módulo I – Introducción a la toxicología*. Agencia Para Sustancias Toxicas y El Registro de Enfermedades.
- Axelrad, D. A., Bellinger, D. C., Ryan, L. M., & Woodruff, T. J. (2007). Dose-response relationship of prenatal mercury exposure and IQ: An integrative analysis of epidemiologic data. *Environmental Health Perspectives*, *115*(4), 609–615. <https://doi.org/10.1289/EHP.9303>
- Bansah, K. J., Dumakor-Dupey, N. K., Kansake, B. A., Assan, E., & Bekui, P. (2018). *Socioeconomic and environmental assessment of informal artisanal and small-scale mining in Ghana*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.150>
- Beaglehole, R., Bonita, R., & Kjellstrom, T. (1993). *Basic Epidemiology*. World Health Organization.
- Bellanger, M., Pichery, C., Aerts, D., Berglund, M., Castaño, A., Čejchanová, M., Crettaz, P., Davidson, F., Esteban, M., Fischer, M. E., Gurzau, A. E., Halzlova, K., Katsonouri, A., Knudsen, L. E., Kolossa-Gehring, M., Koppen, G., Ligocka, D., Miklavčič, A., Reis, F., ... Cophes, D. / (2013). *Economic benefits of methylmercury exposure control in Europe: Monetary value of neurotoxicity prevention*. <https://doi.org/10.1186/1476-069X-12-3>
- Betancur, B., Loaiza, J. C., Denich, M., & Borgemeister, C. (2018). Gold mining as a potential driver of development in Colombia: Challenges and opportunities. *Journal of Cleaner Production*, *199*, 538–553. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.07.142>
- Cadavid, N., Arango, Á., Cadavid, N., & Arango, Á. (2020). El mercurio como contaminante y factor de riesgo para la salud humana. *Revista Lasallista de Investigación*, *17*(2), 280–296. <https://doi.org/10.22507/RLI.V17N2A21>
- Cardoso, A. (2015). Behind the life cycle of coal: Socio-environmental liabilities of coal mining in Cesar, Colombia. *Ecological Economics*, *120*, 71–82. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLECON.2015.10.004>
- Colon, P. (2010). *MERCURY IN ARTISANAL AND SMALL SCALE GOLD MINING: IDENTIFYING STRATEGIES TO REDUCE ENVIRONMENTAL CONTAMINATION IN SOUTHERN ECUADOR*. <https://www.researchgate.net/publication/265286191>

- Contraloría. (2022). *Un 85 por ciento del oro que exporta Colombia es producto de la minería ilegal, alerta la Contraloría al rendir cuentas del control fiscal sobre medio ambiente - Contraloría*. <https://www.contraloria.gov.co/es/w/un-85-por-ciento-del-oro-que-exporta-colombia-es-producto-de-la-miner%C3%ADa-ilegal-alerta-la-contralor%C3%ADa-al-rendir-cuentas-del-control-fiscal-sobre-medio-ambiente>
- Cordy, P., Veiga, M. M., Salih, I., Al-Saadi, S., Console, S., Garcia, O., Mesa, L. A., Velásquez-López, P. C., & Roeser, M. (2011). Mercury contamination from artisanal gold mining in Antioquia, Colombia: The world's highest per capita mercury pollution. *Science of the Total Environment*, 410–411, 154–160. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.09.006>
- DANE. (2018). *Geoportal DANE - Descarga del Marco Geoestadístico Nacional (MGN)*. <https://geoportal.dane.gov.co/servicios/descarga-y-metadatos/descarga-mgn-marco-geoestadistico-nacional/>
- de Bakker, L. B., Gasparinetti, P., de Queiroz, J. M., & de Vasconcellos, A. C. S. (2021). Economic impacts on human health resulting from the use of mercury in the illegal gold mining in the Brazilian Amazon: A methodological assessment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(22). <https://doi.org/10.3390/ijerph182211869>
- Delgado, J. A. (2019). *Relación entre la amalgamación con mercurio para recuperar oro y el grado de contaminación del suelo (Secocha, 2018)*. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. <http://hdl.handle.net/20.500.12773/11580>
- Díaz, S. M., Téllez, E. M., Palma, R. M., Zapata, E., Briceño, L., Varona, M., Guarín, N., & Trillos, C. (2022). *Carga de la enfermedad y costos en salud por la exposición a mercurio: revisión de alcance* / *Salud UIS*. <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistasaluduis/article/view/12553/12408>
- DNP. (2016). *“También tenemos que hacer la paz con la naturaleza porque el mercurio sigue causando estragos”*: Simón Gaviria Muñoz. <https://www.dnp.gov.co/Paginas/%E2%80%9CTambi%C3%A9n-tenemos-que-hacer-la-paz-con-la-naturaleza-porque-el-mercurio-sigue-causando-estragos%E2%80%9D-Sim%C3%B3n-Gaviria-Mu%C3%B1oz.aspx>
- Español, S. (2012). Contaminación con mercurio por la actividad minera. *Revista Biomédica Instituto Nacional de Salud*. <https://www.redalyc.org/pdf/843/84324092001.pdf>
- FAO. (1995). *GENERAL STANDARD FOR CONTAMINANTS AND TOXINS IN FOOD AND FEED*.
- FAO/OMS. (2004). *El Comité Mixto FAO/OMS de Expertos en Aditivos Alimentarios. Evaluación de determinados aditivos alimentarios y contaminantes: 61.º informe del Comité Mixto FAO/OMS de Expertos en Aditivos Alimentarios Roma y Ginebra: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura y la Organización Mundial de la Salud*.

- Fernández, A., & Calleja, B. (2002). Retraso Mental Leve desde la Atención Primaria. *FORMACIÓN CONTINUADA DEL MÉDICO PRÁCTICO*.
- USGS. (2022). *MINERAL COMMODITY SUMMARIES 2022*.
- González, M., Bodas, A., Rubio, M. Án., Martell, N., Trasobares, E. M., Ordóñez, J. M., Guillén, J. J., Herráiz, M. Án., García, J. A., Farré, R., Calvo, E., Martínez, J. R., Llorente, M. T., Sáinz, M., Martínez, T., Martínez, M. J., Lesmes, I. B., Cuadrado, M. Án., Prieto, S., ... Calle, A. (2014). Efectos sobre la salud del metilmercurio en niños y adultos; estudios nacionales e internacionales. In *Nutricion Hospitalaria* (Vol. 30, Issue 5, pp. 989–1007). Grupo Aula Medica S.A. <https://doi.org/10.3305/nh.2014.30.5.7728>
- Gould, E. (2009). Childhood lead poisoning: Conservative estimates of the social and economic benefits of lead hazard control. *Environmental Health Perspectives*, *117*(7), 1162–1167. <https://doi.org/10.1289/EHP.0800408>
- Gracia, L., Marrugo, J., & Alvis, E. (2009). *Contaminación por mercurio en humanos y peces en el municipio de Ayapel, Córdoba, Colombia*. <https://revistas.udea.edu.co/index.php/fnsp/article/view/1753/6641>
- Grupo de Expertos de Pasivos Ambientales. (2020). Desafíos de proyectos mineros en Colombia ante concepciones de protección ambiental del siglo XX. *Taller Internacional Virtual Sobre Pasivos Ambientales Mineros: Hacia Una Gestión Sostenible - Visión Global En Iberoamérica*. <https://asgmi.org/wp-content/uploads/2020/09/01-REV-Presentacion-SGC-ASGMI-SEPTIEMBRE-2020-CORREGIDA.pdf>
- Haacker, M., Hallett, T. B., & Atun, R. (2020). On discount rates for economic evaluations in global health. *Health Policy and Planning*, *35*(1), 107–114. <https://doi.org/10.1093/HEAPOL/CZZ127>
- Huang, X., Li, J. shan, Xue, Q., Chen, Z., Du, Y. jun, Wan, Y., Liu, L., & Poon, C. S. (2021). Use of self-hardening slurry for trench cutoff wall: A review. *Construction and Building Materials*, *286*. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.122959>
- Jiménez, A. (2005a). *Interacción del mercurio con los componentes de las aguas residuales*. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/2754/angelicamariajimenezgomez.2005.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Jiménez, A. (2005b). *Interacción del mercurio con los componentes de las aguas residuales*. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/2754>
- Joshi, K., Asce, S. M., Kechavarzi, C., Sutherland, ; Kenneth, Yin, M., Ng, A., Soga, K., Asce, M., & Tedd, P. (2010). Laboratory and In Situ Tests for Long-Term Hydraulic Conductivity of a Cement-Bentonite Cutoff Wall. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, *136*, 562–572. <https://doi.org/10.1061/ASCEGT.1943-5606.0000248>

- Ley 1658. (2013). *Por medio de la cual se establecen disposiciones para la comercialización y el uso de mercurio en las diferentes actividades industriales del país, se fijan requisitos e incentivos para su reducción y eliminación y se dictan otras disposiciones.* <https://www.minambiente.gov.co/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/ley-1658-de-2013/>
- MADS, & PNUD. (2012). *SINOPSIS NACIONAL DE LA MINERÍA AURÍFERA ARTESANAL Y DE PEQUEÑA ESCALA.*
- Mallma, A., Karol, K., Vargas, C., Milagros, C., Auccahuasi, S., & Antonio, F. (2021). *Revisión Sistemática Técnicas de Remediación para Suelos Contaminados por Metales Pesados.*
- Mancera, N., & Álvarez, R. (2006). Estado del conocimiento de las concentraciones de mercurio y otros metales pesados en peces dulceacuicolas de Colombia; Current State of Knowledge of the Concentration of Mercury and Other Heavy Metals in Fresh Water Fish in Colombia. In *Acta Biológica Colombiana* (Vol. 11, Issue 1).
- Marrugo, J., Benitez, L. N., Olivero-Verbel, J., Lans, E., & Gutierrez, F. V. (2010). Spatial and seasonal mercury distribution in the Ayapel Marsh, Mojana region, Colombia. In *International Journal of Environmental Health Research* (Vol. 20, Issue 6, pp. 451–459). <https://doi.org/10.1080/09603123.2010.499451>
- Marrugo, J., Lans, E., & Benítez, L. (2007). *Universidad de Córdoba.* 12(1), 878–886. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=69312103>
- Marrugo, J., Marrugo, S., & Paternina, R. (2022). *Mercurio en la MAPE -Evaluación internacional de experiencias y lecciones aprendidas en la gestión de la contaminación por mercurio en la MAPE.*
- Minambiente, José Mira Pontón, M., Asprilla Manyoma, J., Elena Ortega Ricardo, J., Lucía Albarracín Álvarez Profesional, O., Fernanda Carvajal Miranda Asesora Oficina Asesora Jurídica Héctor Abel Castellanos Pérez Profesional Oficina Asesora Jurídica Carlos Enrique Díaz Reyes, C., Adelaida Fernández Muñoz, M., & Jaime Mora Ramos, A. (2018). *Guía de aplicación de la valoración económica ambiental.* www.minambiente.gov.co
- Mincomercio. (2018). *Plan Estratégico Sectorial de Mercurio en las Etapas del Ciclo: Importación, Comercialización y Uso en Procesos Productivos Industriales.* <https://www.mincit.gov.co/temas-interes/documentos/plan-estrategico-sectorial-de-mercurio-mincit-12-1.aspx>
- Minsalud. (2022). MERCURIO. *SUBDIRECCIÓN DE SALUD AMBIENTAL.* <https://apps.who.int/iris/handle/10665/345443>
- Minminas, Minambiente, Minsalud, & Mincomercio. (2018). *Plan Único Nacional de Mercurio .* <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/06/PUNHg.pdf>

- Molina, C. F., Arango, C. M., Sepúlveda, H., Molina, C. F., Arango, C. M., & Sepúlveda, H. (2018). Contaminación por mercurio de leche materna de madres lactantes de municipios de Antioquia con explotación minera de oro. *Biomédica*, 38, 19–29. <https://doi.org/10.7705/BIOMEDICA.V38I0.3609>
- Moreno, A., & Ussa, E. (2008). Valoración Económica de pasivos ambientales. Estudio de caso: pasivos generados por el campo petrolero Cicuco-Boquete, Mompós, Colombia. *Revista Colombia Forestal*, 11, 93–111.
- Murray, C. J. L. (1994). *Cuantificación de la carga de enfermedad: la base técnica del cálculo de años de vida ajustados en función de la discapacidad*. <https://iris.paho.org/bitstream/handle/10665.2/15608/v118n3p221.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- NRC. (2000). *Toxicological Effects of Methylmercury*. Washington, DC: National Research Council.
- OMS. (2008). *Mercurio Evaluación de la carga de morbilidad ambiental a nivel nacional y local*. www.who.int
- OMS. (2017a). *Documento Técnico N.º 1: La minería aurífera artesanal o de pequeña escala y la salud*.
- OMS. (2017b). *El mercurio y la salud*. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/mercury-and-health>
- OMS. (2021). *Toxicología Humana del mercurio y sus compuestos*. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/mercury-and-health>
- OPS. (2002). *Módulos de principios de epidemiología para el control de enfermedades: investigación epidemiológica de campo: aplicación al estudio de brotes*. Organización Panamericana de la Salud.
- Pantoja, F. (2000). *Disminución de la contaminación por mercurio en Latinoamérica*.
- Pichery, C., Bellanger, M., Zmirou, D., Fréry, N., Cordier, S., Roue, A., Hartemann, P., & Grandjean, P. (2012). *Economic evaluation of health consequences of prenatal methylmercury exposure in France*. <https://doi.org/10.1186/1476-069X-11-53>
- Raffo Lecca, E. (2015). Valoración Económica Ambiental: El problema del costo social. *Industrial Data Revista de Investigación*, 108–118. <https://www.redalyc.org/pdf/816/81642256013.pdf>
- Raiman, X., Rodríguez, L., & Chávez Paulina. (2014). Mercurio en pescados y su importancia en la salud. *Rev Med Chile*, 142, 1174–1180.
- Romero, M. (2014). Importancia de la carga de enfermedad debida a factores ambientales. *Revista Cubana de Higiene y Epidemiología*, 52(2), 149-151.

- Ruffing, D., Evans, J., & Coughenour, N. (2018). "Soil-Bentonita Slurry Trench Cutoff Wall Longevidad" in *IFCEE 2018 GSP* 297.
- Salazar, C., Salas, M., Marrugo, S., Paternina, R., Marrugo, J., & Díez, S. (2022). A human health risk assessment of methylmercury, arsenic and metals in a tropical river basin impacted by gold mining in the Colombian Pacific region. *Environmental Research*, 212. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113120>
- Torres, E. E., López, M., Torres, J. E., Cristian, G., Sánchez, A., Jhonny, S., Luis, M., Valencia, F., Jhon, I. M., Calvopiña, D., & Marín, L. (2022). *Boletín Económico Municipal Yalí*.
- Torres, S. (2014). El análisis coste-beneficio aplicado al medioambiente: repaso metodológico, críticas y problemáticas asociada. *Revista Científica Vozes Dos Vales*. www.ufvjm.edu.br/vozes
- UdeA. (2019). *Resumen de los resultados del Perfil Alimentario y Nutricional de Antioquia 2019, para la acción en momentos de emergencia por el Covid-19*. https://portal.udea.edu.co/wps/wcm/connect/udea/14637389-366a-4bd4-8f7f-a67245a01e16/Resumen_Bajo+Cauca.pdf?MOD=AJPERES&CVID=na0iwj9
- UNODC. (2021). *Colombia explotación de oro de aluvión, evidencias a partir de percepción remota 2021*. https://www.unodc.org/documents/colombia/2022/Junio/Informe_Colombia_Explotacion_de_Oro_de_Aluvion_Evidencias_a_Partir_de_Percepcion_Remota_2021_SP_.pdf
- UPME, & SIMCO. (n.d.). *Oro*. Retrieved February 8, 2023, from <https://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/Paginas/oro.aspx>
- Vargas, F. (2005). *LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL COMO FACTOR DETERMINANTE DE LA SALUD*.
- Veiga, M. M., Masson, P., Perron, D., Laflamme, A.-C., Gagnon, R., Jimenez, G., & Marshall, B. G. (2018). *An affordable solution for micro-miners in Colombia to process gold ores without mercury*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.039>
- Verbel, J. O. (2010). *EFFECTOS DE LA MINERÍA EN COLOMBIA SOBRE LA SALUD HUMANA*. https://www.academia.edu/download/39718193/efectos_mineria_colombia_sobre_salud_humana.pdf.
- Wang, L., Hou, D., Cao, Y., Ok, Y. S., Tack, F. M. G., Rinklebe, J., & O'Connor, D. (2020a). Remediation of mercury contaminated soil, water, and air: A review of emerging materials and innovative technologies. In *Environment International* (Vol. 134). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105281>
- Wang, L., Hou, D., Cao, Y., Ok, Y. S., Tack, F. M. G., Rinklebe, J., & O'Connor, D. (2020b). Remediation of mercury contaminated soil, water, and air: A review of emerging materials

and innovative technologies. *Environment International*, 134.
<https://doi.org/10.1016/J.ENVINT.2019.105281>

WHO, UNEP, & IOMC. (2008). *Guidance for identifying populations at risk from mercury exposure*.
<http://www.who.int/foodsafety/en/>

Zhang, W., Zhen, G., Chen, L., Wang, H., Li, Y., Ye, X., Tong, Y., Zhu, Y., & Wang, X. (2017). *Economic evaluation of health benefits of mercury emission controls for China and the neighboring countries in East Asia*. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.04.010>

10 Anexos

- Anexo A: Yalí_ Hoja de Cálculo AVAD Hg - BC
- Anexo B: Ayapel_ Hoja de Cálculo AVAD Hg – BC
- Anexo C: Correo Hoja de Cálculo del mercurio OMS
- Anexo D: Instrumento Recolección de Información