



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**ALTERNATIVAS PARA EL DIAGNÓSTICO DE
CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA POR VAPORES DE
MERCURIO GENERADOS POR LA MINERÍA AURÍFERA EN
EL MUNICIPIO DE SEGOVIA, ANTIOQUIA -COLOMBIA**

Leonardo Alberto Avila Calles

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Escuela de Gestión Ambiental

Medellín, Colombia

2020



**ALTERNATIVAS PARA EL DIAGNÓSTICO DE CONTAMINACIÓN
ATMOSFÉRICA POR VAPORES DE MERCURIO GENERADOS POR LA
MINERÍA AURÍFERA EN EL MUNICIPIO DE SEGOVIA, ANTIOQUIA -
COLOMBIA**

Leonardo Alberto Avila Calles

Monografía presentada como requisito parcial para optar al título de: **Especialización en
Gestión Ambiental**

Asesor(a):

James Londoño Valencia

Ingeniero Sanitario. Magister en Ingeniería

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Escuela de Gestión Ambiental

Medellín, Colombia

2020

CONTENIDO

	Pag
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Planteamiento del Problema	1
2. OBJETIVOS	11
2.1 Objetivo General	11
2.2 Objetivos Específicos	11
3. MARCO TEORICO	12
3.1 El mercurio como contaminante	12
3.2 Fuentes de contaminación del mercurio	14
3.3 Efectos del mercurio al ambiente y a la salud	16
3.4 Minería aurífera en Colombia y el uso del mercurio	18
3.5 Normativa internacional y colombiana del mercurio en la explotación aurífera	21
3.6 Alternativas para la Cuantificación de vapores de mercurio	24
4. METODOLOGÍA	30
4.1 Tipo de Investigación	30
4.2 Diseño de la Investigación	30
4.3 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos	31
4.4 Procedimiento de la Investigación	31
4.5 Análisis de la Información	32
5. RESULTADOS Y ANÁLISIS	34
6. CONCLUSIONES	49
7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	52

LISTA DE TABLAS

	Pag
Tabla 1.- Comparación de los Principios de Medición de Vapores de Mercurio	42
Tabla 2.- Comparativo de las Especificaciones Técnicas de los Equipos	46

GLOSARIO

ASGM: Small-scale Gold Mining: Minería de oro a pequeña escala

°C: Grados centígrados

DBD: Barrera dieléctrica

°F: Grados Fahrenheit

gr: Gramos

Hg: Mercurio

Hg: Milímetros de mercurio

HgS: Sulfuro de mercurio

IED: Inversión Extranjera Directa

Kg: Kilogramos

L: Litro

m³: Metro cúbico

mg: Miligramos

ng: Nanogramo

PIB: Producto Interno Bruto

Pg: Picogramos

ppm: Partes por millón

ppt: Partes por trillón

ppt: Partes por trillón

UV: Radiación ultravioleta

VRTs: Valores de referencia de toxicidad

µg/L: Microgramos por litro

Mg: Microgramo

u: Unidad de masa atómica unificada

µg: Microgramo

RESUMEN

Esta investigación tiene como objetivo analizar las alternativas para la cuantificación de los vapores de mercurio en el aire, emitidos por actividades de minería aurífera en un municipio del departamento de Antioquia-Colombia. Se empleó una metodología documental con diseño bibliográfico, utilizando la modalidad de monografía. Para la recolección de datos se emplearon fuentes secundarias, específicamente determinadas por publicaciones científicas y hallazgos investigativos. Los datos fueron analizados utilizando técnicas documentales. Los resultados indicaron que para 2018 los valores del ciclo de mercurio se encontraban por encima del límite permisible máximo de $150 \mu\text{g kg}^{-1}$. En 2019, se evidencia una disminución del mismo, sin embargo, la explotación con escasos controles, ha ocasionado perjuicios a la salud de sus habitantes, concluyendo efectos negativos sobre el sistemas nervioso e inmunitario de la población, enfermedades digestivas, pulmonares y renales, incluso con consecuencias fatales. Tras la inhalación mercurio se evidencian trastornos neurológicos y del comportamiento. En la revisión de la documentación, se pudo apreciar que el principio más utilizado en cuanto a los vapores de mercurio corresponde la espectrometría de absorción atómica, se emplean los métodos indirectos tales como la espectroscopia de fluorescencia atómica por vapor frío (CV-AAS), y se destaca como equipo más idóneo el MERCURY TRACKER-3000 XS. Se concluyó la importancia mantener una medición precisa y ajustada a las características ambientales de la zona objeto de estudio; recomendándose un monitoreo permanente de los vapores de mercurio, a los fines tanto de proveer las asesorías técnicas necesarias para lograr el control de la salud poblacional.

Palabras clave: Contaminación, Atmosférica, Vapores, Mercurio, Minería

ABSTRACT

This research aims to analyze the alternatives for the quantification of mercury vapors in the air, emitted by gold mining activities in a municipality in the department of Antioquia-Colombia. A documentary methodology with bibliographic design was used, using the monograph modality. Secondary sources were used for data collection, specifically determined by scientific publications and research findings. The data were analyzed using documentary techniques. The results indicated that for 2018 the mercury cycle values were above the maximum permissible limit of $150 \mu\text{g kg}^{-1}$. In 2019, there is evidence of a decrease in it, however, the exploitation with few controls has caused damage to the health of its inhabitants, concluding negative effects on the nervous and immune systems of the population, digestive, lung and kidney diseases, even with fatal consequences. After inhalation of mercury, neurological and behavioral disorders are evident. In reviewing the documentation, it was observed that the most widely used principle in terms of mercury vapors corresponds to atomic absorption spectrometry, indirect methods such as cold vapor atomic fluorescence spectroscopy (CV-AAS) are used, and the MERCURY TRACKER-3000 XS stands out as the most suitable equipment. The importance of maintaining a precise measurement adjusted to the environmental characteristics of the area under study was concluded; recommending permanent monitoring of mercury vapors, in order to provide the necessary technical advice to achieve control of population health.

Keywords: Pollution, Atmospheric, Vapors, Mercury, Mining

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del Problema

La contaminación atmosférica representa un interés para la ciencia dado que preservar una atmósfera saludable es indispensable para la conservación de la vida en el planeta. Debido a la intrínseca complejidad de este tema, múltiples variables han sido estudiadas en forma individual o conjunta a los fines de detectar los factores contaminantes del ambiente, las alternativas para realizar el diagnóstico de los mismos, así como sus posibles alternativas de solución.

Especialmente en materia de contaminación por mercurio, diversidad de esfuerzos se muestran con un significativo interés y de acuerdo con Weinberg (2007) es un contaminador ambiental que, al ser liberado, se evapora, se transporta a través de las corrientes de aire y luego cae nuevamente a la tierra, algunas veces cerca de la fuente original y en otras ocasiones, según la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2017), se transforma en metilmercurio. Cabe mencionar que este último es un compuesto de mercurio con mayor potencial de toxicidad, que se integra al medio ambiente y, por ende, a la cadena alimentaria. Esta situación coloca en alto riesgo la salud humana, dado que se ha documentado su toxicidad sobre el sistema nervioso, sistema inmunitario, el aparato digestivo, la piel, los pulmones, riñones y ojos del ser humano, así como los efectos negativos en animales, lo cual amenaza la vida en el planeta.

Respaldando lo antes mencionado, se evidencian algunos esfuerzos investigativos sobre el mercurio y su relación con la minería, que se consideran necesarios mencionar, pues representan el objeto de estudio de este trabajo y sus hallazgos previos son referentes pertinentes como antecedentes al problema, destacándose los resultados de estudios nacionales, inclusive en el Departamento de Antioquia, así como otros hallazgos internacionales en la materia.

En la actualidad se encuentran múltiples estudios de los últimos 20 años que han dado soporte a la existencia de contaminación por mercurio, destacándose como un elemento que debe ser ampliamente investigado para disminuir la contaminación ambiental (Instituto de

Investigaciones en Geociencias, Minería y Química Ingeominas, 1995; Veiga, 2002; Olivero et al., 2002; Vega y Baker, 2004; Marrugo-Negrete et al., 2008; Telmer y Veiga, 2008; Cordy et al., 2011, Cordy et al., 2013; Güiza y Aristizábal, 2013; Abreu, 2020). Estos trabajos precedentes consideraron en sus conclusiones que la contaminación resultante en el aire es especialmente peligrosa, sin embargo, reportaron deficiencias en cuanto al mapeo de las distribuciones de estos vapores al compararlo con el criterio emanado de la OMS (2017), limitando determinar la cuantificación de la exposición a vapores de mercurio para calificarlo como riesgosa para la salud humana.

En Colombia, esta problemática fue investigada por Cordy et al. (2011), destacándose como una manifestación local ejemplar del fenómeno de la contaminación por mercurio. En este sentido, Cordy et al. (2011) realizaron una investigación indicando que esta nación contribuía hasta con un 20% en la contaminación global por mercurio en la minería de oro a pequeña escala (asGM), denotando que, el departamento de Antioquia como centro minero de oro, tenía una significativa responsabilidad en esta situación. Por su parte, Osorio et al. (2012) en su estudio realizado en Perú, específicamente en la cuenca del río Madre de Dios reportó que la minería aluvial del oro que se ejecuta tanto informal como ilegalmente en el corredor minero y zonas de exclusión total para la minería, viene generando un impacto contaminante directo e indirecto sobre el ambiente.

Los hallazgos antes mencionados, fueron similares en las regiones de Segovia (Colombia) y Andacollo (Chile), pues Cordy et al. (2013), reportaron que los niveles de mercurio se ubican por encima de los límites establecidos por la OMS (2017), registrando efectos negativos para la salud. En este trabajo se explica de forma no sistemática que los mineros artesanales venden el oro en núcleos urbanos, donde la amalgama de oro se quema para evaporar el mercurio que se añadió durante el procesamiento del mineral, exponiéndose a las comunidades aledañas a concentraciones intermitentes y extremas de vapor de mercurio.

Aunado a lo anterior, Cordy et al. (2013), encontraron que las concentraciones medias registradas por los transectos móviles de un analizador de vapor de mercurio tomadas repetidamente durante varias semanas en 2009 (Andacollo) y 2010 y 2011 (Segovia) fueron 1,26 y 0,338 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente; lo cual es perjudicial para la salud, destacando que los

millones de mineros, así como los no mineros que viven cerca de las tiendas de oro, están en grave riesgo de déficits neurológicos y renales.

A pesar que el Congreso de la República de Colombia se ha enfocado en endurecer leyes para combatir la minería ilegal, la misma se manifiesta aún en diversas zonas que son de difícil acceso a los entes reguladores, observándose que en el estudio de Güiza y Aristizábal (2013), se detectó la existencia de minería de oro informal, registrando que el 87% de las minas no tenían un título minero, lo cual da origen a la quema del oro. En tal sentido, Díaz (2014) reportó en su estudio que las regiones afectadas por la minería del oro, la inhalación de vapores de mercurio junto con la ingesta de peces contaminados, constituyen las principales fuentes de contaminación con este metal, el cual afecta la salud humana de múltiples maneras. Agrega que, en algunos municipios colombianos se han detectado concentraciones de mercurio en aguas superficiales por encima de los 3,0 µg/L y si bien es cierto que el consumo de agua contaminada con mercurio constituye un problema menor en comparación con otras fuentes de contaminación, estas bajas concentraciones también contribuyen gradualmente a la carga contaminante que afecta la salud humana, tal como ha sido reportado por diferentes investigadores.

Abreu (2020) ratificó la peligrosidad de estas prácticas al destacar que, durante estos procesos, el vapor de mercurio se emite directamente a la tienda de oro o se expulsa a la calle utilizando sistemas de ventilación rudimentarios, a menudo en concentraciones determinadas como peligrosas para la salud humana y ambiental.

Considerando el interés de este trabajo enfocado en analizar las alternativas para la cuantificación de los vapores de mercurio en el aire, emitidos por actividades de minería aurífera, es pertinente también considerar los hallazgos relacionados con los principios de medición de tales vapores y el equipamiento considerado en los estudios previos. Se destaca que al analizar la contaminación en Segovia Cordy, Veiga et.al. (2011) utilizaron los equipos LUMEX RA 915+ (de la Universidad de Columbia Británica, CERM3) y el Espectrómetro Jerome 431X (de Corantioquia), empleando especialmente este último para la medición de las altísimas concentraciones de mercurio producidas en el proceso de ore en los entables. Estos autores en sus resultados proporcionaron una impresión de la exposición aguda en

diferentes entornos y durante cinco días de muestreo en la región, dicha información fue listada y organizada para mostrar la contaminación por lugares individuales.

En un estudio realizado por Cordy, Veiga et.al. (2013), se mapearon las concentraciones de mercurio en Andacollo y Segovia, encontrando que el monitoreo muestra que las concentraciones extremas ocurren con frecuencia y en forma predecible en las ubicaciones donde se procesa el oro, mientras que las mediciones de los medidores colocados en la torre muestran que penachos de mercurio por la quema de amalgama persisten durante 15 minutos o más.

Los mismos autores antes mencionados, reportaron que, de manera independiente algunas empresas, gobiernos y organizaciones no gubernamentales han desarrollado diferentes dispositivos para capturas de mercurio de tiendas de oro en varios lugares. Entre ellos incluyeron aquellos que funcionan con ventiladores eléctricos o compresores “Bubbler” para extraer el vapor a través de un recipiente con agua; los compresores "deflector" que utilizan placas deflectoras para capturar aerosoles de mercurio sin usar agua; así como condensadores “Scrubber” para extraer el vapor a través de una lluvia o neblina rociada en una sección del tubo de escape y filtros. En este estudio se concluyó que su eliminación segura es un problema significativo, pero no se realiza una selección de las mejores alternativas para lograr tales objetivos.

Al respecto, la empresa Ametek Brookfield (2020) reporta que los sensores de película dorada fueron los primeros analizadores realmente confiables para la detección de mercurio de alta gama con pocas interferencias, concluyendo que el Jerome® 431-X es un analizador de vapor de mercurio de película dorada durable, confiable y fácil de usar; patentado para detectar niveles bajos de vapor de mercurio en campo o en laboratorio.

Siguiendo con las investigaciones previas, la empresa Evisa (2010) estudió la espectroscopia de absorción atómica para la cuantificación de mercurio en aire, concluyendo que la misma es útil para el análisis de mercurio de bajo nivel, pero tiene muchos tipos diferentes de interferencias que no se pueden filtrar. Destacó que un usuario de este principio es el Equipo LUMEX RA 915+, el cual señala como un instrumento analítico de alta sensibilidad para el monitoreo ambiental, especialmente para la detección en tiempo real de vapor de mercurio en el aire y otros medios.

Por su parte, la empresa PS Analytical (2020) estudió las formas de detección de los vapores de mercurio indicando que uno de los métodos más confiables es la espectroscopia de fluorescencia atómica, esta muestra parámetros estrictos para el análisis de mercurio y opera bajo el principio que cuando un átomo de mercurio absorbe la energía de la longitud de onda UV, un electrón pasa de un estado fundamental estable a un estado excitado inestable; concluyendo que existen dos productos de PS Analytical que usan este principio, que son el Sir Galahad usado típicamente para aplicaciones gaseosas como gas de pila, gas natural y aire, y el Millennium Merlin empleado para muestras líquidas y suaves.

Como resultado de sus investigaciones, la empresa Thomson Environmental Systems (2020) propuso el Equipo denominado TEKRAM 2537X como analizador de mercurio en el aire. Este equipo utiliza conjuntamente dos de los métodos descritos anteriormente, un sensor de película dorada y un Cold Vapor Atomic Fluorescence Spectrophotometer (CVAFS); concluyendo que esta combinación proporciona una alta sensibilidad y fiabilidad de precisión. Por su parte, la empresa Envea (2020) enfocó su estudio y propuesta en una modalidad portátil conocida como MERCURY TRACKER-3000 XS, que usa el principio de absorción atómica y tiene diferentes campos de medida precisos (0,1-100 / 0-1000 / 0-2000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Los estudios precedentes muestran la existencia de una problemática visible en los hallazgos obtenidos en torno a la contaminación atmosférica por vapores de mercurio, dada la repercusión que ello tiene sobre la salud de las comunidades y en general sobre la preservación de la vida. Estos efectos han sido documentados no solo por los autores antes citados, sino también por otros expertos en el área, tal como es el caso de Poulin y Gibb (2008), del equipo integrante de la OMS, quienes reportan la exposición a mercurio a niveles superiores a 50 veces comparado con los límites de exposición establecidos por esta organización. (15 $\mu\text{g}/\text{l}$ Hg).

Para comprender la magnitud de la problemática sobre la contaminación ambiental por vapores de mercurio, la OMS (2017) afirma que los niveles de contaminación del aire por vapores de mercurio siguen siendo peligrosamente altos en diversas partes del mundo. Evidencias recientes sugieren también que el mercurio es responsable de la reducción de actividad microbiológica vital para la cadena alimentaria terrestre en los suelos de amplios

sectores de Europa, y potencialmente en muchas otras partes del mundo con suelos de características similares.

La mayor fuente global de mercurio es la extracción de oro a pequeña escala. Esta actividad es realizada particularmente por pequeños grupos de personas que extraen el oro de manera relativamente sencilla y a bajo costo, por lo general, en entornos no regulados. La Agencia Europea del Medio Ambiente (2019), estima que más de un tercio de las emisiones globales de mercurio corresponde a esta fuente, por lo que centrarse en este ámbito introduciendo tecnologías alternativas más seguras podría reducir considerablemente su uso y sus emisiones globales.

Pese a las reducciones en el uso y las emisiones de mercurio alcanzadas en regiones como Europa y América del Norte, es pertinente encontrar las alternativas para el diagnóstico de los vapores de mercurio, dado que estas emisiones pueden recorrer largas distancias. En el caso de la región Latinoamericana, Rubiano (2018), expresa que el bioma amazónico ha venido experimentando un boom minero propiciado por un alza sostenida de los precios internacionales del oro que comenzó en 1979 y aumentó en un 500% solo en los últimos quince años. Como resultado de la explotación del oro, se reportó neurotoxicidad en poblados completos de México (Querétaro), y se destacan a Bolivia, Colombia, Ecuador y Perú entre los países latinoamericanos con mayores emisiones de mercurio de la minería de oro artesanal.

Para comprender la problemática de la explotación minera del oro en Colombia, país objeto de estudio, es pertinente considerar los planteamientos de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE, 2016), la cual afirma que este país, cuenta con abundantes recursos naturales, lo cual contrasta con la pobreza de la población que ha dado origen a una significativa desigualdad económica, social y cultural, en la cual el conflicto armado ha jugado un papel crucial, dando origen a que la extracción de oro sea una de las mayores actividades y fuentes económicas de la población, observándose que en el año 2009, la inversión en el sector minero fue de USD\$3 mil millones de dólares.

Al respecto, Rettberg y Ortiz (2016) reportan que los departamentos donde la extracción de oro es una actividad prevalente incluyen a Choco, Antioquia, Valle del Cauca, Cauca, Nariño y Bolívar donde también se encuentran áreas de cultivos ilícitos, creando un

vínculo estrecho entre estas actividades y la desregulación de las mismas. También, Güiza (2013) explica que a pesar de que la minería es regulada a nivel regional y nacional por Ingeominas y el Ministerio de Minas y Energía, se observa que el 87% de los mineros en Colombia no poseen título minero para extraer oro, y los grupos armados han podido tomar control de diversas áreas mineras. Destaca que la posesión de título minero es también controversial, pues a pesar de que éste proporciona el derecho a explorar y explotar oro bajo regulaciones ambientales, la mayoría de mineros han hecho de la explotación del oro parte de su cultura por generaciones y no tienen interés en participar en la adjudicación de tales títulos. En otros casos, se encuentran ubicados en áreas remotas donde no tienen acceso a las oficinas de la Agencia Nacional de Minería o no cuentan con los recursos económicos para su tramitación, ya que son los mismos requerimientos que para mineros de gran escala.

Debido al conflicto socio cultural y económico en estas regiones de Colombia, Rettberg y Ortiz (2016) sostienen que la minería ilegal es difícil de controlar, y grupos armados (ya sean guerrilla, paramilitares o bandas criminales) se han aprovechado de esto para saquear oro, estimándose que en Colombia la minería ilegal genera cerca de USD\$5 mil millones de dólares en ingresos/año. Y aunque la minería ilegal no está necesariamente asociada con la minería artesanal, es una actividad que no cuenta con los estándares mínimos de seguridad industrial y ambiental, produciéndose en su explotación no regulada, la transferencia de mercurio a las comunidades.

La situación antes descrita de acuerdo con González (2018), ha derivado registros en materia de salud que resultan preocupantes, pues se ha reportado en los habitantes de las comunidades aledañas niveles superiores a los permitidos en muestras de sangre, orina y cabello, que no solo afecta a las personas que trabajan directamente en las minas, sino que además indirectamente son expuestas las personas que habitan los sitios cercanos a las minas o a los ríos donde es liberado este metal tóxico. Los integrantes de estas comunidades reflejan un alto índice epidemiológico de temblores, dolores de cabeza, trastornos del sueño y en general, afectaciones de orden neurológico.

González (2018) incluye al departamento de Antioquia dentro de las principales áreas de liberación de mercurio en Colombia, pues es donde se presenta la pequeña y mediana minería de oro, principalmente en el Bajo Cauca y nordeste de Antioquia, donde se encuentra

el municipio de Segovia, objeto de interés en este trabajo. González documentó para el gobierno de Colombia y el Ministerio de Salud de este país, los resultados obtenidos en el departamento de Antioquia, los cuales ratifican que los niveles de mercurio están por encima de los permitidos y que afectan la salud de los individuos expuestos directa e indirectamente. Cabe mencionar, que la misma autora destaca la problemática existente cuando refiere efectos desfavorables sobre el sistema nervioso en el 41,2 % de los sujetos incluidos en dicha evaluación. Sumado a esto, el efecto de los vapores de mercurio no solamente se manifiesta en la salud de los individuos y de las comunidades, sino que también se detectaron niveles de mercurio por encima de los permitidos en especies de peces carnívoros y no carnívoros; lo cual supone un efecto expansivo, si estos niveles de mercurio se transmiten en especies que forman parte de la variedad alimenticia de la población.

En este orden de ideas, en el municipio de Segovia ubicado en el departamento de Antioquia, las empresas del área de minería se han mostrado interesadas en dar respuesta a la problemática antes mencionada, y a razón de ello, se han enfocado en participar en la incorporación de alternativas para la cuantificación de los vapores de mercurio en el aire, emitidos por actividades de minería aurífera en el municipio. Dicho interés responde a que están conscientes que su actividad de explotación aurífera requiere de medios para evitar que se produzca el envenenamiento por mercurio, además de cumplir con las disposiciones y restricciones legales existentes en el área.

Cordy et al. (2011), refieren la necesidad de contar con documentación válida y confiable sobre alternativas para la cuantificación de los vapores de mercurio en el aire, emitidos por actividades de minería aurífera, lo cual también es destacado por Gonzalez (2018) y Abreu (2020), quienes reportan que en el Departamento de Antioquia las amalgamas con 40% a 50% de mercurio se queman en tiendas de oro en zonas densamente pobladas, sin ningún sistema de condensación. A los efectos de realizar las fundiciones, utilizan filtros rudimentarios, que permiten que el escape de estas tiendas libere según Poulin y Gibb (2008), 100 veces más concentración de mercurio que los niveles permitidos por la OMS; situación que requiere ser solventada.

Algunos esfuerzos por generar estas alternativas han estado impulsados por la labor del equipo MAPRE de la Universidad de Antioquia, enfocados en aplicar estrategias

educativas dirigidas a rebajar de manera significativa la contaminación interna en unos siete entables en el municipio de Segovia, sin embargo, además de la capacitación y educación permanente, es necesaria la investigación documental que conlleve a un análisis de las alternativas para el diagnóstico de contaminación atmosférica por vapores de mercurio generados por la minería aurífera. Esto se justifica en tanto la química troposférica del mercurio, así como la especiación atmosférica, tienen una significativa responsabilidad en el transporte de mercurio a larga distancia; fenómeno que ha causado preocupación por los efectos toxicológicos que el aumento en la concentración de mercurio pueda tener en un ecosistema frágil en momentos en que la actividad biológica se intensifica.

Esta situación se torna aún más preocupante cuando se entiende que a pesar de que las leyes colombianas regulan esta actividad, todavía existen múltiples prácticas de explotación de la minería del oro que se calificarían como ancestrales y, por ende, se realizan procedimientos y utilizan equipamiento que pudiera encuadrar en los límites no permitidos o considerados como ilegales.

De lo anteriormente mencionado, se puede afirmar que el mercurio aplicado a la minería es especialmente peligroso y tiene importantes consecuencias para la salud de las poblaciones vulnerables y para la conservación del ambiente, por lo cual es apremiante emplear métodos de trabajo más seguros para prevenir la exposición a los vapores de mercurio y su toxicidad, todo lo anterior ha conducido a la consideración del siguiente problema de estudio:

¿Cuáles serían las alternativas para la cuantificación de los vapores de mercurio en el aire, emitidos por actividades de minería aurífera en un municipio del departamento de Antioquia-Colombia?. Con el fin de aportar a esta problemática, en el presente trabajo se propone responder a las siguientes interrogantes que sistematizan la investigación, pues es interesante considerar ¿cómo es el ciclo del mercurio en el proceso de beneficio del oro y su impacto en la calidad del aire en la zona de estudio?, ¿cuáles son los efectos en la salud de la población, causados por la contaminación atmosférica por vapores de mercurio asociados a la minería aurífera? y ¿cuáles son los principios, métodos y equipos de medición idóneos para el monitoreo y análisis de vapores de mercurio asociados a la minería aurífera?.

A partir de la respuesta a estas interrogantes se pretende generar conocimiento sobre posibles alternativas para la cuantificación de los vapores de mercurio en el aire, emitidos por actividades de minería aurífera en un municipio del departamento de Antioquia-Colombia; permitiendo generar además, de un conocimiento sistemático y objetivo, proponer soluciones posibles a la problemática planteada que puedan ser implementadas por estas empresas, así como servir de soporte para otros estudios más específicos y de mayor profundidad en el área.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Analizar las alternativas para la cuantificación de los vapores de mercurio en el aire, emitidos por actividades de minería aurífera en un municipio del departamento de Antioquia-Colombia.

2.2 Objetivos Específicos

Identificar el ciclo del mercurio en el proceso de beneficio del oro y su impacto en la calidad del aire en la zona de estudio.

Describir los efectos en la salud de la población, causados por la contaminación atmosférica por vapores de mercurio asociados a la minería aurífera.

Analizar los principios, métodos y equipos de medición idóneos para el monitoreo y análisis de vapores de mercurio asociados a la minería aurífera.

3. MARCO TEORICO

Seguidamente, se expone y recopila las bases teóricas que soportan el presente trabajo, así como también se desarrollan los distintos puntos de vista de los autores en el área. Este marco teórico muestra tanto los conceptos asociados al mercurio como contaminante, fuentes, efectos sobre el ambiente y la salud, las características de la minería aurífera y el uso del mercurio dentro de la misma, las normativas que rigen esta actividad a nivel mundial y en Colombia, así como los principios, métodos y equipos utilizados en la cuantificación del mercurio.

3.1 El mercurio como contaminante

La contaminación del aire representa en el criterio de la OMS (2007), un importante riesgo medioambiental para la salud, la preservación de las especies y del planeta en general. Por ello, a través de sus recomendaciones y acuerdos se ha enfocado en regular las actividades de explotación y producción responsables de los niveles de contaminación del aire. Esto se considera esencial para controlar la carga de morbilidad derivada de las emisiones de vapor contaminante en zonas periurbanas y rurales.

Uno de los contaminantes del ambiente son los vapores de mercurio, los cuales son objeto de estudio en este trabajo. Cabe mencionar que, el mercurio, de acuerdo con Green Facts (2004) es un elemento constitutivo de la tierra, siendo clasificado como un metal pesado, de color blanco plateado brillante, que se presenta en estado líquido a temperatura ambiente. Se le identifica como mercurio elemental o metálico cuando se presenta en su forma pura, lo cual no es frecuente, pues usualmente se presenta en compuestos y sales inorgánicas. Los vapores de mercurio ocurren a temperatura ambiente, sin embargo, si no está encapsulado, se evapora, siendo incoloro e inodoro. Se destaca que a medida que la temperatura aumenta, más vapores emanarán del mercurio metálico líquido.

En tal sentido, Poulin y Gibb (2008) expresan que el mercurio es un elemento metálico presente de manera natural en la corteza terrestre, que es potencialmente

transportado en el ambiente por el aire y el agua. El mercurio se libera a la atmósfera en forma de vapor cuando ocurren fenómenos naturales, tales como la actividad volcánica, incendios forestales, movimiento de masas de agua, erosión de rocas y diversos procesos biológicos. Para la identificación química del mercurio se utiliza la nomenclatura simbólica Hg, siendo su masa atómica relativa 200.59 u, número atómico 80, teniendo un punto de fusión correspondiente a -37.89°F (-38.83°C) y una densidad de 13534 kg/m^3 .

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2011) el vapor de mercurio constituye la forma predominante del mercurio en el aire, destacando que puede ser adsorbido por otras partículas y estar presente en el polvo del aire. Por lo tanto, es necesario medir o estimar con modelos la concentración de mercurio elemental en aire, siendo ello correspondiente con los propósitos de esta monografía.

En este orden de ideas, Cano (2012) explica el proceso contaminante del mercurio, indicando que éste tiene un origen magmático, emanando como producto de desgasificación a lo largo de fallas profundas. De este modo, el mercurio inicia su ciclo biogeoquímico pasando a la corteza terrestre y, de ésta, al aire, el agua y los suelos, para pasar a las plantas, los animales y, por último, al ser humano. Posteriormente, el mercurio y sus compuestos reinician el ciclo en sentido inverso en formas sólida, disuelta, absorbida y gaseosa. Esto último se explica porque este metal posee algunas propiedades únicas que le permiten tener una fácil movilidad en diferentes medios físicos y químicos. Explica que la actividad humana ha generalizado los casos de exposición, contribuyendo con un legado de mercurio en vertederos, los desechos de la minería y los emplazamientos, suelos y sedimentos industriales contaminados.

Respecto a los criterios de toxicidad del mercurio, la OMS (2007) refiere que el nivel de concentración máximo permisible de mercurio en el aire es de 1 ug/m^3 anual, siendo el nivel de concentración máximo por día de $0,3\text{ ug/m}^3$. Esta organización establece que la evaluación que estos valores límites de referencia de toxicidad no representan una clara línea entre seguro e inseguro. La razón es que han incorporado varios factores de seguridad/incertidumbre en su cálculo de Valores de Referencia de Toxicidad (VRTs) de mercurio lo que significa que una pequeña excedencia de uno de estos valores no inmediatamente causará efectos adversos.

Por su parte, Ramírez (2008) establece que las descripciones de los efectos tóxicos de sus vapores como riesgo laboral han sido descritas por diversos organismos, sin embargo, la investigación actual en salud ha establecido los límites de toxicidad del mercurio entre 50 y 160 µg/día.

Se evidencia en lo antes expuesto, que los autores coinciden al considerar el mercurio como un metal líquido, siendo lo interesante que el mismo tiene la potencialidad de evaporarse, que se reincorporan a las partículas del ambiente y de las personas, constituyendo un riesgo importante al convertirse en vapores de mercurio, los cuales son importante someter a la cuantificación para lograr el control de los efectos y si es posible su eliminación.

3.2 Fuentes de contaminación del mercurio

Existen diversas fuentes de contaminación del mercurio. Al respecto, Nriagu (1992) expresa que entre las fuentes contaminantes del mercurio se incluyen las de origen natural. La mayor fuente natural de mercurio es la desgasificación de la corteza terrestre, emisiones de los volcanes y la evaporación desde los cuerpos de agua. Sin embargo, explica Marins et al. (2000) que, gran parte del mercurio encontrado en la atmósfera y en los ecosistemas hídricos, puede ser transportado a zonas urbanas por efecto de la deposición atmosférica, proviene de actividades antropogénicas, lo cual hace difícil valorar en forma cuantitativa la contribución relativa del mercurio de origen natural y antropogénico que son depositados en la biosfera.

En cuanto a las fuentes antropogénicas, Fitzgerald et al. (1991) afirman que la contaminación ocasionada por el hombre ocurre por diversas formas, entre ellas las descargas de desechos, así como la emisión directa a la atmósfera en la explotación minera del metal y del oro, la quema de los combustibles fósiles representa una fuente importante de contaminación atmosférica, así como la incineración de desechos sólidos, los cuales incluyen mercurio volatilizado de baterías desechadas y durante la fundición de cobre y zinc. La contaminación con mercurio en las zonas tropicales, particularmente en Colombia, es originada en los procesos de beneficio del oro. La amalgama mercurio-oro obtenida es

quemada usualmente a campo abierto dejando libre el oro y liberando el tóxico metálico en forma de vapor directamente a la atmósfera. La mayoría de estos procesos son realizados muy cerca de las viviendas de los mineros, de tal forma que las familias respiran gran parte del vapor de mercurio volatilizado.

Para Gaona (2004), al considerar las fuentes contaminantes del mercurio, es necesario entender la forma en la cual ocurre el ciclo del mercurio, el cual supone un flujo continuo de mercurio entre atmósfera, tierra y agua. Este ciclo está basado en el comportamiento del Hg en los diferentes medios, en las reacciones químicas implicadas, así como en parámetros de transporte y su destino final. En cualquier punto del planeta, la cantidad de mercurio presenta un ciclo global natural, un ciclo global perturbado por la actividad humana, fuentes regionales de mercurio y fuentes locales de mercurio.

Con el fin de adjudicar valores cuantitativos a dicho ciclo, el mismo autor antes mencionado, indica que es necesario conocer las cantidades de mercurio presentes en las diferentes reservas terrestres. Se ha estimado que los océanos son, con diferencia, las mayores reservas de mercurio, con alrededor de 10^{17} g de mercurio principalmente en forma de HgS. Las aguas oceánicas contendrían alrededor de 10^{13} g, la misma cantidad que suelos y sedimentos conjuntamente; la biosfera, principalmente en forma de biota terrestre, contendría 10^{11} g; 10^8 g la atmósfera y 10^7 g las aguas terrestres. En este balance quedaría, sin embargo, excluido el mercurio presente en minas y otras reservas subterráneas.

Agrega Gaona (2004) que, es necesario aportar datos acerca de la presencia antropogénica de mercurio en el medio ambiente. Debido a la gran movilidad del mercurio dentro de su ciclo, esta cuantificación se hace especialmente difícil. Estudios recientes indican por ejemplo que de las aproximadamente 200.000 toneladas de mercurio emitidas a la atmósfera desde 1890, aproximadamente el 95% se encuentran en suelos terrestres, alrededor de un 3% en aguas oceánicas y un 2% en la atmósfera. También se estima que entre el 40 y el 75% del mercurio atmosférico actual tiene como origen fuentes antropogénicas.

Corroborando lo mencionado, Casas et al. (2015) sostienen que el mercurio es emitido a la atmósfera por fuentes naturales, por actividades productivas e industriales, así como los desechos de la minería y de los sedimentos industriales, los cuales han incrementado la exposición a este metal. Actualmente, las emisiones de mercurio provienen

de cuatro fuentes principales: liberaciones naturales, liberaciones producidas por el hombre como resultado de la movilización de impurezas de mercurio en materias primas (carbón, gas y petróleo); liberaciones producidas por el hombre como resultado del uso intencional de mercurio en productos y procesos productivos.

Se afirma la existencia de fuentes de mercurio, indicando que, las emisiones de mercurio se pueden agrupar en cuatro categorías: a) Fuentes naturales: liberaciones debidas a la movilización natural del mercurio tal como se encuentra en la corteza terrestre, como la actividad volcánica o la erosión en las rocas; b) Las liberaciones antropógenas (asociadas con la actividad humana) resultantes de la movilización de impurezas de mercurio en materias primas como los combustibles fósiles, en particular el carbón, y en menor medida el gas y el petróleo y otros minerales extraídos, tratados y reciclados; c) Las liberaciones antropógenas resultantes del uso intencional del mercurio en productos y procesos durante la fabricación, los derrames, la eliminación o incineración de productos agotados y d) La removilización de liberaciones antropógenas pasadas de mercurio anteriormente depositado en suelos, sedimentos, masas de agua, vertederos y acumulaciones de desechos o residuos (Induanálisis, 2020)

3.3 Efectos del mercurio al ambiente y a la salud

En cuanto a los principales efectos sobre la salud de la exposición al mercurio elemental, la OMS (2007), indica que el mercurio elemental e inorgánico genera efectos sobre el sistema nervioso que es el órgano más vulnerable a la exposición al mercurio. Se han descrito diversos trastornos neurológicos y conductuales, como temblores, irritabilidad o reactividad a la estimulación, inestabilidad emocional, insomnio, pérdida de memoria, alteraciones neuromusculares, cefaleas, polineuropatía y déficits en las pruebas de las funciones cognitivas y motoras. Los efectos son similares con distintos tiempos de exposición, pero pueden volverse graves e irreversibles al aumentar la duración y la concentración.

La misma organización antes mencionada acota que, también se evidencian efectos renales pues es uno de los órganos sensibles a la toxicidad de los vapores de mercurio, aunque

los efectos se observan con concentraciones altas. La inhalación de vapores de mercurio en altas concentraciones puede causar una proteinuria transitoria macroscópica o leve, alteraciones de la excreción urinaria de ácido, hematuria, oliguria e insuficiencia renal aguda. También la exposición crónica a compuestos inorgánicos de mercurio por vía oral causa lesiones renales, y se han descrito varios casos de insuficiencia renal tras la ingestión de cloruro mercuríco.

Expresa la OMS (2007), que en casos de exposición aguda a altas concentraciones de mercurio se han observado elevación de la presión arterial, palpitaciones y aumento de la frecuencia cardiaca. Con compuestos de mercurio inorgánico, se han observado erupciones, habones y dermatitis tras el contacto profesional y accidental. Se evidencia una carga de morbilidad por inhalación de vapores de mercurio y el contacto con el cloruro mercurioso contenido en polvos y pomadas. La exposición aguda a vapores de mercurio en altas concentraciones causa trastornos respiratorios tales como tos, disnea y opresión o sensación urente en el pecho. La exposición profesional crónica causa síntomas similares y efectos más graves, como neumonitis, disminución de la función respiratoria, obstrucción de las vías respiratorias, hiperinsuflación, disminución de la capacidad vital, dificultad respiratoria, edema pulmonar, y fibrosis por neumonía lobular.

Por su parte, Cano (2012) afirma que la exposición a mercurio elemental, conlleva el riesgo de padecer hidrargirismo o mercurialismo, que cursa con alteraciones funcionales expresadas en déficits orgánicos, neurológicos, cognitivos y psicológicos del individuo. Por su parte, Schmidt (2012) expresa que las formas inorgánicas como las orgánicas pueden causar problemas neurológicos. Sin embargo, el metilmercurio, que se aloja fácilmente en el cerebro, generalmente se considera la especie más tóxica, pudiendo producir daño localizado al cerebelo y corteza visual, generando alteraciones evolutivas, problemas visoespaciales, de funcionamiento, de la memoria y el estado de ánimo.

También Casas et al. (2015) expresan que el mercurio y sus compuestos son tóxicos para los humanos, especialmente para el sistema nervioso. La exposición durante el embarazo puede alterar el desarrollo del cerebro, el sistema circulatorio y el corazón del feto. Además, existe evidencia sobre la asociación entre la exposición a los compuestos de mercurio y el

cáncer. También los daños neurológicos son comunes entre los mineros que incluyen la ceguera, pérdida de memoria y problemas del habla.

La exposición al mercurio inorgánico provoca, por lo general, el desarrollo de un sabor metálico, dolor orofaríngeo localizado, náuseas, vómitos, diarrea sanguinolenta, dolor cólico abdominal, disfunción renal y anomalías neurológicas; mientras que el mercurio orgánico puede derivar en neurotoxicidad retardada (OrphaNet, 2020)

Como puede observarse, son diversos los efectos de los vapores de mercurio sobre la salud, siendo por ello esencial tener alternativas de cuantificación que permitan diagnosticar los niveles de mercurio en el aire, para estar en condiciones de asumir las acciones para evitar las posibles consecuencias en la vida del planeta.

3.4 Minería aurífera en Colombia y el uso del mercurio

El sector minero representa un sector estratégico para Colombia en los últimos años. En efecto, de acuerdo con la Dirección de Minería Empresarial (2019) en el primer trimestre de 2019, el valor del Producto Interno Bruto (PIB) fue de 203,04 billones de pesos a precios constantes de 2015, presentando un crecimiento de la economía colombiana de 4,79% y 2,77% con relación al mismo período de 2017 y 2018. Para el sector minero, se observan variaciones comparado el primer trimestre de 2018, ubicándose en 5,32% explotación de minas y canteras.

Asimismo, expone que el PIB de los minerales metalíferos del primer trimestre de 2019 fue de \$647.000 millones de pesos y el valor de las exportaciones del sector minero asciende a Us\$2.086,80 millones de dólares, ubicándose el valor de las exportaciones de oro para el primer trimestre de 2019 en 385,08 millones de dólares. El oro alcanzó un precio promedio de Us\$1.304,29 por onza troy para el primer trimestre de 2019, presentando una recuperación de 6,97%, 3,77%, 2,07%, 2,29%, 7,55% y 6,20%.

Pese a considerarse valores significativos, el informe de la Dirección de Minería Empresarial (2019) reporta que al comparar los datos con los correspondientes a años anteriores, en lo referido al PIB minero presenta un decrecimiento para el primer trimestre

2019, con respecto a los trimestres de los años 2016 y 2017, esto se debe a una caída en los volúmenes de producción y exportaciones principalmente del sector carbón al igual que de los minerales metálicos, como el oro y níquel, que han permitido un decrecimiento en el valor del PIB Minero.

En materia de explotación minera aurífera, Goñi et al (2014) afirma que es pertinente destacar los esfuerzos del gobierno de Colombia por normatizar la actividad en concordancia con los acuerdos suscritos por el país en el ámbito internacional. En este sentido, se evidencia que existen grandes corporaciones que se han incorporado a las prácticas legales permitidas, a través de la obtención del título minero, y, por consiguiente, realizan sus prácticas dentro de los parámetros establecidos para eliminar la contaminación del ambiente por vapores de mercurio.

Sin embargo, los mismos autores indican que existe otro sector que se enfoca en la explotación de la minería aurífera de manera informal, ya que no cuentan con el título correspondiente, y no consideran los aspectos técnicos, sociales y laborales establecidos en las leyes colombianas. Dicha minería informal hace referencia a aquella actividad de extracción de oro que se lleva a cabo sin tener un título minero debidamente registrado en el catastro minero, y que puede incluir la minería artesanal, tradicional, ocasional, de subsistencia, a pequeña y mediana escala sin títulos mineros, excluyendo en este caso, a la minería criminal, vinculada con el control de grupos al margen de la ley o el financiamiento de actividades ilícitas.

A los efectos de explicar la minería aurífera en Colombia, se aborda la explotación, venta y comercialización del oro. En el proceso de explotación, uno de los mayores impactos ambientales de la extracción del oro es el uso de mercurio. Marrugo et al. (2008) afirman que, en el proceso de extracción, el oro se adhiere al mercurio hasta formar una amalgama pesada que luego es fácilmente separada por calentamiento, mientras que los vapores de mercurio son liberados al ambiente. Aunque solo el 10% de mercurio utilizado se adhiere al oro, se necesitan 9 gr por cada 1gr de oro, lo que significa que el 90% es liberado al ambiente. Debido a ello, en el proceso de extracción, el mercurio es altamente contaminante debido a su persistencia, bio-acumulación y toxicidad.

En referencia al uso del mercurio en la actividad aurífera en Colombia, de acuerdo con García y Molina (2010), la amalgamación es una mezcla no homogénea producida por la alta densidad de algunos metales, entre ellos, el oro, que logran romper las fuerzas de tensión superficial del mercurio para quedar atrapados dentro de éste. Por esta razón, algunos mineros agregan otros ingredientes como melaza, jugo de limón, bicarbonato de sodio, entre otros, con el objeto de reducir la tensión superficial del mercurio para poder atrapar más oro. Respecto a la cadena de valor completa para la minería aurífera se observa que en el eslabón de aprovisionamiento de insumos/maquinaria son casi igual de importantes los comerciantes locales o regionales en el suministro de insumos; así como también participan las empresas nacionales en la cadena de suministro.

Considerando el proceso de ventas, los mismos autores antes mencionados, explican que con excepción de las grandes corporaciones que se rigen por los procesos contables legales que las rigen, se puede observar que, en el caso de la minería informal, la actividad productiva se realiza fuera del radar del Estado, la teneduría de libros o los asientos contables para llevar registro interno de las operaciones del negocio, dificultando la trazabilidad sistemática de las operaciones del sector. Esta dificultad se incrementa al considerar que las transacciones de pago se realizan en efectivo, o a través del uso del financiamiento de proveedores, donde no es empleada la intermediación bancaria. La venta del oro se realiza usualmente dentro del mismo municipio de explotación y solo se trasladan hacia otro si la oferta por el oro es más atractiva.

En referencia al proceso de comercialización, García y Molina (2010), las empresas con título minero se concentran en comercializadores, mientras que los mineros informales al sector de compraventas e inclusive a pagar los costos de explotación y deudas personales, ello conduce a considerar que el radio de ventas puede ubicarse en lugares muy distantes al punto de extracción y ello genera desvío de regalías y dificultara aún más la trazabilidad del origen del oro.

Como puede observarse, la actividad aurífera muestra dos escenarios esenciales que se expresan entre la actividad formal e informal, los cuales connotan tanto la actividad de explotación, venta y distribución, siendo por ello relevante considerar actividades efectivas

para cuantificar las emisiones de vapores de mercurio que pueden ser emanados al ambiente causando un deterioro de la calidad del aire.

3.5 Normativa internacional y colombiana del mercurio en la explotación aurífera

Dada la importancia del ambiente y especialmente la relacionada con la explotación aurífera, se han emitido y aceptado por diversidad de países, un conjunto de regulaciones que norman esta actividad. El primer tratado en abordar la contaminación atmosférica a nivel internacional fue el convenio de Ginebra sobre Contaminación Atmosférica Transfronteriza a Gran Distancia (1979), regulando la liberación a la atmósfera, por el ser humano, de sustancias o de energía que tengan, en otro país, efectos perjudiciales para la salud, el medio ambiente o los bienes materiales, sin que sea posible distinguir las fuentes individuales y colectivas de dicha liberación. Este convenio antes mencionado, fue suscrito en su momento por las autoridades colombianas.

A partir del convenio anterior, surgieron otros en distintas áreas de contaminación ambiental, sin embargo, se mencionan los concernientes a la contaminación por vapores de mercurio, interés de este trabajo. En tal sentido, un acuerdo se estableció en el convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes (COP) del PNUMA (2001), enmendado en 2009, constituyendo un instrumento jurídicamente vinculante cuyo objetivo es proteger la salud humana y el medio ambiente, reduciendo o eliminando la producción y uso de estos contaminantes, así como sus emisiones y liberaciones. Este convenio también fue suscrito por Colombia a través de su Ministerio de Relaciones Exteriores como una clara muestra de apoyo a la protección ambiental y consecuente amparo a la salud, y a partir de su firma se introdujeron nuevos métodos para el logro de los objetivos de identificación, prevención, reducción y eliminación de estas sustancias y sus residuos.

Cabe destacar, la normativa emanada del convenio de Minamata sobre el mercurio (2013), el cual hace un llamado a proteger la salud humana y el medio ambiente de las emisiones y liberaciones antropogénicas de mercurio y de compuestos de mercurio. El gobierno de Colombia, junto con 91 países más, suscribió este instrumento el 10 de octubre de 2013. El convenio propone una reacción de la comunidad internacional frente los

problemas ambientales y de salud, especialmente en los países en desarrollo, derivados de la exposición al mercurio de las poblaciones vulnerables, en particular las mujeres y los niños y, por tanto, de las generaciones venideras. En este aspecto, Colombia formó parte oficial de este convenio en el año 2019, comprometiéndose a regular las emisiones y liberaciones de mercurio en el mundo y enfrentar sus amenazas.

Una de las organizaciones de mayor reconocimiento en la materia, es decir, la OMS, ha publicado diversas directrices sobre la calidad del aire. La OMS (2018) ha compilado diversos estudios sobre los efectos de la contaminación del aire en la salud, y sobre la base de pruebas científicas acumuladas ha emanado documentos normativos para los países que la integran en términos de Guías de Calidad del Aire, directrices que competen a Colombia.

Como resultado de los convenios internacionales suscritos por Colombia, varias normativas fueron decretadas en el ámbito jurídico nacional, para iniciar y concretar el compromiso de conservar la calidad del aire. En tal sentido, Mora y Jaramillo (2020) afirman que la República de Colombia, a través del Consejo Nacional de Política Económica y Social, aprobó el documento CONPES 3344 (2005), el cual señalando la Ley 99 de 1993, establece que, a las Corporaciones Autónomas Regionales les compete ejercer el control policivo de las fuentes de contaminación, exigir el cumplimiento de las regulaciones y efectuar el monitoreo de la calidad del aire. Este CONPES contiene los lineamientos que deberán ser tenidos en cuenta para la definición de las políticas y estrategias nacionales y locales de prevención y control de la contaminación del aire causada por fuentes fijas y móviles.

De igual forma, el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2010) publicó la Política de Prevención y Control de la Contaminación del Aire con el fin de impulsar la gestión de la calidad del aire en el corto, mediano y largo plazo y de alcanzar los niveles de calidad del aire adecuados para proteger la salud y el bienestar humano, en el marco del desarrollo sostenible.

Tal como lo mencionan Mora y Jaramillo (2020), la norma de calidad del aire en Colombia fue expedida por primera vez por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible mediante la Resolución 601 del 04 de abril de 2006, la cual fue modificada por la Resolución 610 de 2010, que establece los niveles máximos permisibles para contaminantes criterio que deben cumplirse en todo el territorio nacional, en condiciones de referencia.

Seguidamente, el 15 de Julio de 2013, se sanciona la Ley 1658, por medio de la cual se establecen las 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.

Explican Mora y Jaramillo (2020), que dada la necesidad de incorporar un ajuste progresivo de los niveles máximos permisibles de contaminantes, incluir nuevos contaminantes y definir elementos técnicos integrales para mejorar la gestión de la calidad del aire, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible publicó la Resolución 2254 del 01 de noviembre de 2017, derogando las resoluciones 601 de 2006 y 610 de 2010, para establecer la norma de calidad del aire o nivel de inmisión y adopta disposiciones para la gestión del recurso aire en el territorio nacional, con el objeto de garantizar un ambiente sano y minimizar el riesgo sobre la salud humana que pueda ser causado por la exposición a los contaminantes en la atmósfera. En la Norma de la calidad del aire en Colombia (2017) está plasmada la resolución 2254 del año 2017 en su artículo 4, que regula el nivel máximo permisible para los contaminantes tóxicos en el aire, para el caso de mercurio inorgánico (vapores) es de un microgramo/m³, con tiempo de exposición anual.

En los actuales momentos, está vigente la prohibición del uso de mercurio en la minería en Colombia, de acuerdo a lo establecido en la Ley 1658 de 2013, con la cual los entes gubernamentales asumieron el reto de hacer la transición a la eliminación de este elemento en la minería de oro en 5 años, es decir, entre 2013 y 2018. Durante este período el Ministerio de Minas y Energía de Colombia ha realizado esfuerzos, con el apoyo del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y de las autoridades ambientales regionales, han fortalecido al sector minero con transferencia tecnológica que incluye otras alternativas limpias sin mercurio.

La implementación de la Ley 1658 y el apoyo de las corporaciones autónomas regionales y de cooperación internacional han contribuido con el gobierno colombiano para impulsar la minería de oro sin mercurio, enfocándose en actividades soportadas en tecnologías limpias; la actividad no regulada y de carácter informal, sigue constituyendo una problemática a resolver por parte de los entes reguladores de Colombia. En este sentido, se evidencia el mandato de suprimir o reducir las emisiones de mercurio y la exposición al

mismo, en pro de encontrar alternativas que puedan controlar la contaminación del aire y sus efectos sobre la salud; por lo cual se considera este trabajo un aporte en este aspecto.

3.6 Alternativas para la Cuantificación de vapores de mercurio

De acuerdo con el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2010) la cuantificación del mercurio en el ambiente puede realizarse a través de un inventario de emisiones que permite determinar la calidad del aire puesto que reporta las emisiones contaminantes y las fuentes emisoras en un área geográfica específica y un periodo de tiempo determinado. Un estudio completo debe abarcar todas las fuentes presentes en la zona definida y debe suministrar la localización, magnitud, frecuencia, duración y contribución relativa de ellas. Es importante aclarar que los inventarios de emisiones no tienen en cuenta las reacciones de los contaminantes en la atmósfera. Otro medio para llevarlo a cabo es a través de un estudio micrometeorológico y/o meteorológico que facilita identificar la dispersión de contaminantes en la atmósfera en la zona de estudio y en la medida de lo posible, el comportamiento de la atmósfera superficial y superior. Con el fin de considerar la cuantificación del mercurio, es importante abordar tres aspectos esenciales que incluyen los principios, métodos y equipos empleados. De acuerdo con la empresa SXS (2020), se pueden considerar tres principios esenciales que sirven de soporte a los efectos de cuantificar el mercurio, los cuales se mencionan seguidamente:

- **Principio de Sensores de Película Dorada:** Este principio que rige el diseño de equipamientos se considera uno de los primeros utilizados para detectar y analizar de manera confiable el mercurio de alta gama, teniendo como ventajas que muestra escasas interferencias. La operación del indicador de vapor de mercurio se inicia al transferir la muestra de aire con mercurio a una delgada película de oro. Seguidamente, el mercurio contenido en el aire es depositado en el oro, causando una variación en la resistencia eléctrica de la lámina, que es directamente proporcional a la masa de vapor de mercurio. Cabe mencionar que, si el oro se satura en un tiempo específico, el instrumento posibilita que

dichos depósitos de mercurio se vaporicen, siendo recolectados por un depurador, es decir, ejerce una función de regeneración.

- **Principio de Espectroscopia de Absorción Atómica:** Comprende el uso de una llama para atomizar la disolución a fin de transformarlos en vapor de átomos. Es recomendado para el análisis del mercurio de bajo nivel, pero con diferentes interferencias difíciles de filtrar. Utiliza una fuente de luz de longitud de onda e intensidad que se irradian y, en caso de existir mercurio, los electrones de los átomos de mercurio absorben parte de esta energía de la fuente de luz. Para conocer la cantidad de átomos de mercurio presentes se toma como referencia la diferencia entre la energía inicial de la fuente de luz y la energía medida por el detector.

- **Principio de espectroscopia de fluorescencia atómica:** Se considera un método confiable para analizar el indicador de vapor de mercurio de mesa. Para ello, se produce una excitación en las moléculas a través de la absorción de radiación electromagnética. Cuando se elimina esa fuente y relajarse al estado basal, se libera un rayo o fotón de luz, que refleja el exceso de energía.

Si bien existen varios principios apoyados en tecnología que rigen el registro o cuantificación de los vapores de mercurio, no se puede decir que ninguno sea el mejor para todas las situaciones. Sin embargo, algunos pueden tener ventajas en su aplicación, que deben ser consideradas dependiendo del entorno en el cual son utilizados y que son analizados en los resultados de este trabajo de investigación.

Por su parte, López (2016) afirma que existen diversos métodos para el análisis de mercurio atmosférico, diferenciando el tipo de analito (mercurio metálico o iónico), centrado en el mercurio en fase de vapor, ya sean por métodos directos que permiten la determinación directa del contaminante ambiental; así como métodos indirectos que comprenden dos etapas una etapa de muestreo y una de análisis químico en el laboratorio. El desarrollo de medios de captación diferentes o técnicas de manejo permitan detectar concentraciones aún más bajas que los límites ya establecidos por los diferentes organismos de regulación como

peligrosos para la salud humana, evitando pérdida de muestra o contaminación cruzada, para tener métodos cada vez más confiables y precisos. Seguidamente, se mencionan los métodos para la cuantificación de vapores de mercurio:

- **Métodos directos:** López (2016) indica que, para el análisis en tiempo real de mercurio elemental en la atmósfera, existen diferentes analizadores de mercurio. Algunos se basan en el principio de espectrometría de absorción atómica diferencial Zeeman, mediante la modulación de alta frecuencia de la polarización de la luz; siendo su principal inconveniente la calibración, la cual no puede ser realizada por el usuario. También existen sensores basados en el principio de cambios de resistividad de películas delgadas de oro tras la absorción de mercurio, que muestran límites de detección. Otro tipo de método in situ son las basadas en técnicas de emisión atómica como el plasma de descarga de barrera dieléctrica (DBD). De acuerdo con Kocman et al. (2011) la desventaja de los métodos in situ son, en su mayoría, la calibración de los equipos, ya que no pueden ser realizados por los usuarios y la limpieza de los sensores que es bastante laboriosa e incluso en algunos casos se debe realizar cambio de sensores que llevan a sobrecostos

- **Métodos indirectos:** López (2016) explica que los métodos indirectos son los que constan de dos etapas, una de muestreo y otro de análisis químicos en el laboratorio, pero este último también se divide en dos métodos uno que necesita digestión y otros que no la requieren. Puanngam et al. (2010) indican en cuanto a los métodos que necesitan digestión de muestras, la técnica más utilizada hasta el momento para la cuantificación de mercurio total, en muestras ambientales es la espectroscopia de fluorescencia atómica por vapor frío.

Agrega Zhang (2011) que, con este tipo de técnica se alcanzan límites de detección excelentes del orden de nanogramo por litro y su principal aplicación ha sido en muestras ambientales de agua y sedimentos, aunque también se han encontrado resultados aceptables en muestras atmosféricas. Otras de las técnicas frecuentemente utilizadas para la cuantificación de mercurio y que necesita digestión o pretratamiento de muestra es la espectrometría de absorción atómica por vapor frío, la cual también consiste en reducir el

mercurio divalente a mercurio metálico, para luego con un gas inerte ser arrastrado, teniendo lugar la detección por absorción atómica.

Por su parte, Tsoi et al. (2010) expresan que el acoplamiento de plasma unido a un espectrofotómetro de masas (ICP-MS), es otra técnica muy utilizada para la cuantificación de mercurio orgánico (metil-mercurio, etilmercurio). Una de las ventajas de esta técnica es que permite la determinación simultánea de varios elementos químicos y posee una alta sensibilidad para determinar trazas de los elementos químicos y por esto, es ampliamente utilizada para cuantificación en matrices más complejas. Al respecto, Wang y Luo (2011) expresan que, si se necesita determinar concentraciones más elevadas de mercurio en las muestras, se utilizan técnicas analíticas como el plasma acoplado por inducción unido a un espectrofotómetro de emisión atómica, utilizadas para la cuantificación de mercurio en muestras de agua.

Considerando el contexto antes mencionado en torno a los principios y métodos de medición de vapores de mercurio, es pertinente analizar los principales equipos de cada tipo. En el mercado se encuentran equipos de diferentes marcas, tamaños y principios de medición de concentraciones de vapores de mercurio.

De acuerdo con la empresa Ametek Brookfield (2020), los equipos que usan sensores de película dorada fueron los primeros analizadores de vapor de mercurio confiables para mercurio de alta gama, mostrando bajo nivel de interferencias. Este indicador de vapor de mercurio opera de la siguiente manera: cuando una muestra de aire rica en mercurio pasa sobre una delgada película de oro, donde deposita en el oro y cambia la resistencia eléctrica de la lámina. Este cambio en la resistencia es directamente proporcional a la masa de vapor de mercurio tomada de un volumen de aire conocido. El Jerome® 431-X funciona bajo este principio y constituye un analizador de vapor de mercurio de película dorada durable, confiable y fácil de usar. Utiliza un sensor de película de oro patentado diseñado para detectar niveles bajos de vapor de mercurio. El Jerome® 431-X puede detectar mercurio en el aire de $0,003 \text{ mg/m}^3$ a 0.999 mg/m^3 en segundos y puede utilizarse en el campo o en el laboratorio.

Por otro lado, considerando los equipos apoyados en la espectroscopia de absorción atómica, éstos se caracterizan por una fuente de luz de longitud de onda e intensidad conocidas se irradia a través de una muestra de aire donde la luz finalmente encuentra un detector. La empresa Evisa (2010) afirma que, si hay mercurio, los electrones de los átomos de mercurio absorben parte de dicha energía de la fuente de luz. La diferencia entre la energía inicial de la fuente de luz y la energía medida por el detector le da una medición indirecta de cuántos átomos de mercurio estaban inicialmente presentes. Dentro de esta categoría se incluye al equipo LUMEX RA 915+, que es un instrumento analítico de alta sensibilidad para el monitoreo ambiental, especialmente para la detección en tiempo real de vapor de mercurio en el aire y otros medios. Posee un esquema patentado de la corrección Zeeman para la absorción no selectiva el cual proporciona una alta precisión de medición independientemente de los factores de interferencia, como el polvo, los aerosoles, los gases y vapores absorbentes.

Finalmente, los equipos apoyados en la espectroscopia de fluorescencia atómica, operan considerando que, cuando un átomo de mercurio absorbe la energía de la longitud de onda UV, un electrón pasa de un estado fundamental estable a un estado excitado inestable. Este evento de excitación describe la absorción atómica. Sin embargo, si se elimina esa fuente de energía, el electrón excitado vuelve a su estado fundamental y, al hacerlo, se emite un fotón de luz debido a una pérdida de energía potencial. Hay dos productos que según la empresa PS Analytical (2020) usan este principio, que son Millennium Merlin y Sir Galahad. El equipo Sir Galahad se usa típicamente para aplicaciones gaseosas como gas de pila, gas natural y aire, mientras que el equipo Millennium Merlin se usa para muestras líquidas y suaves. El Millennium Merlin tiene un límite de detección por debajo de las partes por trillón (ppt) y utiliza fluorescencia atómica como técnica de detección. El Millennium Merlin es lineal a 10 partes por millón (ppm).

Se debe destacar que, la empresa Thomson Environmental Systems (2020) ofrece un Equipo denominado TEKTRAN 2537X analizador de mercurio en el aire, que utiliza conjuntamente dos de los métodos descritos anteriormente un sensor de película dorada y un Cold Vapor Atomic Fluorescence Spectrophotometer (CVAFS) esta combinación proporciona una alta sensibilidad y fiabilidad de precisión. Del lado portátil, la empresa

Envea (2020) incluye el MERCURY TRACKER-3000 XS, que usa el principio de absorción atómica y tiene los tres campos de medida 0,1-100 / 0-1000 / 0-2000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

De lo antes expuesto, se aprecia que existen principios, métodos y equipos enfocados en la cuantificación de vapores de mercurio, y que han sido diversas sus aplicaciones, siendo pertinente el análisis detallado de los mismos como parte de este trabajo, a fin de generar información objetiva que sirva de soporte para lograr mayor control de las emisiones de vapor de mercurio, lo cual constituye un objetivo de este trabajo.

4. METODOLOGÍA

4.1 Tipo de Investigación

La investigación se clasifica como un estudio de tipo documental, pues la misma se dirige a analizar las alternativas para la cuantificación de los vapores de mercurio en el aire, emitidos por actividades de minería aurífera en un municipio del departamento de Antioquia-Colombia; apoyándose en documentos publicados sobre el tema en estudio. Al respecto, Hernández (2012) refiere que los estudios documentales se enfocan en el estudio de información contenida en documentos científicos, los cuales se consideran válidos a los efectos de interpretar hechos o eventos.

Por otra parte, el estudio se cataloga como descriptivo, en tanto se enfoca en explicar los aspectos relativos a las alternativas para la cuantificación de los vapores de mercurio en el aire, describiendo aspectos relativos al ciclo del mercurio, los efectos en la salud de la población, así como los principios, métodos y equipos de medición idóneos para el monitoreo y análisis de vapores de mercurio asociados a la minería aurífera. Sierra (2006) señala que los estudios descriptivos son aquellos enfocados en analizar el fenómeno del estudio, determinando sus características.

4.2 Diseño de la Investigación

En este estudio se aplica un diseño no experimental, por cuanto no se lleva a cabo manipulación ni control de variables. Hernández et al. (2012) indican que los estudios con diseños no experimentales son aquellos enfocados establecer la condición o situación, sin alterar su estado natural, ni ejercer el control experimental.

Además, se emplea un diseño bibliográfico, en tanto el análisis de la cuantificación de los vapores de mercurio en el aire, emitidos por actividades de minería aurífera se basa en la recopilación, reflexión e interpretación de documentos alusivos a la temática en estudio. De igual forma, Sabino (2002) indica que el beneficio es que el investigador puede mediante

una indagación bibliográfica analizar una amplia gama de fenómenos, en tanto no sólo tiene que basarse en los hechos a los cuales él tiene acceso de un modo directo, sino que puede extenderse para abarcar un conocimiento derivado de los textos y publicaciones.

4.3 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

Para la recolección documental, se utilizan fuentes de información. De acuerdo con Sabino (2006) las fuentes de información pueden ser primarias o secundarias dependiendo del origen de la información, en tanto si incluyen información original son primarias o si es reelaborada son secundarias, obtenida de documentos científicos. En función de recabar la información, se emplea el fichaje electrónico, el cual permite recabar la información pertinente a la investigación haciendo uso de carpetas electrónicas y fichas de contenido. Jurado (2009) afirma que el fichaje permite la recopilación y recolección de datos, facilita la selección, ordenamiento de la información, conserva los datos para futuras investigaciones y facilita el manejo de datos en el momento de necesitarlos.

4.4 Procedimiento de la Investigación

Para llevar a cabo el procedimiento documental, se establecen los pasos a seguir de forma ordenada, en torno al objetivo general, enfocado en analizar las alternativas para la cuantificación de los vapores de mercurio en el aire, emitidos por actividades de minería aurífera, respondiendo a cada uno de los objetivos específicos:

- Con el fin de identificar el ciclo del mercurio en el proceso de beneficio del oro y su impacto en la calidad del aire en la zona de estudio, se estudiaron cuidadosamente las investigaciones previas relacionadas con las mediciones del nivel de vapor de mercurio, tanto en la zona objeto de nuestro estudio, así como en otras zonas, para recopilar las experiencias anteriores en la zona de estudio.

- Para describir los efectos en la salud de la población, causados por la contaminación atmosférica por vapores de mercurio asociados a la minería aurífera, se recopiló información actualizada en la zona, considerando diversos períodos, a fin de contar con registros objetivos en términos epidemiológicos para conocer la incidencia sobre la salud.

- Para analizar los principios, métodos y equipos de medición idóneos para el monitoreo y análisis de vapores de mercurio asociados a la minería aurífera, se compilaron documentos relacionados con los equipos usados en la zona y su eficacia en medir los niveles de vapor de mercurio en ambientes de la zona objeto de estudio. Se analizaron los parámetros y variables tomadas en cuenta en esos casos anteriores, para estimar su impacto y para impulsar el proceso de selección de equipos y métodos, usando los resultados del estudio, para sacar conclusiones útiles que orientaron para tomar mejores decisiones en la selección de principios y equipos. De igual forma, se realizó una revisión bibliográfica exhaustiva principalmente con publicaciones en internet relacionada con los equipos disponibles en el mercado para medir el vapor de mercurio. Para plasmar los resultados se realizó una tabla comparativa con los datos técnicos, su rango de detección, sus capacidades y las ventajas y desventajas de cada equipo. Los criterios a considerar incluyen el rango de detección, el principio que lo sustenta, el método en el cual se apoya y las especificaciones de funcionamiento para cuantificar los vapores de mercurio.

4.5 Análisis de la Información

Dado que la presente investigación es de carácter documental, el análisis de la información se realiza de forma cualitativa, organizando los contenidos a los efectos de sustentar los resultados y conclusiones de la investigación. Sabino (2006) afirma que en los estudios documentales se pueden organizar las informaciones utilizando una sistematización de las mismas y proceder a extraer las coincidencias que conduzcan a emitir los resultados objetivos. El análisis documental es una operación intelectual que da lugar a un subproducto o documento secundario que actúa como intermediario o instrumento de búsqueda obligado entre el documento original y el usuario que solicita información. El calificativo de

intelectual se debe a que el documentalista debe realizar un proceso de interpretación y análisis de la información de los documentos y luego sintetizarlo.

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A los fines de explicar los resultados de la investigación, los mismos se organizan en función de los objetivos específicos propuestos, a manera de responder al propósito general del estudio centrado en analizar las alternativas para la cuantificación de los vapores de mercurio en el aire, emitidos por actividades de minería aurífera en un municipio del departamento de Antioquia-Colombia.

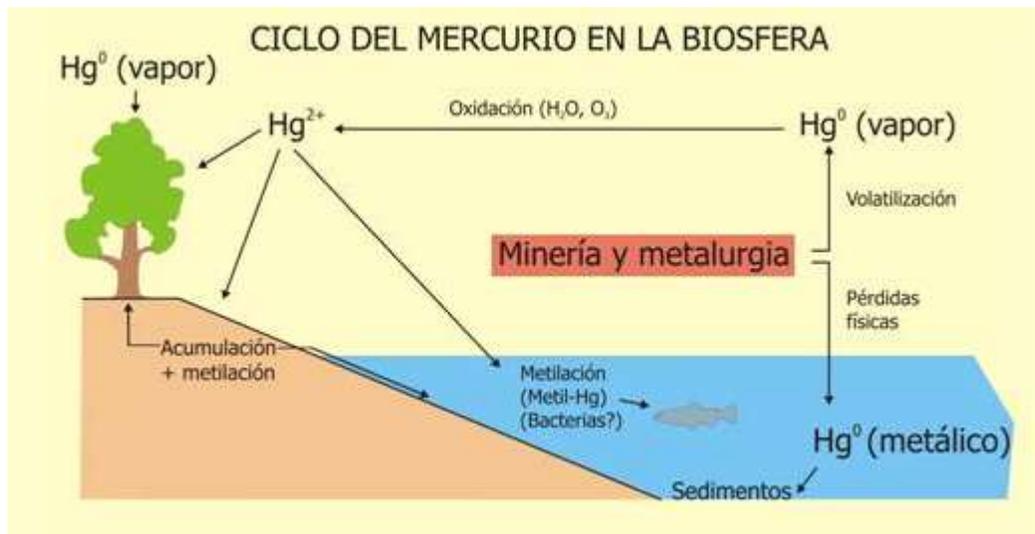
Como primer objetivo específico, *se procedió a identificar el ciclo del mercurio en el proceso de beneficio del oro y su impacto en la calidad del aire en la zona de estudio*; cabe mencionar que las mediciones con las cuales se cuentan para fines de este estudio datan de 2018, 2019, y algunos reportes de 2020, en tanto debido a la pandemia producida por el virus SARS CoV-2, se han mermado los esfuerzos investigativos en la zona correspondiente al municipio de Segovia ubicado en el departamento de Antioquia-Colombia.

Para entender la importancia de considerar el ciclo del mercurio, es necesario recordar que el mismo constituye un elemento químico de alta toxicidad, el cual tiene como característica que se bioacumula y biomagnífica, por lo cual implica un riesgo importante para la salud del hombre. En la práctica del oro, se emplea la amalgamación con mercurio, por lo cual, al ser utilizado de forma no controlada, sin medir el ciclo del mercurio y ser liberado en el ambiente, a consecuencia de su alta presión de vapor, puede crear efectos residuales contaminantes en los suelos, aire y agua y, por consiguiente, en la flora, fauna y la vida humana.

Ahora bien, la minería de oro tanto artesanal como a gran escala puede constituir una fuente de subsistencia, razón que ha conducido a considerar su explotación y control como prioritario, siendo así considerado el ciclo del mercurio. El mercurio en el aire, en su origen antropogénico, como es el caso de las emisiones provenientes de la minería del oro, es responsable de acuerdo con Herrera y Rojas (2013) de aproximadamente un tercio de las emisiones de Hg. La forma como se crea el ciclo del mercurio en la minería puede observarse en la siguiente gráfica:

Gráfica 1

Ciclo del Mercurio en la Minería



Fuente: Herrera, J. y Rojas, J. (2013).

Lo antes mencionado, es ratificado por Gaona (2004), quien afirma que, al considerar las fuentes contaminantes del mercurio, es necesario entender la forma en la cual ocurre el ciclo del mercurio, el cual supone un flujo continuo de mercurio entre atmósfera, tierra y agua. Este ciclo está basado en el comportamiento del Hg en los diferentes medios, en las reacciones químicas implicadas, así como en parámetros de transporte y su destino final. En cualquier punto del planeta, la cantidad de mercurio presenta un ciclo global natural, un ciclo global perturbado por la actividad humana, fuentes regionales de mercurio y fuentes locales de mercurio.

Con el fin de adjudicar valores cuantitativos a dicho ciclo, el mismo autor antes mencionado, indica que es necesario conocer las cantidades de mercurio presentes en las diferentes reservas terrestres. Se ha estimado que los océanos son, con diferencia, las mayores reservas de mercurio, con alrededor de 10^{17} g de mercurio principalmente en forma de HgS. Las aguas oceánicas contendrían alrededor de 10^{13} g, la misma cantidad que suelos y sedimentos conjuntamente; la biosfera, principalmente en forma de biota terrestre, contendría

10^{11} g; 10^8 g la atmósfera y 10^7 g las aguas terrestres. En este balance quedaría, sin embargo, excluido el mercurio presente en minas y otras reservas subterráneas.

Alineada con las disposiciones de la Convención de Minamata, Colombia limitó el uso de mercurio en las operaciones mineras a partir del 16 de julio de 2018. En este orden de ideas, haciendo mención a la evolución 2018-2020, específicamente en el Departamento de Antioquia, Sánchez et al. (2018) realizaron un estudio con diferentes muestras de sedimentos activos finos de corriente para obtener el ciclo del mercurio (Hg). Para ello emplearon la técnica de espectrografía de fluorescencia atómica (AFS), utilizando un límite de detección de $2 \mu\text{g kg}^{-1}$ y un grid de $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$. En este proceso de determinar el ciclo de mercurio, para el 2018 se registraron valores altos de Hg ($>182 \mu\text{g kg}^{-1}$) en las mineralizaciones filonianas de Segovia, ubicándose por encima de $860 \mu\text{g kg}^{-1}$.

Se evidencia en lo antes expuesto, que para 2018, los valores del ciclo de mercurio se encontraban por encima del límite permisible máximo de $150 \mu\text{g kg}^{-1}$, lo que evidencia la necesidad de realizar acciones para la protección del medio ambiente y de la vida humana. Respecto a los criterios de toxicidad del mercurio, la OMS (2007) refiere que el nivel de concentración máximo permisible de mercurio en el aire es de $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ anual, siendo el nivel de concentración máximo por día de $0,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Esta organización establece que la evaluación que estos valores límites de referencia de toxicidad no representan una clara línea entre seguro e inseguro. La razón es que han incorporado varios factores de seguridad/incertidumbre en su cálculo de Valores de Referencia de Toxicidad (VRTs) de mercurio lo que significa que una pequeña excedencia de uno de estos valores no inmediatamente causará efectos adversos.

Dada la situación antes mencionada, el Ministerio de Minas y Energía y el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD, 2019), instrumentaron a inicio de ese año, un proyecto enfocado en eliminar y evitar el uso del mercurio en el sector de minería de subsistencia y pequeña minería en las distintas regiones de Colombia, incluyendo Segovia en el Departamento de Antioquia, enfocándose en aspectos estratégicos tales como control de la producción aurífera, gerenciar el consumo de mercurio, promover la legalidad, el reconocimiento de los puntos calientes por emisiones de mercurio y reportes de intoxicación por mercurio.

Los resultados de esta actividad se evidenciaron al final del año 2019, tal como lo afirma la Embajada de los Estados Unidos en Colombia (2016) la Agencia de Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID) ejecutó un conjunto de mediciones de concentración de mercurio en el aire, incluyendo al municipio de Segovia, y luego de procesar la información se estableció que, en concordancia con las mediciones del ciclo de mercurio, que es importante apoyar el ámbito legal y formal de las unidades de producción minera artesanal, eliminar 55 toneladas de mercurio de los procesos de producción y reducir la contaminación por mercurio en el aire en un 30%. En otras palabras, se mantuvieron las normativas legales correspondientes, así como campañas de concientización, para avanzar en control del ciclo del mercurio.

Por su parte, Olimpo (2020) sostiene que a finales de noviembre de 2019, dentro de los entables intervenidos se encontró que la concentración del metal en el aire era de 3,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, en las compras fue de 16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en las calles frente a entables llegó a 0,543 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y en otras vías 0,379 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. A pesar de la disminución en las actividades de medición del ciclo del mercurio en el municipio de Segovia, Olimpo (2020) reporta que se evidenció una mejora en las mediciones, dado que utilizaron tecnologías limpias y equipos basados en la gravedad para realizar la separación del oro de otros minerales.

La relevancia de estas mediciones es respaldada por Gaona (2004) quien resalta la necesidad de aportar datos acerca de la presencia antropogénica de mercurio en el medio ambiente. Debido a la gran movilidad del mercurio dentro de su ciclo, esta cuantificación se hace especialmente difícil. Estudios recientes indican por ejemplo que de las aproximadamente 200.000 toneladas de mercurio emitidas a la atmósfera desde 1890, aproximadamente el 95% se encuentran en suelos terrestres, alrededor de un 3% en aguas oceánicas y un 2% en la atmósfera. También se estima que entre el 40 y el 75% del mercurio atmosférico actual tiene como origen fuentes antropogénicas.

Estos resultados sobre el ciclo del mercurio que apuntan a su disminución, se corresponden con las directrices emanadas del Fondo Global para el Medio Ambiente (GEF), donde se generó la iniciativa denominada Colombia Libre de Mercurio, implementada por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), en ejecución con el Ministerio

de Minas y Energía, y con la participación del Ministerio de Salud y Protección Social, y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Siguiendo con los propósitos del estudio, *se procedió a describir los efectos en la salud de la población, causados por la contaminación atmosférica por vapores de mercurio asociados a la minería aurífera*. Desde la época de la colonia, el municipio de Segovia ha ejercido la minería del oro como actividad económica principal, destacándose que dicha explotación artesanal contaminar el aire con vapores de mercurio, ha tenido un impacto desfavorable sobre la salud de la población.

Cabe mencionar que la contaminación del aire por efecto de los vapores de mercurio en el municipio de Segovia del departamento de Antioquia es consecuencia de las emisiones tanto pasadas como actuales, originadas por la actividad de la minería aurífera. A pesar de los esfuerzos del gobierno y de los entes responsables de la calidad del aire, los años en la explotación de esta actividad con pocos o ningunos controles, ha ocasionado perjuicios a la salud de sus habitantes.

Pese a ello, los esfuerzos actuales por mejorar las condiciones del aire, a fin de preservar la salud de los pobladores de la zona, han generado cambios en los aspectos relacionados con la epidemiología relacionada con los vapores de mercurio. A los efectos del presente trabajo, se realiza un repaso cronológico desde 2017 hasta la actualidad, sobre los datos aportados por algunos estudios epidemiológicos de reciente data, que permiten no solo determinar los efectos en la salud de la población, sino también apreciar la evolución que tales afecciones han tenido en el proceso de controlar la calidad del aire.

La Secretaría de Salud y Protección Social de Antioquia (2017) plantea que en este año se realizaron convenios con el municipio Segovia para promover acciones efectivas a los fines de preservar la salud de la población y además se realizaron diagnósticos epidemiológicos vinculados con los efectos de la intoxicación por mercurio. En referencia al número de personas evaluadas para determinar intoxicación por mercurio, se obtuvo que, de la muestra total de 103 personas, el 100% presentó niveles de riesgo de marcadores de mercurio en orina ocasional por encima de los límites permitidos para el ser humano, y que pueden evidenciar alteraciones en su salud. Cabe mencionar que el 48% mostró riesgo de

contaminación (≥ 1 y ≤ 7 ug de Hg) y el 55% se calificó como contaminados (≥ 7 y ≤ 25 ug de Hg).

En el año 2018, González (2018) refiere datos para ese año en su informe realizado por el Ministerio de Salud de Colombia sobre los estudios realizados en relación con la exposición a mercurio en Segovia. Este estudio se enfocó en establecer la prevalencia de determinadas alteraciones de la salud, destacando las referidas al área neuropsicológica, lenguaje, memoria, funciones ejecutivas y atención de grupos de estudiantes en edad escolar primaria y de secundaria.

En este sentido, el mismo autor antes mencionado, indica que encontraron en una muestra de 196 estudiantes, que el 79,6% presentaba alteraciones en comprensión del lenguaje, el 77,6% en funciones ejecutivas, el 52,6% en atención visual, el 43,9% en fluidez verbal, el 38,8% en memoria verbal a corto plazo y el 31,1% a largo plazo. Tales porcentajes generaron alarma, determinando la urgencia de edificar planes de intervención para minimizar los efectos y ejecutar un control efectivo de los efectos epidemiológicos de la contaminación por mercurio.

Confirmando lo mencionado, la OMS (2007), indica que el mercurio elemental e inorgánico genera efectos sobre el sistema nervioso que es el órgano más vulnerable a la exposición al mercurio. Se han descrito diversos trastornos neurológicos y conductuales, como temblores, irritabilidad o reactividad a la estimulación, inestabilidad emocional, insomnio, pérdida de memoria, alteraciones neuromusculares, cefaleas, polineuropatía y déficits en las pruebas de las funciones cognitivas y motoras. Los efectos son similares con distintos tiempos de exposición, pero pueden volverse graves e irreversibles al aumentar la duración y la concentración.

Del mismo modo, González (2018) en el estudio antes mencionado en el municipio de Segovia, encontró que en una muestra de 860 personas, mayores de 15 años, mineros o no, el 15,2% de las personas evaluadas tenían concentraciones de mercurio en cabello ≥ 5 ug/g, determinando que la prevalencia de síntomas subjetivos es alta en esta población 9,5-44,5 y neuropsiquiátricos: 10,3-63,5. También se determinó que es menor en el grupo de personas con niveles de mercurio ≥ 5 ug/g sin embargo, no existieron diferencias estadísticamente significativas, lo que apuntó a que se ha generado tolerancia en esta

población, pero ello puede conllevar a problemas neurológicos. Se destacó que esta región, como producto de la minería artesanal de oro, tiene concentraciones ambientales de vapor de mercurio que superan los valores límites permisibles.

Estos resultados corroboran los planteamientos de Casas et al. (2015) quienes expresan que el mercurio y sus compuestos son tóxicos para los humanos, especialmente para el sistema nervioso. La exposición durante el embarazo puede alterar el desarrollo del cerebro, el sistema circulatorio y el corazón del feto. Además, existe evidencia sobre la asociación entre la exposición a los compuestos de mercurio y el cáncer. También los daños neurológicos son comunes entre los mineros que incluyen la ceguera, pérdida de memoria y problemas del habla.

También, González (2018) estableció que, para este año, las concentraciones en el aire urbano del municipio de Segovia, así como de otras localidades del Departamento de Antioquia oscilaban entre 300 (background) y 1 millón ng/m^3 (dentro de las tiendas de oro), mientras que en áreas residenciales la concentración más común es 10.000 ng/m^3 , cuando el límite ocupacional permitido corresponde a 1000 ng/m^3 .

Para este año, la Secretaría Seccional de Salud y Protección Social de Antioquia (2018) en su informe sobre contaminación por mercurio, refleja que, en la zona de Segovia, la totalidad de los habitantes están expuestos a cierto nivel de mercurio, aunque se debe reconocer que para este año 2018 se encontraban en niveles más bajos debidos a una exposición crónica, aun cuando también se registraron contaminación por exposición aguda. En cualquiera de los casos, se estableció que el uso de mercurio en la minería aurífera tiene consecuencias para la salud. Explicó que el mercurio en el ambiente sufre transformaciones de mercurio elemental a un compuesto más toxico, lo cual es nocivo para el sistema nervioso, además se bioacumula y se biomagnifica a través de la cadena trófica, causando efectos sobre el sistema digestivo y los órganos renales.

Los datos antes mencionados confirman los planteamientos de OsphaNet (2020), la cual explica que la exposición al mercurio inorgánico provoca, por lo general, el desarrollo de un sabor metálico, dolor orofaríngeo localizado, náuseas, vómitos, diarrea sanguinolenta, dolor, cólico abdominal, disfunción renal y anomalías neurológicas; mientras que el mercurio orgánico puede derivar en neurotoxicidad retardada.

Especialmente en cuanto al vapor de mercurio, la Secretaría Seccional de Salud y Protección Social de Antioquia (2018) indicó que, en esta zona se detectan efectos sobre el sistema nervioso e inmunitario de la población, mostrando enfermedades en el aparato digestivo, pulmones y riñones, incluso con consecuencias en ocasiones fatales. Tras la inhalación de mercurio se evidencian trastornos neurológicos y del comportamiento. Además de ello, se realizaron registros epidemiológicos de síntomas como temblores, insomnio, pérdida de memoria, efectos neuromusculares, cefalea o disfunciones cognitivas y motoras. En trabajadores expuestos durante varios años a niveles atmosféricos de al menos $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de mercurio elemental, se pueden observar signos subclínicos leves de toxicidad para el sistema nervioso central.

Uno de los eventos más preocupantes para la salud de la población de Segovia, es que el daño neurológico, afecta inclusive a la población infantil en proceso de desarrollo generando pérdidas en las funciones sensoriales, problemas psicomotores, problemas de hiperactividad y atención, así como afectar su desarrollo cognitivo en general.

En referencia a la situación evidenciada en el año 2019, a pesar de los esfuerzos en controlar la situación, aún se evidenciaron las secuelas y consecuencias de la anterior práctica no controlada, así como los vapores de mercurio originados por las prácticas que no han sido posible controlar en la totalidad de la región. Esto lo afirma Palma et al. (2019) quien sostiene que la prologada explotación de la minería de oro en las décadas pasadas y la actual realizada aún muestra niveles de mercurio por encima del límite permisible, es decir, por encima de los límites que tiene establecidos la OMS para la exposición pública que es de $1,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, detectando efectos negativos sobre la salud tales como el insomnio, temblor y nerviosismo. Por tanto, se consideró como un importante factor de riesgo para los trabajadores y comunidades que se asientan cerca de los sitios de extracción y procesamiento del oro.

Los datos antes mencionados son confirmados por la OMS (2007), la cual indica que el mercurio elemental e inorgánico genera efectos sobre el sistema nervioso que es el órgano más vulnerable a la exposición al mercurio. Se han descrito diversos trastornos neurológicos y conductuales, como temblores, irritabilidad o reactividad a la estimulación, inestabilidad emocional, insomnio, pérdida de memoria, alteraciones neuromusculares, cefaleas, polineuropatía y déficits en las pruebas de las funciones cognitivas y motoras. Los efectos

son similares con distintos tiempos de exposición, pero pueden volverse graves e irreversibles al aumentar la duración y la concentración.

Hasta el momento del estudio, no se han encontrado datos bibliográficos del comportamiento de la epidemiología producida por los vapores de mercurio en el tercer trimestre del año 2020, lo cual se relaciona con la pandemia producida por el virus SARS CoV-2, la cual ha dificultado las acciones sanitarias que en este sentido se venían desarrollando, dado que la concentración de esfuerzos en el control de la pandemia ha captado la atención de las instituciones de salud en Colombia.

Para finalizar con los objetivos planteados se procedió a *analizar los principios, métodos y equipos de medición idóneos para el monitoreo y análisis de vapores de mercurio asociados a la minería aurífera*. Para tales fines, se realiza un análisis comparativo de los principios, métodos y equipos con la finalidad de visualizar la aplicabilidad y precisión de cada uno.

Tabla 1

Comparación de los Principios de Medición de Vapores de Mercurio

	Principio de sensores de película dorada	Principio de espectroscopia de absorción atómica (AAS)	Principio de espectroscopia de fluorescencia atómica (AFS)
Proceso	Transferencia	Absorción	Fluorescencia
Límite de Detección	100 pg	0,1-1 ng g ⁻¹	0,001-0,1 ng g ⁻¹
Ubicación de la Fuente	Externa	Externa	Externa
Fuente de Energía	Resistencia eléctrica	Fuente de atomización	Llama 1700-3200°C
Medición	Realiza análisis rápidos y precisos de los niveles de vapor de mercurio.	Mide la energía radiante atenuada de la fuente	Cuantifica la energía radiante de fluorescencia
Facilidad de Operación	Si	Si	Si
Costos de Operación	Bajo	Bajo	Bajo
Sensibilidad	Se satura y necesita regenerarse entre lecturas.	Moderada	Alta

	Principio de sensores de película dorada	Principio de espectroscopia de absorción atómica (AAS)	Principio de espectroscopia de fluorescencia atómica (AFS)
Utilidad	Calidad del aire, monitoreo de olores molestos o peligrosos, cumplimiento de normas, control de calidad, pruebas de eficacia de limpiadores, detección de fuentes de vapor de mercurio y detección de pérdidas, entre otros.	Análisis de mercurio de bajo nivel, pero tiene muchos tipos diferentes de interferencias que no se pueden filtrar.	Absorbe radiación electromagnética a longitudes de onda
Tiempo/Efectividad	Confiables para la detección de mercurio de alta gama con pocas interferencias que se pueden filtrar.	Consume tiempo y es complicado por la posibilidad de pérdidas por volatilización o digestión incompleta, así como la contaminación de las muestras	Para que pueda producirse el proceso de emisión fluorescente, previamente debe haber un proceso de absorción que implique dos o más transiciones electrónicas. El proceso emisor fluorescente puede producirse de diversas formas.

Fuente: Elaboración Propia (2020), basada en las especificaciones técnicas.

Al respecto a la Tabla 1, se evidencia que, al comparar los diversos principios desarrollados, todos cumplen de acuerdo con el equipamiento una función esencial, dependiendo del tiempo y efectividad de los mismos. En este sentido, es esencial contar con diversas alternativas que faciliten dependiendo de las condiciones operativas disponer de medios sensibles y precisos para el análisis de tales vapores, y que son seleccionados dependiendo de su simplicidad y sensibilidad.

Como lo evidencia la empresa SXS (2020), se pueden considerar tres principios esenciales que sirven de soporte a los efectos de cuantificar el mercurio, siendo uno de ellos el correspondiente a los sensores de película dorada calificados como pioneros en el proceso de detectar y analizar de manera confiable mercurio de alta gama, con escasas interferencias

que se pueden filtrar, la espectroscopia de absorción atómica donde se emplea una llama para atomizar la disolución a fin de transformarlos en vapor de átomos, pero tiene diferentes interferencias difíciles de filtrar y el principio de espectroscopia de fluorescencia atómica, considerado como el altamente confiable al excitar las moléculas a través de la absorción de radiación electromagnética.

Cabe mencionar que, en la revisión de la documentación, se pudo apreciar que el principio más utilizado en cuanto a los vapores de mercurio corresponde la espectrometría de absorción atómica, por considerarse un método muy sensible, destacándose que la fracción de vapor de mercurio es uno de los criterios a considerar para asumir un principio determinado, aun cuando no deja de presentar algunas limitaciones, tal como se aprecia en la tabla antes expuesta.

Apoyando lo mencionado, autores como Herrera y Rojas (2013) afirman que este principio de espectrometría de absorción atómica es considerado muy efectivo en torno a los vapores de mercurio, por cuanto elimina las interferencias de la matriz, muestra alta sensibilidad debido al 100% de eficacia de muestreo y aporta una ajustada precisión. Esto es confirmado por los estudios de Martínez y Moctezuma (2006) y de Arrazola (2011) quienes indican que ambos principios los de absorción y de fluorescencia son importantes, pero que este último requiere mayor investigación, dado que la espectrometría de absorción atómica cuenta con un importante esfuerzo de investigación. Explican que a pesar de que la espectrometría de fluorescencia atómica (AFS) es un método efectivo, hasta los momentos no ha tenido un uso generalizado por el éxito de la emisión atómica, y especialmente los métodos de absorción atómica, que se desarrollaron antes de la fluorescencia atómica y que han generado múltiples equipos de alta sensibilidad.

Lo antes mencionado es confirmado por Cortés (2017), quien afirma que la espectrometría de absorción atómica, especialmente con el uso de vapor frío (CV-AAS), es calificada como el principio más utilizado para la determinación de mercurio en cualquier tipo de muestra ambiental, especialmente en el aire, dada la presión de vapor muy alta a temperaturas relativamente bajas que presenta el vapor de mercurio.

Respecto a los métodos, Ruiz (2016) afirma que un aspecto relevante lo constituye seleccionar el método que mejor se ajusta a las necesidades de medida del vapor de mercurio. Expresa que la cuantificación de dicho vapor se relaciona con el requerimiento de calidad y confiabilidad que se exige en los resultados. En este sentido, la escogencia de cada método directo e indirecto dependerá de los niveles de mercurio y de las condiciones de evaluación.

Confirmando lo mencionado, López (2016) indica respecto a los métodos directos para el análisis en tiempo real de mercurio elemental en la atmosfera, que existen diferentes analizadores de mercurio, pero que su principal inconveniente es la calibración, la cual no puede ser realizada por el usuario, siendo ello corroborado por Kocman et al. (2011), quienes indican que la desventaja es la necesidad de llevar a cabo la calibración in situ, así como la limpieza de los sensores que es bastante laboriosa e incluso en algunos casos se debe realizar cambio de sensores que llevan a sobrecostos.

En referencia a los métodos indirectos, indica López (2016) que son los más utilizados para la cuantificación de mercurio total, en muestras ambientales, destacándose la espectroscopia de fluorescencia atómica por vapor frío (CV-AAS). Murillo et al (2013) sostienen que este método facilita determinar los niveles de vapor de mercurio sin necesidad de emplear la llama u otro sistema de atomización, con una sensibilidad superior a la obtenida por otros métodos. Silva (2016) también respalda lo mencionado indicando que los métodos indirectos, tal como es el caso del CV-AAS, es recomendable en cuanto al vapor de mercurio en el aire, pues la selectividad se logra con trampas selectivas o bien por medios espectroscópicos, mientras el aire ambiente se usa como gas portador.

Corroborando lo mencionado, Zhang (2011) que, con este tipo de técnica se alcanzan límites de detección excelentes del orden de nanogramo por litro y su principal aplicación ha sido en muestras ambientales de agua y sedimentos, aunque también se han encontrado resultados aceptables en muestras atmosféricas. Otras de las técnicas frecuentemente utilizadas para la cuantificación de mercurio y que necesita digestión o pretratamiento de muestra es la espectrometría de absorción atómica por vapor frío, la cual también consiste en

reducir el mercurio divalente a mercurio metálico, para luego con un gas inerte ser arrastrado, teniendo lugar la detección por absorción atómica.

En este orden de ideas, se observa en la Tabla 2 una comparación entre los diversos equipos disponibles para la medición del vapor de mercurio, evidenciándose sus semejanzas y diferencias en cuanto al principio que le sustenta, los límites de detección, sensibilidad/precisión, tiempo de respuesta, tasa de flujo y peso como variable relevante para su selección.

Tabla 2
Comparativo de las Especificaciones Técnicas de los Equipos

	El Jerome® 431-X	LUMEX RA 915+	Millennium Merlin	Sir Galahad II	TEKRAN 2537X	MERCURY TRACKER-3000 XS
Principio	Sensores de Película Dorada	Espectroscopia de absorción atómica	Espectroscopia de fluorescencia atómica	Espectroscopia de fluorescencia atómica	Sensores de Película Dorada y espectroscopia de fluorescencia atómica	Espectroscopia de absorción atómica (Vapor frío)
Límites de detección	0,003 mg/m ³ a 0,999 mg/m ³	0,5 – 50.000 ng	Inferiores a ppt con una linealidad de 107x.	0,1 picogramos (pg) y más de siete órdenes de magnitud.	< 0,1 ng/m ³ (5 muestras/min)	0,1-100 µg/m ³ . 0-1000 µg/m ³ . 0-2000 µg/m ³ .
Sensibilidad / Precisión	0,003 mg/m ³ Hg. Precisión de 5% con desviación estándar de 0,100 mg/m ³ Hg	0,5 ng/m ³ , muestreo 10 l/min, técnica de análisis directo. Aceptado como el analizador de vapor de mercurio más preciso y sensible.	0,1 ppt con linealidad hasta 10 ppm para muestras reales. Permite la detección confiable de mercurio incluso en los casos más	0,1 pg absoluto. Precisión para todas las especies de mercurio	Menor a 0,1 ng/m ³ . Caudalímetro másico de precisión	0,1 µg/m ³ (0,01 ppb). Genera líneas de emisión de un ancho de banda extremadamente estrecho que son congruentes con las líneas de absorción de los átomos de Hg a

	El Jerome® 431-X	LUMEX RA 915+	Millennium Merlin	Sir Galahad II	TEKRAN 2537X	MERCURY TRACKER-3000 XS
			complejos y no es necesario clasificar muestras antes del análisis			medir. De este modo se minimizan la Sensibilidad cruzada.
Tiempo de Respuesta	3 – 12 segundos	Mediciones en tiempo real en aire y gases	Análisis de más de 80 muestras por hora	Ciclo de respuesta entre 5-6/min	2,0 - 60 min (2 - 15 min)	1 segundo medición en tiempo real
Tasa de Flujo	750 ± 50ml/min (0,75 ± 0,05 liters/min)	7–10 l/min.	Hasta 10 ml / min.	5 l/min	0,7-1,5 l/m	1,5 l/ min
Peso	XE model 3,18-3,5 kg	7 kg	20 kg.	20 kg	25 kg	2,5 kg

Fuente: Elaboración Propia (2020), basada en las especificaciones técnicas.

Luego de evidenciadas sus propiedades, se muestra que las propiedades antes sintetizadas benefician al equipo identificado como MERCURY TRACKER-3000 XS, basado en el principio de espectroscopia de absorción atómica (vapor frío), en tanto proporciona a diferencia de los restantes tres límites de detección, que se ubican en 0,1-100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0-1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 0-2000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Aunado a ello, muestra un ajustado parámetro de sensibilidad y precisión correspondiente a 0,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0,01 ppb), destacándose que genera líneas de emisión de un ancho de banda extremadamente estrecho que son congruentes con las líneas de absorción de los átomos de Hg a medir. De este modo, se minimizan las sensibilidades cruzadas.

Asimismo, se muestra que su tiempo de respuesta es significativamente menor comparado con otros equipos, en tanto corresponde a 1 segundo medición en tiempo real, su tasa de flujo es adecuada al ubicarse en 1,5 l/min y su peso considerado a los fines del traslado es 2,5 kg, siendo excesivamente ligero para su traslado de campo en las labores de detección de los vapores de mercurio.

Estos resultados son apoyados por las especificaciones técnicas de la empresa Envea (2020) la cual refiere que el MERCURY TRACKER-3000 XS, utiliza el principio de absorción atómica y tiene los siguientes campos de medida bastante precisos. Explica que utiliza como fuente de UV una lámpara de baja presión de mercurio sin electrodos de alta frecuencia que traza líneas de emisión que suprime las interferencias cruzadas con el sulfuro de hidrógeno y el vapor de agua y, por ende, es excesivamente preciso. Aunado a ello, se calibra fácilmente y su fondo de ruido es muy bajo ($0,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Confirmando lo mencionado, Kiefer et al (2019) agregan que este equipo facilita la medida del vapor de mercurio en tiempo real, siendo fácil de manejar y resistente a daños del equipo por golpes y a la corrosión, manteniendo una alta resolución de los datos registrados. Agregan que el Mercury Tracker-3000 XS es un equipo bastante liviano, diseñado de manera compacta que permite analizar y medir con precisión el mercurio y otros gases en el aire.

Los resultados antes mencionados, destacan la importancia del análisis de las alternativas para la cuantificación de los vapores de mercurio en el aire, emitidos por actividades de minería aurífera en un municipio del departamento de Antioquia-Colombia, a los fines de seleccionar los medios idóneos para lograr una medición con mayor precisión y ajustada a las características ambientales de la zona objeto de estudio.

6. CONCLUSIONES

Tomando como referencia los resultados obtenidos, se procede a presentar las conclusiones del presente trabajo considerando cada uno de los objetivos formulados para analizar las alternativas para la cuantificación de los vapores de mercurio en el aire, emitidos por actividades de minería aurífera en un municipio del departamento de Antioquia-Colombia.

a) Se identificó el ciclo del mercurio en el proceso de beneficio del oro y su impacto en la calidad del aire en la zona de estudio, realizando una revisión de las mediciones de 2018, 2019, y algunos reportes de 2020. Para 2018, los valores del ciclo de mercurio se encontraban por encima del límite permisible máximo de $150 \mu\text{g kg}^{-1}$, lo que evidencia la necesidad de realizar acciones para la protección del medio ambiente y de la vida humana en el planeta.

Al final del año 2019, se evidencia una disminución del mismo, a pesar de que sigue considerándose un riesgo para la salud; pese a no obtener los mejores resultados se mantuvieron las normativas legales correspondientes, así como campañas de concientización, para avanzar en control del ciclo del mercurio. Se encontró que la concentración del metal en el aire era de $3,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, en los sitios de comercialización fue de $16 \mu\text{g}/\text{m}^3$, en las calles frente a entables llegó a $0,543 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y en otras vías $0,379 \mu\text{g}/\text{m}^3$; observándose una mejora en las mediciones del ciclo de mercurio en el municipio de Segovia.

Estos resultados sobre el ciclo del mercurio que apuntan a su disminución, se corresponden con las directrices emanadas del Fondo Global para el Medio Ambiente, donde se generó la iniciativa denominada Colombia Libre de Mercurio, implementada por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), en ejecución con el Ministerio de Minas y Energía, y con la participación del Ministerio de Salud y Protección Social, y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

b) Se describieron los efectos en la salud de la población, causados por la contaminación atmosférica por vapores de mercurio asociados a la minería aurífera, indicándose que a pesar de los esfuerzos del gobierno y de los entes responsables de la calidad del aire, los años en la explotación de esta actividad con pocos o ningunos controles, ha

ocasionado perjuicios a la salud de sus habitantes. Se realizó un repaso cronológico desde 2017 hasta la actualidad, sobre los datos aportados por algunos estudios epidemiológicos de reciente data, que permiten no solo determinar los efectos en la salud de la población, sino también apreciar la evolución que tales afecciones han tenido en el proceso de controlar la calidad del aire.

Para el año 2017, se obtuvo que el 100% presentó niveles de riesgo de marcadores de mercurio en orina ocasional por encima de los límites permitidos para el ser humano, y que pueden evidenciar alteraciones en su salud, determinando la urgencia de edificar planes de intervención para minimizar los efectos y ejecutar un control efectivo de los efectos epidemiológicos de la contaminación por mercurio. En 2018 en el municipio de Segovia, se detectan efectos sobre el sistemas nervioso e inmunitario de la población, mostrando enfermedades en el aparato digestivo, pulmones y riñones, incluso con consecuencias en ocasiones fatales. Tras la inhalación de mercurio se evidencian trastornos neurológicos y del comportamiento; siendo preocupantes porque el daño neurológico, afecta inclusive a la población infantil en proceso de desarrollo generando pérdidas en las funciones sensoriales, problemas psicomotores, problemas de hiperactividad y atención, así como afectar su desarrollo cognitivo en general.

Aplicado al año 2019, a pesar de los esfuerzos en controlar la situación, aún se evidencian las secuelas y consecuencias de la anterior práctica no controlada, así como los vapores de mercurio originados por las prácticas que no han sido posible controlar en la totalidad de la región. Hasta el momento del estudio, no se han encontrado datos bibliográficos del comportamiento de la epidemiología producida por los vapores de mercurio, lo cual se relaciona con la Pandemia producida por el virus SARS CoV-2, la cual ha dificultado las acciones sanitarias que en este sentido se venían desarrollando, dado que la concentración de esfuerzos en el control de la misma ha captado la atención de las instituciones de salud en Colombia.

c) Se analizaron los principios, métodos y equipos de medición idóneos para el monitoreo y análisis de vapores de mercurio asociados a la minería aurífera. Cabe mencionar que, en la revisión de la documentación, se pudo apreciar que el principio más utilizado en cuanto a los vapores de mercurio corresponde la espectrometría de absorción atómica, por

considerarse un método muy sensible, sin embargo, se considera la fracción de vapor de mercurio como uno de los criterios a considerar para cambiar el principio que corresponde al equipo. Una de las características que lo hacen especialmente sensible es el uso de la técnica de vapor frío, en donde se evidencia la no aparición de interferencias espectrales dada la absorción en fase gaseosa.

Respecto a los métodos, los métodos indirectos, son los más utilizados para la cuantificación de mercurio total, en muestras ambientales, destacándose la espectroscopia de fluorescencia atómica por vapor frío (CV-AAS), observándose que en relación a los equipos, la documentación beneficia al MERCURY TRACKER-3000 XS, basado en el principio de espectroscopia de absorción atómica (vapor frío), en tanto proporciona a diferencia de los restantes tres límites de detección, que se ubican en 0,1-100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0-1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 0-2000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Aunado a ello, muestra un ajustado parámetro de sensibilidad y precisión correspondiente a 0,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0,01 ppb), destacándose que genera líneas de emisión de un ancho de banda extremadamente estrecho que son congruentes con las líneas de absorción de los átomos de Hg a medir. De este modo se minimizan las sensibilidades cruzadas.

Del mismo modo, se muestra que su tiempo de respuesta es significativamente menor comparado con otros equipos, en tanto corresponde a 1 segundo de medición en tiempo real, su tasa de flujo es adecuada al ubicarse en 1,5 l/min y su peso considerado a los fines del traslado es 2,5 kg.

Se concluyó la importancia del análisis de las alternativas para la cuantificación de los vapores de mercurio en el aire, emitidos por actividades de minería aurífera en un municipio del departamento de Antioquia-Colombia, a los fines de seleccionar los medios idóneos para lograr una medición con mayor precisión y ajustada a las características ambientales de la zona objeto de estudio; recomendándose un monitoreo permanente de la zona a los fines tanto de proveer las asesorías técnicas necesarias, como el control de la salud poblacional.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Abreu, A., Upegui, Y., Valencia, C. y Upegui, E. (2020). Project: A new variant of endemic pemphigus foliaceus in El Bagre, Colombia, South America. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/343319991_A_new_variant_of_endemic_pemphigus_foliaceus_in_Colombia_South_America. Consulta: 24/06/2020

Agencia Europea del Medio Ambiente (2019), El mercurio, una amenaza persistente para el medio ambiente y la salud. Editado por la Agencia Europea del Ambiente. Recuperado de: <https://www.eea.europa.eu/es/articles/el-mercurio-una-amenaza-persistente>. Consulta 22/06/2020

Ametek Brookfield (2020) Jerome® 431-X. Recuperado de: <https://www.azic.com/jerome/jerome-431/> Consulta 20/07/2020

Betancur, M. (2019). Minería Del Oro, Territorio y Conflicto en Colombia. Retos y recomendaciones para la protección de los derechos humanos y del medio ambiente. Publicación realizada con el apoyo financiero del Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo de Alemania (BMZ) y el Ministerio Federal de Medio Ambiente, Conservación de la Naturaleza y Seguridad Nuclear de Alemania (BMU) / Umweltbundesamt (UBA).

Cano, S. (2012). Biomédica, Vol. 32 Núm. 3 (I. N. Salud-Colombia, Editor. Recuperado de: <https://doi.org/10.7705/biomedica.v32i3.1437>. Consulta: 07/06/2020

Casas, I., Gómez, E., Rodríguez, L., Girón, S., y Mateus, J. (2015). Biomédica. vol. 35, núm. 2. (I. N. Salud-Colombia., Editor, & (ISSN: 0120-4157 de 2015). Consejo Nacional de Política Económica y Social (2005). Documento CONPES 3344 de 2005. República de Colombia. Departamento Nacional de Planeación. Colombia.

Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes del PNUMA (2001). Enmienda 2009. Recuperado de: https://www.wipo.int/edocs/lexdocs/treaties/es/unep-pop/trt_unep_pop_2.pdf Consulta: 04/09/2020

Convenio de Ginebra sobre contaminación atmosférica transfronteriza a gran distancia (1979). Recuperado de: <https://www.dipublico.org/11282/convencion-sobre-la-contaminacion-atmosferica-transfronteriza-a-larga-distancia-ginebra-13-de-noviembre-de-1979> Consulta: 04/09/2020

Convenio de Minamata sobre el Mercurio (2013). Recuperado de: <http://www.mercuryconvention.org/Convenio/Texto/tabid/5690/language/es-CO/Default.aspx> Consulta: 04/09/2020

Cordy, P., Veiga M., Salih I., Al-Saadi S., Console S., García, O., Mesa, L., Velásquez-López, P. y Roeser, M. (2011). Mercury contamination from artisanal gold mining in Antioquia, Colombia: The world's highest per capita mercury pollution. Sci. Total Environ. 410-411, 154-160.

Cordy, P., Veiga, M., Crawford, B., García, O., Gonzalez, V., Moraga, D., Roeser, M., Wip, D., (2013). Characterization, mapping and mitigation of mercury vapour emissions from artisanal mining gold shops. *Environ. Res.* 125, 82–91.

Cortés, C. (2017). Determinación de mercurio orgánico e inorgánico en muestras ambientales. Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de Magister en Ciencias Químicas. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias, Departamento de Química. Bogotá, Colombia 2017.

Díaz, F. (2014). Mercurio en la minería del oro: impacto en las fuentes hídricas destinadas para consumo humano. *Revista de salud pública (Bogotá, Colombia)* 16(6):947-957 · December

Dirección de Minería Empresarial (2019) Análisis del Comportamiento Del PIB Minero Primer Trimestre de 2019. Análisis Minero Dirección de Minería Empresarial. Bogotá D.C.

Embajada de los Estados Unidos en Colombia (2016). Estados Unidos aliado de la minería viable y responsable con el medio ambiente en Colombia. Recuperado de: <https://co.usembassy.gov/es/estados-unidos-aliado-de-la-mineria-viable-y-responsable-con-el-medio-ambiente-en-colombia/> Consulta: 11/27/2020 Envea. (2020). Mercury Tracker-3000 XS. Obtenido de Instrumento portátil para medir el mercurio en el aire. Recuperado de: https://mercury-instruments.com/es-Mercury_Instruments_Products_Tracker.html Consulta 06/06/2020

Evisa (2010) Instrument Database: LUMEX Ltd. - RA-915+ Zeeman mercury analyzer. Recuperado de: <http://www.speciation.net/Database/Instruments/LUMEX-Ltd/RA915-Zeeman-mercury-analyzer-;i297>. Consulta: 19/07/2020.

Fitzgerald, W., Mason, R, y Vandal, G. (1991). Atmospheric cycling and air-water exchange of mercury over mid-continental lacustrine regions. *Journal Water, Air and Soil Pollution*, 56, 745-767

Gaona, X. (2004). El mercurio como contaminante global. Desarrollo de metodologías para su determinación en suelos contaminados y estrategias para la reducción de su liberación al medio ambiente. Centre Grup de Tècniques de Separació en Química. Universitat Autònoma De Barcelona. Departament de Química Unitat de Química Analítica. Barcelona.

García, O. y Molina, J. (2010). Introducción de tecnologías más limpias en la minería y la extracción del oro artesanales, en el Nordeste Antioqueño y Bajo Cauca Antioqueño, Colombia. En: Técnicas aplicadas a la caracterización y aprovechamiento de recursos geológicos mineros. Red Minera XXI. CYTED., Pp. 51-64.

González, Y. (2018) Informe de estudios realizados en relación con la exposición a mercurio. Dirección de Promoción y Prevención. Subdirección de Salud Ambiental. Gobierno de Colombia. Editado por MinSalud. Bogotá.

Gonzalez, Y. (2018). Informe de estudios realizados en relación con la exposición a mercurio Dirección de Promoción y Prevención Subdirección de Salud Ambiental. Ministerio de Salud de Colombia, Noviembre 2018 Recuperado de:

<https://www.dssa.gov.co/images/programas-y-proyectos/factores-de-riesgo/riesgo-quimico/ANTIOQUIA%20INFORME%20DEPARTAMENTAL%20VEM2018.pdf>
Consulta: 15/10/2020

Goñi, E., Sabogal, A. y Asmat, R. (2014). Minería informal aurífera en Colombia. Principales resultados del levantamiento de la línea de base. Editado por Fedesarrollo, Banco Interamericano de Desarrollo.

Green Facts (2004). Mercurio. Recuperado de: <https://www.greenfacts.org/es/mercurio/n-3/mercurio-4.htm> Consulta: 07/8/2020

Güiza, L. y Aristizábal, J. (2013). Mercury and gold mining in Colombia: a failed state. Vol 18 No 1. Ecología & Conservación / Ecology & Conservation / Ecologia & Conservação

Hernández, M. (2012). Guía para la Investigación Documental. México: Editorial Trillas.

Hernández, R.; Fernández, C. y Baptista, P. (2010). Metodología de la Investigación. México, D.F.: Editorial McGraw-Hill.

Herrera, J. y Rojas, J. (2013). Química y Análisis. Laboratorio de Análisis Ambiental. Universidad Nacional de Costa Rica. San José.

Induanálisis (2020) Principales Fuentes de Liberación de Mercurio. Recuperado de: <http://www.lineaverdeceutatrace.com/lv/consejos-ambientales/dia-compromiso-internacional-control-mercurio/principales-fuentes-de-liberacion-de-mercurio.asp> Consulta: 08/08/2020

Instituto de Investigaciones en Geociencias, Minería y Química -Ingeominas. (1995). A Gold Mine. Edited by Min. Mines and Energy. Bogotá.

Jurado, Y. (2009). Técnicas de Investigación Documental. México: Editorial Thompson.

Kiefer A., Boyd, S., Smith, C., Shivdat, D., Matthews, E., Hull, M., Bridges, C. y Castleberry A. (2019). Chemical analysis of Hg⁰-containing Hindu religious objects. Plos one, 29 Dec 2019, 14(12).

Kocman, D.; Vreca, P.; Fajon, V.; Horvat, M. (2011). Atmospheric distribution and deposition of mercury in the Idrija Hg mine region, Slovenia. Environ. Res. 111, 1 – 9.

López, C. (2016). Desarrollo de un método analítico para la determinación de mercurio Atmosférico. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas, Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. Medellín, Colombia

Marins, R., De Andrade, J., Pereira, P., Paiva, E. y Paraquetti, H. (2000) Sampling techniques for the assessment of anthropogenic vapour and particulate mercury in the Brazilian Amazon atmosphere. J. Environ. Monit. 2(4):325-328.

Marrugo-Negrete, J.; Benitez, L. y Olivero-Verbel, J. (2008). Distribution of mercury in several environmental compartments in an aquatic ecosystem impacted by gold mining. *Arch Environ Contam Toxicol*. Aug;55(2):305-16.

Martínez, M. y Moctezuma, C. (2006). Espectrofluimetría. Instituto de Biotecnología. Universidad Autónoma de México. México.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2013). Ley 1658. Recuperado de: <https://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article?id=600:plantilla-asuntos-ambientales-y-sectorial-y-urbana-sin-galeria-51> Consulta: 31/08/2020

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2017). Resolución 2254 del 01 de noviembre de 2017. Colombia.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2010). Política de Prevención y Control de la Contaminación del Aire. Publicado por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Colombia.

Mora, A. y Jaramillo, D. (2020). Plan Estratégico para la Gestión de la Calidad del Aire en la Jurisdicción de Corantioquia contrato No. 110-CNT1907-96 DE 2019 UN PROYECTO DE: Universidad Pontificia Bolivariana. Grupo de Investigaciones Ambientales. Corantioquia. Colombia.

Murillo, L., Domínguez, J., Fernández, L., Alvarado, J. (2013). Diseño y optimización de una celda para generar vapor frío de mercurio y su determinación por Espectroscopia de Absorción Atómica Avances en Química, vol. 8, núm. 3, septiembre-diciembre, pp. 153-156 Universidad de los Andes Mérida, Venezuela.

Norma de la Calidad del Aire en Colombia (2017). Resolución 2254 del año 2017. Recuperado de: <https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/96-res%202254%20de%202017.pdf> Consulta:01/9/2020

Nriagu, J. (1992). *The Biogeochemistry of Mercury in the Environment*, Elsevier, New York.

Olimpo, C. (2020). Universidad de Antioquia. Segovia ya no es el más contaminado por mercurio. <http://www.udea.edu.co/wps/portal/udea/web/inicio/udea-noticias/udea-noticia/?page=udea.inicio.udea.noticias.noticia&uril=wcm%3Apath%3A%2FPortalUdeA%2FasPortalUdeA%2FasHomeUdeA%2FUdeA%2BNoticias%2FContenido%2FasNoticias%2FPeriodicoAlmaMater%2Fsegovia-mercurio>. Consulta:15/17/2020

Olivero J., Jhonson B., y Arguello, E. (2002). Human exposure to mercury due to fish consumption in San Jorge river basin, Colombia (South America). *Sci Total Environ* 2002; 289: 41-47.

Organización Mundial de la Salud (OMS, 2007). Las Guías sobre la Calidad del Aire de la OMS y otras Fuentes de Información. Recuperado de: https://www.who.int/phe/health-topics/outdoorair/databases/air_quality/es/index1.html Consulta:01/9/2020

Organización Mundial de la Salud (OMS, 2017). El mercurio y la salud. Editado por la OMS. Centro de Prensa. 31 de marzo de 2017. Recuperado de:

<https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/mercury-and-health> 20/8/2020

Consulta: 20/08/2020

Organización Mundial de la Salud (OMS, 2018) Guías de Calidad del Aire. Primera Conferencia Mundial de la OMS sobre Contaminación del Aire y Salud. Mejorar la Calidad del Aire, Luchar contra el Cambio Climático y Salvar Vidas. 30 de octubre a 1 de noviembre de 2018. Recuperado de: https://www.who.int/airpollution/events/conference/Air-Pollution_and_Health_Conference_Concept-Note_FINAL_web6_17SEP-ES.pdf.

Consulta:01/9/2020

Organización Mundial de la Salud OMS. (2011), Guidelines for Drinking-water Quality, Fourth Edition, World Health Organization.

OrphaNet (2020). Enfermedades Raras. Recuperado de: https://www.orpha.net/consor/cgi-bin/OC_Exp.php?lng=ES&Expert=330021 Consulta: 20/08/2020

Osores, F. y Rojas, J. y Manrique, C. (2012). Minería informal e ilegal y contaminación con mercurio en Madre de Dios: Un problema de salud pública. Enero. Revista Acta Médica Peruana 29(1):38-42

Palma, M., Muñoz, M., Pacheco, O., Ortiz, Y. y Díaz S. (2019). Niños y adolescentes expuestos ambientalmente a mercurio en diferentes municipios de Colombia. Rev Univ Ind Santander Salud. 2019; 51(1): 43-52.

PNUD (2019). Minenergía y PNUD lanzan proyecto para fortalecer la eliminación integral del mercurio en la minería. Colombia. 9 de julio de 2019 <https://www.co.undp.org/content/colombia/es/home/presscenter/pressreleases/2019/07/minenergia-y-pnud-lanzan-proyecto-para-fortalecer-la-eliminacion.html>.

Consulta:15/22/2020

Poulin J, y Gibb, H. (2008). Mercurio: Evaluación de la carga de morbilidad ambiental a nivel nacional y local. Editora, Prüss-Üstün A. Organización Mundial de la Salud. Serie Carga de Morbilidad Ambiental. No. 16. Ginebra.

PS Analytical (2020). Mercury. Editado por PS Analytical. Recuperado de: https://www.psanalytical.com/information/hgmercury.html?gclid=EAJaIQobChMIIYugwJOe6gIVFI7ICh3iMAUVEAAYASAAEgJ3P_D_BwE. Consulta: 16/07/2020

Puanngam, M.; Ohira, S., Unob, F.; Wang, J.; Dasgupta, P. (2010). A cold plasma dielectric barrier discharge atomic emission detector for atmospheric mercury. Talanta 2010,81, 1109 – 1115.

Ramírez, A. (2008). Intoxicación ocupacional por mercurio. An. Fac. med. 2008, vol.69, n.1 pp.46-51.

Rubiano, S. (2018). El mercurio en la minería ilegal de oro en los países del Bioma Amazónico Diagnóstico de flujos comerciales, información científica y respuestas institucionales. Editado por la Fundación Gaia Amazonas y Red Amazónica de Información Socioambiental Georreferenciada. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. New York.

Ruiz, I. (2016). Metodologías analíticas utilizadas actualmente para la determinación de mercurio en músculo de pescado. *Revista Pensamiento Actual*. Universidad de Costa Rica. Sede de Occidente. Vol. 16 - No. 26.

Sabino, C. (2006). *Metodología de la Investigación*. Buenos Aires: Editorial El Cid.

Sánchez, L.; Molina, J. y Machado, R. (2018). Línea base del mercurio, departamento de Antioquia: sedimentos activos finos de corriente escala 1: 500.000. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 18 (34). Enero-junio 2019. pp. 13-23

Schmidt, C. (2012). Mercurio y oro. Contaminación por Mercurio en la Minería de Oro Artesanal y de Pequeña Escala A40. (www.cienciaytrabajo.cl, Ed.) *Ciencia & Trabajo*, Año 14 Número 45 (Octubre / diciembre 2012), A40/A46. Recuperado de: <https://docplayer.es/18708744-Ciencia-trabajo-mercurio-y-oro-contaminacion-por-mercurio-en-la-mineria-de-oro-artesanal-y-de-pequena-escala-a40.html> Consulta 01/09/2020

Secretaría de Salud y Protección Social de Antioquia (2017). Informe de los Resultados de Tamizaje de Intoxicación por Mercurio en Poblaciones Antioqueñas con Explotación Minera Recuperado de: <https://www.dssa.gov.co/images/programas-y-proyectos/factores-de-riesgo/riesgo-quimico/ANTIOQUIA%20INFORME%20DEPARTAMENTAL%20VEM%202017.pdf> Consulta:01/10/2020

Secretaría de Salud y Protección Social de Antioquia (2018). Informe de los Resultados de Tamizaje para Determinar el Grado de Contaminación por Mercurio y otras Sustancias Tóxicas en los Municipios Antioqueños Ribereños o con Afluentes al Río Atrato en Cumplimiento de la Sentencia T-622 De 2016. Recuperado de: <https://www.dssa.gov.co/images/programas-y-proyectos/factores-de-riesgo/riesgo-quimico/ANTIOQUIA%20INFORME%20DEPARTAMENTAL%20VEM2018.pdf> Consulta:15/10/2020

Sierra, R. (2006). *Tesis Doctorales y Trabajos de Investigación Científica*. México: Thompson Editores.

Silva, M. (2016). *Calidad del Aire Ambiente Método normalizado para la determinación del mercurio gaseoso total*. Viceministerio de Gestión Ambiental. Dirección General de Calidad Ambiental. Experto Integrado de Gestión de la Calidad del Aire. Ministerio del Ambiente. Lima, Perú.

SXS (2019) Indicador de vapores de mercurio para una detección rápida y precisa. agosto 29, 2019 by recurso. <https://medioambienteyprocesosindustriales.com/indicador-de-vapor-de-mercurio-para-una-deteccion-rapida-y-precisa/> Consulta 01/09/2020

Telmer, K, y Veiga, M. (2008). World emissions of mercury from small scale artisanal gold mining and the knowledge gaps about them. Mercury fate and transport in the global atmosphere: measurements models and policy implications. Edited by U. U. Program. Recuperado de: <https://www.planetgold.org/world-emissions-mercury-artisanal-and-small-scale-gold-mining-and-knowledge-gaps-about-them> Consulta 17/7/2-20.

Thomson Environmental Systems (2002). Perfil toxicológico de Mercurio (Hg), Número CAS 7439-97-Tekran 2537X. Obtenido de Automated Ambient Air Mercury

Analyzer. Recuperado de: <https://www.thomsongroup.com.au/product/tekran-2537x-automated-ambient-air-mercury-analyzer/>. Consulta: 15/06/2020.

Tsoi, Y., Tam, S. y Leung, K. (2010). Rapid speciation of methylated and ethylated mercury in urine using headspace solid phase microextraction coupled to LC-ICP-MS.J. Anal. At. Spectrom. 2010,25, 1758 – 1762

Veiga M. y Baker, R. (2004). Protocols for environmental and health assessment of mercury released. Edited by Global Mercury Project. Recuperado de: http://www.undp.org/gef/documents/iw/practitioner/Protocols_for_Environmental_Health_Assess_of_Mercury-Released%20by-ArtisanalSmall-Scale-Gold-Miners-1.pdf. Consulta: 23/06/2020

Veiga, M. (2002). Abandoned artisanal gold mines in the Amazon: a. Nat. Res. For 26 (1), 15–26.

Wang, Z. y Luo, Y. (2011). Exposure of the urban population to mercury in Changchun city, Northeast China. Environ Geochem Health 2006; 28:61-6. doi:10.1007/s10653-005-9012-2

Weinberg, J. (2007). Introducción a la Contaminación por Mercurio para las ONG. Recuperado de: https://ipen.org/sites/default/files/documents/ipen_mercury_booklet-es.pdf. Consulta: 24/06/2020

Zhang, L. (2011). Preliminary study on health risk from mercury exposure to residents of Wujiazhan town on the Di'er Songhua river, North-east China. Environ Geochem Health 2006; 28:67-71. doi:10.1007/s10653-005-9013-1.