

**EFFECTOS DE LA MINERÍA AURÍFERA SOBRE EL NIVEL DE
MERCURIO EN CABELLO Y LOS SÍNTOMAS NEUROLÓGICOS
EN LA POBLACIÓN DE LAS VEREDAS LA TOMA Y YOLOMBÓ,
CAUCA EN EL AÑO 2020**

EVELYN ELENA PEÑA ZÁRATE



**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE SALUD
ESCUELA DE SALUD PÚBLICA
MAESTRÍA EN EPIDEMIOLOGÍA
SANTIAGO DE CALI - COLOMBIA
2025**

**EFFECTOS DE LA MINERÍA AURÍFERA SOBRE EL NIVEL DE
MERCURIO EN CABELLO Y LOS SÍNTOMAS NEUROLÓGICOS
EN LA POBLACIÓN DE LAS VEREDAS LA TOMA Y YOLOMBÓ,
CAUCA EN EL AÑO 2020**

EVELYN ELENA PEÑA ZÁRATE

Trabajo de investigación para optar al título de Magister en Epidemiología

Director:

FABIAN MENDEZ PAZ, MD, MSc, PhD

Docente de la Escuela de Salud Pública

Universidad del Valle

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE SALUD
ESCUELA DE SALUD PÚBLICA
MAESTRÍA EN EPIDEMIOLOGÍA
SANTIAGO DE CALI - COLOMBIA
2025**

Nota de aceptación

Firma del presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

RESUMEN

En Colombia, la minería artesanal y de pequeña escala (MAPE) representa más del 70% de las operaciones mineras, con el oro como principal mineral extraído. Esta actividad, en gran parte informal, se concentra en regiones vulnerables como el Cauca, donde constituye una fuente de empleo, pero también un riesgo ambiental y de exposición al mercurio, metal neurotóxico asociado con temblores, alteraciones de memoria y disfunción motora. En comunidades como La Toma y Yolombó (Suárez, Cauca) persiste la preocupación por los efectos del mercurio en la salud de la población.

Objetivo: Identificar la relación entre los niveles de mercurio en cabello y la presencia de síntomas neurológicos en la población adulta de La Toma y Yolombó, Cauca.

Metodología: Se desarrolló un estudio transversal a partir de la base de datos del proyecto macro sobre salud y exposición a mercurio. Se incluyeron adultos ≥ 18 años residentes en las veredas La Toma y Yolombó. La información utilizada correspondió a encuestas sociodemográficas, dietarias y ocupacionales, valoración clínica y neurológica, y análisis de mercurio en muestras de cabello. Para evaluar la asociación entre niveles de mercurio ($\geq 1 \mu\text{g/g}$ vs $< 1 \mu\text{g/g}$) y síntomas neurológicos se calcularon razones de prevalencia mediante modelos de regresión de Poisson, ajustados por edad, sexo y escolaridad.

Resultados: Se incluyeron 129 participantes, con una mediana global de mercurio en cabello de $0,37 \mu\text{g/g}$ y valores máximos de hasta $14 \mu\text{g/g}$. Los menores de 40 años y quienes trabajaban en minería con uso de mercurio presentaron mayor prevalencia de niveles elevados. El consumo de pescado mostró un posible efecto modificador, aunque sin significancia estadística. No se hallaron asociaciones consistentes entre la mayoría de síntomas neurológicos y los niveles de mercurio, salvo una tendencia paradójica a menor disdiadococinesia en los más expuestos.

Conclusión: La exposición ocupacional al mercurio constituye el principal factor de riesgo en esta población minera, especialmente en adultos jóvenes. Aunque los niveles promedio fueron bajos, se identificaron casos con concentraciones elevadas y síntomas sugestivos de neurotoxicidad crónica. Estos hallazgos refuerzan la necesidad de implementar estrategias de prevención, vigilancia y control ambiental en comunidades mineras del Cauca.

Palabras claves: Mercurio, minería de oro, síntomas neurológicos, Cauca.

CONTENIDO

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	6
2. ESTADO DEL ARTE	9
2.1. Vías de exposición:	10
2.2. Fuentes de exposición:	12
2.3. Toxicocinética:	13
2.4. Efectos en la salud por exposición a mercurio:	14
2.5. Minería artesanal y de pequeña escala (MAPE)	16
2.6. Contexto de minería de Oro en Colombia	17
3. MARCO TEÓRICO	19
4. OBJETIVOS.....	24
4.1. Objetivo general	24
4.2. Objetivos específicos	25
5. METODOLOGÍA.....	25
5.1. Tipo de Estudio	25
5.2. Área de estudio	26
5.3. Población y muestra.....	27
5.4. Tamaño de muestra:	28
5.5. Variables y procedimientos	29
5.6. Análisis estadístico.....	34
6. CONSIDERACIONES ÉTICAS.....	35
7. RESULTADOS	36
8. DISCUSIÓN.....	46
9. CONCLUSIONES.....	52
10. REFERENCIAS.....	53
11. ANEXO 1: Procedimiento para la recolección y medición de nivel de mercurio en cabello.....	65

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

En Colombia, la minería artesanal y de pequeña escala (MAPE) se caracteriza por extraer minerales manualmente o con maquinaria limitada, a menudo se realiza de manera informal, sin el cumplimiento de las normas ambientales y laborales (1). Esto la hace insostenible en términos económicos y ambientales. Conforme al último censo minero en Colombia, el 72% de las operaciones mineras en el país son clasificadas como pequeñas, y aproximadamente el 30% de la producción total de estas corresponde a la extracción de oro (2). Sin embargo, la minería a grande escala o legal, liderada por grandes transnacionales (Anglogold Ashanti Colombia S A., Aris Gold Corporation, Zijin Mining Group entre otros) genera impactos ambientales significativos. Su actividad contribuye a la contaminación del agua por el uso inadecuado de productos químicos, al desgaste del suelo y a la deforestación necesaria para la extracción de minerales (3–5). La demanda de oro, impulsada por grandes capitales que buscan acumular riqueza, perpetúa prácticas extractivistas que priorizan el beneficio económico sobre la sostenibilidad ambiental (5,6).

La minería ilegal o de hecho se desarrolla en áreas vulnerables, marcadas por la pobreza, marginalidad y la presencia de grupos armados ilegales. La extracción de oro informal en Colombia se lleva a cabo principalmente en departamentos como Chocó, Antioquia, Cauca, Córdoba, Bolívar, Nariño, Valle del Cauca, y Tolima; regiones con escasa presencia estatal, afectadas por desigualdad social y pérdida de autonomía territorial debido a cambios en las relaciones sociales, gobernanza y derechos territoriales (7,8).

La minería es una actividad económica importante que genera empleo e ingresos en estas regiones del país; siendo la principal fuente de ingresos en muchos hogares. Los mineros ilegales se enfrentan a desigualdades en la distribución de beneficios, además se enfrentan a condiciones laborales precarias y riesgos para la salud debido a la exposición a químicos y otros peligros. A pesar de lo anterior, la minería de oro sigue aumentando en la última década, debido a la alta demanda y precios internacionales elevados, atrayendo la participación de grupos armados en la explotación y exportación ilegal de oro (9).

El municipio de Suarez, al noroccidente del Cauca, cuenta con una población de aproximadamente 33.053 habitantes (2022), de ella el 81.6% reside en la zona rural. El corregimiento de la Toma hace parte de la zona rural, rodeado por los ríos Cauca y Ovejas, en cuyas orillas se desarrolla la minera aurífera, una de las principales actividades económicas de la población (10,11). En el 2016 un estudio recolectó muestras de agua de las quebradas La Mina, El Tanque y Santa Rita que desembocan en el río Ovejas, identificando que la totalidad de las muestras estaban contaminadas y superan los valores máximos aceptables de mercurio ($20\mu\text{g/L}$) según la resolución 0631 de 2015 por el Ministerio de la Protección Social y el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (12).

Estudios previos han destacado la contaminación del agua en el corregimiento de la Toma, así como limitaciones para el acceso a fuentes de agua de calidad, con un adecuado saneamiento e higiene (13). El agua potable de La Toma no cumple las normas nacionales e internacionales de calidad del agua para consumo humano (9). Es preocupante la contaminación del agua en esta región debido a las prácticas que utilizan mercurio para la extracción de oro (14). Además, se ha evidenciado que el agua de los arroyos y del río utilizada para la pesca y el recreo por la comunidad también contiene niveles detectables de mercurio. El pescado capturado localmente es la principal fuente de proteínas en la dieta de la comunidad (13,15).

El mercurio (Hg) es un metal líquido a temperatura ambiente. El Hg está presente en forma metálica (también llamado mercurio elemental), inorgánico que se produce al combinarlo con elementos como el cloro, azufre u oxígeno, y en forma orgánica cuando se combina con carbono (16). El metilmercurio es la presentación más común del mercurio orgánico en el ambiente, este se produce a través de la transformación del mercurio mediante microorganismos del ambiente (17).

El Hg sufre un proceso de evaporación desde las superficies terrestres hacia la atmósfera (16,18). La concentración atmosférica de mercurio ha aumentado trascendentalmente desde el inicio de la civilización, según el último reporte de la Evaluación Mundial de Mercurio del 2018, se observó un aumento exponencial del 20% en las emisiones globales de mercurio a la atmósfera en 2015 en comparación

con las estimaciones de 2010. De estas emisiones, el 49% proviene de Asia, el 19% de América del Sur y el 16% de África Subsahariana. La minería de oro artesanal contribuye con casi el 38% del total de las emisiones mundiales, siendo la principal fuente en América del Sur (19).

Existen diversas fuentes naturales de Hg como la desgasificación de la corteza terrestre, la evasión de los suelos, la vegetación, los incendios forestales, las erupciones volcánicas y las actividades geotérmicas (20). Asimismo, el Hg se encuentra comúnmente en entornos laborales debido a su extenso empleo en la extracción de oro, la industria farmacéutica, la agricultura y otros sectores industriales. Una persona puede exponerse al mercurio al respirar aire contaminado, al ingerir agua o alimentos contaminados, o a través de contacto con la piel. El consumo de pescados, mariscos u otros tipos de alimentos es la principal fuente de exposición al metilmercurio. La exposición al mercurio elemental e inorgánico se da usualmente en el ámbito ocupacional, principalmente, con la minería aurífera o debido al contacto con productos que contienen mercurio (19).

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS) el mercurio se encuentra entre las diez sustancias químicas que generan mayor preocupación para la salud pública (21); siendo el mercurio elemental y el metilmercurio los de mayor efecto tóxico sobre la salud (16). El mercurio puede afectar el sistema nervioso, digestivo e inmunitario, así como en pulmones, riñones, piel y ojos. Los síntomas neurológicos y comportamentales son los más frecuentes los cuales incluyen síntomas como temblores, insomnio, pérdida de memoria, efectos neuromusculares, dolores de cabeza, problemas en el psicodesarrollo, disfunción cognitiva y motora. Los efectos de la exposición al mercurio pueden ser muy graves, sutiles o no producirse en absoluto dependiendo de la cantidad y duración de la exposición, la edad de la persona (los fetos son los más vulnerables) y la vía de exposición (16,22).

A pesar de que en Colombia está prohibida la comercialización y uso del mercurio (Ley 1658 del 15 de julio de 2013), en el país se ha llegado a emitir hasta 150 toneladas anuales de mercurio, lo que lo posiciona como el mayor contaminante per cápita de mercurio en el mundo, producto principalmente de la extracción artesanal del oro (23). El mercurio es la principal sustancia que causa intoxicaciones por

metales en nuestro país (24); pero hay subregistro ya que Colombia cuenta con 13 departamentos mineros y en su mayoría con minería artesanal, en los que a pesar del alto uso de mercurio en la extracción del oro no se registran intoxicaciones (25). La mayoría de estas intoxicaciones son de tipo crónico más que de un evento agudo (26). Los mineros se exponen a mercurio mediante el contacto dérmico e inhalación de vapores de mercurio generados en la quema de la amalgama. La población no minera puede igual exponerse por efectos de la minería aurífera por inhalación de vapores de mercurio generados, y por consumo de agua y alimentos contaminados (27).

Teniendo en consideración que el Convenio de Minamata de 2013 establece la necesidad de fomentar la elaboración y ejecución de estrategias y programas para detectar y proteger a la población en situaciones de riesgo de perjuicios en salud derivados a exposición al mercurio (28); hasta el momento del desarrollo de este proyecto no existía evidencia sobre el nivel de exposición al mercurio y sus efectos en la salud relacionados con la minería de oro en el corregimiento de la Toma. Por lo tanto, se estableció la siguiente pregunta de investigación: *¿Cuál es el impacto de la minería de oro en los niveles de mercurio y en los síntomas neurológicos asociados con este metal en la población de las veredas de La Toma y Yolombó, Cauca en el año 2020?*

Como resultados esperados se propuso obtener una comprensión más completa de la exposición al mercurio y los efectos neurológicos asociados en esta población, para orientar y priorizar estrategias de educación, monitoreo, control y vigilancia de la exposición al mercurio por parte de las autoridades competentes. Con lo anterior, poder reforzar las políticas públicas, y tomar las medidas necesarias para abordar esta situación de interés para la salud pública.

2. ESTADO DEL ARTE

El mercurio es un metal pesado altamente tóxico que representa una preocupación importante para la salud pública y el medio ambiente. Su liberación en el entorno puede tener efectos perjudiciales para los ecosistemas y las personas que están

expuestas a él (16,17). El mercurio tiene una larga historia por sus múltiples usos en la medicina y en la industria, pero también por su toxicidad; todas las formas de mercurio pueden ser tóxicas a dosis elevadas. Los eventos más trágicos en la historia relacionados con la toxicidad del mercurio incluyen los casos de la Bahía de Minamata en Japón e Irak (29).

En la década de 1950, la bahía de Minamata (Japón) fue gravemente contaminada por mercurio procedente de los desechos de una fábrica que producía acetaldehído; como resultado las bacterias presentes en el agua transformaron el mercurio en metilmercurio, que se bioacumuló y biomagnificó en el músculo de los peces. Se observaron efectos neurológicos como parestesias, temblores, alteraciones sensoriales y de la audición, en la población humana que dependía del consumo de pescado, especialmente en los fetos y niños (30,31). Las personas con altas concentraciones de mercurio presentaban un cuadro clínico caracterizado por ataxia, parálisis cerebral, disartria, alteraciones sensoriales, visión en túnel y retardo mental, denominado como Enfermedad de Minamata siendo la más grave manifestación (32). Esta tragedia resultó en la muerte de más de dos mil personas, y dejó a miles más con lesiones incapacitantes (33,34).

En 1971, ocurrió en Irak una intoxicación por metilmercurio, debido al tratamiento de semillas de trigo con fungicidas a base de mercurio. Estas semillas estaban destinadas a la siembra, sin embargo, debido a circunstancias desafortunadas una gran cantidad fue utilizada para hacer productos alimenticios como el pan. En este evento histórico fallecieron aproximadamente 10,000 personas y 100,000 más sufrieron afectaciones severas del sistema nervioso (34,35). Así como estas dos tragedias, han surgido otros eventos relevantes en salud pública relacionados con intoxicación por mercurio, que han permitido identificar que el sistema nervioso central es el principal lugar de acción del mercurio en el cuerpo humano, y que la frecuencia y severidad de signos y síntomas se relacionan con los niveles sanguíneos de mercurio (34,36).

2.1. Vías de exposición:

El mercurio ha sido utilizado por los humanos desde hace más de 2500 años; los griegos y romanos lo utilizaban en áreas de medicina y cosmética. Actualmente las actividades mineras con mercurio se convierten en una importante fuente para el ciclo biogeoquímico del mercurio, además de la combustión de combustibles fósiles. De la cantidad total de mercurio que se libera anualmente al ambiente se estima que aproximadamente dos tercios derivan de la actividad humana (17,19,37).

El mercurio se presenta de forma natural como mineral y se distribuye por todo el medio ambiente tanto por procesos naturales como antropogénicos. El ciclo biogeoquímico del mercurio inicia con la volatilización del mercurio elemental desde superficies terrestres y acuáticas, a la atmósfera mediante procesos naturales como las erupciones volcánicas, la erosión de rocas, los incendios forestales; y por actividades humanas como la quema de combustibles fósiles, la minería y la incineración de residuos (17,18,38). Un átomo de mercurio puede permanecer en circulación en la atmósfera por más de 1000 años (17).

El mercurio elemental se transporta a través de la atmósfera global, el cual puede depositarse en las superficies a través de la precipitación, y volver a emitirse; también puede ser absorbido por las plantas u oxidarse en el aire lo que favorece su deposición. En las superficies el mercurio puede ser transformado a metilmercurio por diferentes microorganismos en el ambiente, y ser transportado a superficies acuáticas e ingresar a las cadenas alimentarias (17,18).

El mercurio se amalgama con otros metales, y se ha utilizado durante siglos en la minería de oro para amalgamar el frágil oro y convertirlo en una aleación estable (39). La combustión de la amalgama vaporiza el mercurio en forma gaseosa dejando atrás el oro (40). La extracción de oro artesanal y en pequeña escala (ASGM) es uno de los principales consumidores de mercurio, y es una actividad económica importante en muchos países en desarrollo de África, Asia y Sudamérica, constituyendo en muchos casos la principal fuente de ingresos para la población de las zonas rurales (41,42). Este tipo de minería varía suele emplear tecnologías rudimentarias, y la amalgamación con mercurio es actualmente el método de extracción de oro más utilizado (43,44). El 44% de los municipios colombianos tienen tradición de minería

artesanal informal, y el 23% de ellos tienen ASGM, que es el resultado de la pobreza y la falta de oportunidades de empleo en las zonas rurales (45).

2.2. Fuentes de exposición:

Las principales fuentes de exposición a mercurio en la población general incluyen la inhalación de vapores de mercurio en el aire ambiente, la ingestión de agua potable y alimentos contaminados, y la exposición de mercurio a través de tratamientos dentales y médicos (17,46). La ingesta de alimentos es la exposición no ocupacional más importante, siendo el pescado, los mariscos y otros alimentos de mar las principales fuentes de metilmercurio en la dieta. Los peces y mariscos pueden acumular altas concentraciones de metilmercurio en sus músculos a medida que consumen otros organismos contaminados esto se conoce como biomagnificación del mercurio (47). Esto puede llevar a niveles peligrosos de mercurio en los organismos tope de la cadena, como los grandes peces depredadores y los seres humanos que los consumen (47,48).

De acuerdo con el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), en Colombia, y particularmente en las poblaciones ribereñas y costeras, el 90 % del consumo de proteína de origen animal proviene del pescado, principalmente como resultado de un acceso muy bajo a otro tipo de proteínas. Sin embargo, los niveles de contaminación que se reportan en ríos como el San Jorge, Cauca y Magdalena, han limitado el consumo de esta fuente alimenticia a la población (49,50). Teniendo en cuenta la evidencia de exposición a mercurio por el consumo de mariscos, se establece la Resolución 122 de 2012 que reglamenta los límites máximos de metales pesados, siendo 0,5 mg/kg para el mercurio. Así mismo, la Norma Técnica Colombiana (NTC) 1443 indica un límite de consumo humano de mercurio de 0,5 mg/kg.

Por otra parte, la inhalación de vapores de mercurio metálico es la principal exposición ocupacional. Múltiples industrias procesan o utilizan el mercurio para el procesamiento de cloro-álcali, producción de lámparas fluorescentes, extracción y procesamiento de oro, aplicaciones de amalgama dentales (contienen entre un 40-50% de mercurio), fábricas de pintura, joyería, producción de baterías, termómetros

entre otros (46). En el sector de la minería, los vapores de mercurio generados posterior a la combustión de la amalgama son inhalados por los mineros o los habitantes de las inmediaciones (40). Adicionalmente, las personas que viven cerca de antiguas explotaciones mineras o lugares de producción de mercurio, instalaciones de producción secundaria (reciclado), incineradoras municipales o médicas, o centrales eléctricas de carbón tienen una exposición potencialmente elevada a vapores de mercurio (26).

En Colombia el mercurio se utiliza en su mayoría en la minería artesanal y en pequeña escala, en la fabricación de lámparas y en amalgamas dentales, cabe destacar que a partir de septiembre del año 2017 la importación de mercurio en Colombia está prohibida, salvo el caso de la industria que lo utiliza para producir amalgamas dentales. Según el SIVIGILA, durante el periodo 2007 – 2017 se presentaron en Colombia 2762 casos de intoxicación por mercurio, la mayor proporción de casos se presentó en el rango de edad de 21 a 55 años (edad laboralmente activa) y con mayor frecuencia en hombres. El 97% de los casos fueron ocupacionales (25).

2.3. Toxicocinética:

El 80% del mercurio metálico se absorbe por la inhalación de vapores, entre el 7 a 10% es ingerido y alrededor del 1% se absorbe por contacto con la piel. Los vapores de mercurio metálico producen una alta concentración de este en los pulmones y se distribuye rápidamente por la sangre, este atraviesa fácilmente la barrera hematoencefálica y placentaria, se acumula con mayor proporción en los riñones y en el cerebro. El mercurio metálico puede permanecer semanas o meses en el cuerpo; cuando este entra al cerebro se convierte a una forma inorgánica el cual puede permanecer por mucho más tiempo. Su excreción es principalmente por heces y orina (17,51).

La vía principal de absorción del mercurio inorgánico (cloruro mercurioso y cloruro mercúrico) es por vía digestiva (40%), se distribuye igualmente mediante el torrente sanguíneo y se acumula principalmente en riñones e hígado. Este no atraviesa la barrera hematoencefálica, por lo que no entra con facilidad al cerebro. Su

eliminación es principalmente por las heces y la orina. Se estima que tiene una vida de 49 a 120 días (17,37,51).

El mercurio orgánico se absorbe fácilmente por las tres vías (respiratoria, digestiva y dérmica). El metilmercurio es absorbido en un 95% por vía digestiva, mientras que el dimetilmercurio se absorbe fácilmente por la piel. Una vez que el mercurio orgánico entra al torrente sanguíneo se distribuye fácilmente a los diferentes tejidos y órganos. Se acumula en el cerebro, hígado y riñones. Atraviesa fácilmente la barrera hematoencefálica y placentaria. Se elimina a través de heces y orina. (37,51). Los órganos diana del metilmercurio son el sistema nervioso central especialmente el cerebelo y la corteza visual; y el sistema nervioso periférico, principalmente los ganglios de la raíz dorsal de la columna vertebral. El metilmercurio tiene una vida media de 60 a 90 días, y se excreta mediante heces, orina y cabello (17,52).

La toxicidad depende de la vía de exposición, la cantidad y el tiempo de contacto con el tóxico, el tiempo que permanezca el tóxico dentro del organismo, el tiempo que tarde la instauración de un tratamiento adecuado, y del estado físico y/o características de cada paciente (edad, peso, estado nutricional, enfermedades asociadas, etc.) (16,25,53). Se estima que el contenido normal de mercurio en el organismo humano oscila entre 1 - 13 miligramos y que el metilmercurio supone el 10% del contenido total.

2.4. Efectos en la salud por exposición a mercurio:

La intoxicación por mercurio puede ser por exposición aguda (menor o igual a 14 días), subaguda (entre 15 a 364 días) o crónica (mayor o igual a 365) (17). Los síntomas de la intoxicación varían de acuerdo con la forma del metal y la vía de exposición:

- Mercurio elemental: Los síntomas incluyen fiebre, escalofríos, disnea, dolor torácico, cefalea, alteraciones gastrointestinales como diarrea, náuseas, y emesis; alteraciones auditivas y visuales; y edema pulmonar (17,54).
- Mercurio inorgánico: Se manifiesta principalmente con síntomas gastrointestinales debido a que es la principal vía de absorción, presentando

síntomas como dolor abdominal, náuseas, diarrea, ulceración y hemorragia del tracto gastrointestinal. También se pueden observar síntomas renales como oliguria, proteinuria, hematuria, y falla renal aguda; y síntomas neurológicos como alteraciones visuales, comportamentales, y convulsiones. Se estima que estos síntomas se pueden presentar con una dosis ≥ 1 g Hg (17,55).

- Mercurio orgánico: Es poco frecuente, sin embargo, se ha reportado un caso de una mujer expuesta a dosis letales de dimetilmercurio líquidos, esta persona presentó deterioro del equilibrio, la marcha y el habla, además de parestesia, alteraciones visuales y auditivas (56).

Una exposición crónica al mercurio elemental y al mercurio orgánico afecta principalmente el sistema nervioso central. A niveles bajos de exposición se producen síntomas inespecíficos como anorexia, pérdida de peso, debilidad, fatiga, y cefalea; por el contrario niveles elevados de exposición puede incluir síntomas como fasciculaciones musculares, polineuropatía con alteraciones en la electromiografía, alteraciones en la marcha y el equilibrio; alteraciones cognitivas y del comportamiento como falta de concentración, pérdida de la memoria, labilidad emocional, depresión, insomnio, y delirio (17,57).

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 (16). La exposición ocupacional relacionada con la minería aurífera puede causar una gran variedad de signos y síntomas, en particular en el ámbito de los trastornos neuropsicológicos, como ataxia, temblor o problemas de memoria (58).

Un estudio realizado en una zona minera de Ecuador investigó los niveles de mercurio en sangre y el estado neuro-sensorial de niños y adultos residentes en esta zona; revelando niveles muy altos de mercurio en sangre, y su asociación con síntomas como cefalea, y pérdida de la memoria; se identificaron además casos de deterioro neurológico severo y de patologías auditivas (59). Otro estudio realizado en 180 personas afectadas por áreas de minería a pequeña escala en Tanzania, reportaron frecuentemente síntomas subjetivos como cansancio fácil, disminución del apetito, tristeza, temblor durante el trabajo, problemas de memoria, salivación excesiva;

además de hallazgos durante la valoración física como, ataxia, temblor de párpados y dedos, trastornos sensoriales y de reflejos osteotendinosos (60).

Se ha debatido el umbral de toxicidad del mercurio en sangre. Graeme et al. consideraron que un nivel en sangre superior a 15 g/l indicaba toxicidad por mercurio (61), mientras que Dantzig consideró que un nivel tan bajo como 6 g/l o menos puede ser tóxico (62). En una revisión sistemática encontró niveles urinarios de mercurio >275 µg/L se asociaban con la presencia de alteraciones motoras como temblores, en personas con exposición ocupacional al mercurio (63). Por otra parte, una revisión sistemática, describió que el grado y la especificidad de la recuperación principalmente de síntomas neurológicos, pueden ser muy variables; las intoxicaciones agudas parecen tener una mejor recuperación en comparación con la intoxicación crónica (64).

El mercurio puede medirse en muestras biológicas de sangre, orina y cabello. La sangre y orina refleja una exposición reciente, mientras que el pelo adyacente al cuero cabelludo es indicativo de una exposición que ocurrió 1-3 semanas antes; por lo tanto, las alteraciones recientes en los patrones de exposición no se reflejarán en el pelo (65). Estudios han determinado que los niveles de mercurio en cabello son 250 a 300 veces mayor que la concentración en sangre (66). El nivel de mercurio en el pelo suele ser <1 µg/g en individuos que no comen pescado, pero puede ser >30 µg/g en aquellos que consumen con frecuencia pescado con alto contenido en mercurio. El nivel de mercurio en el pelo no suele correlacionarse con la concentración de mercurio en sangre ni con los síntomas de toxicidad por mercurio; la toxicidad se evalúa por los signos y síntomas en el paciente, y no por los resultados de laboratorio o los intervalos de referencia (67).

2.5. Minería artesanal y de pequeña escala (MAPE)

La minería artesanal y de pequeña escala (MAPE) implica la extracción de minerales por parte de individuos, grupos o comunidades utilizando tecnología o maquinaria limitada. Esta actividad a menudo se practica de manera informal y de subsistencia, lo que la hace insegura, poco rentable, no competitiva y ambientalmente insostenible (1,68). Se considera la minería artesanal como aquella que se realiza completamente

manual, mientras que la minería a pequeña escala involucra cierta mecanización (69). En Colombia la minería ilegal o minería de hecho es aquella desarrollada sin título minero, es decir, aquellas que no están inscritas en el Registro Minero Nacional (70).

La minería ancestral o tradicional se refiere a la extracción manual de oro, utilizando mediante técnicas de barequeo que implica el lavado de arenas con el objetivo de separar y recoger metales contenidos en dichas arenas (71). Este tipo de minería es ecológicamente amigable ya que no requiere de químicos como el mercurio (72,73). Sin embargo, el Decreto 2715 de 2010 diferencia la minería tradicional de la minería ilegal cuando los mineros que ejercen la actividad sin registro cumplen los siguientes requisitos: 1) que los trabajos mineros se hayan adelantado en forma continua durante 5 años y 2) una existencia mínima de 10 años anteriores al 9 de febrero de 2010.

No obstante, parte de la minería de oro informal e ilegal involucra prácticas de amalgamación con mercurio, dado que es más económico, simple, y rápido, lo que lo hace atractivo para mineros que no tienen acceso a tecnologías más avanzadas. Lo anterior ha conducido a un uso irresponsable e indiscriminado del mercurio (68). El mercurio se adhiere al oro formando una amalgama que facilita su superación de la roca, arena u otro material. Luego se calienta la amalgama para que se evapore el mercurio y quede el oro (74). Es de resaltar, que en muchas ocasiones los insumos para la extracción del oro como el mercurio se obtienen de forma ilegal; lo que a su vez dificulta aún más el control de la minería ilegal y la erradicación del uso del mercurio en la minería en países como Colombia (75).

2.6. Contexto de minería de Oro en Colombia

Se ha identificado que la minería ilegal o de hecho se desarrolla principalmente en zonas vulnerables por condiciones de pobreza, marginalidad, difícil acceso y presencia de grupos armados ilegales. El 29 % de la Evidencia de explotación de Oro de Aluvión (EVOA) en Colombia cuenta con permisos técnicos y/o ambientales y el 6 % se encuentran en tránsito a la legalidad (76). El 44% de los municipios del país reportan actividades de minería ilegal siendo en su mayoría minería de pequeña escala; este tipo de minería representa la actividad económica principal de muchos

hogares en Colombia (68). Por lo general, los mineros informales buscan sobrevivir, pero en ocasiones buscan enriquecerse rápidamente sin intervención del gobierno

Se reportó para el 2015 que el sector minero en Colombia se genera en su mayoría en zona rural, y se caracteriza por demandar mano de obra masculina, por lo que el 80% de la población minera son hombres, siendo principalmente adultos (60%) y jóvenes (30%). Más del 50% de los mineros tiene un nivel educativo de primaria y el 13% no tienen nivel educativo. Por otra parte, se reporta que cerca del 38% de las personas ocupadas en minería son pobres (tienen ingresos menores a 2 dólares diarios, lo que equivale a \$180.000 pesos colombianos al mes), se destaca que en Cauca y Chocó tienen el mayor porcentaje de ocupados pobres (8). Lo anterior pone en evidencia, que en Colombia el sector dedicado a la minería de oro es una población con condiciones y factores socioeconómicos desfavorecidos.

En Colombia aproximadamente el 38 % de los territorios con presencia de EVOA también presentan siembra de cultivos de coca. La convergencia de estas dos actividades no solo genera impactos negativos en los ecosistemas naturales, sino que son un factor determinante en la dinámica económica del territorio. Además, establecen entornos propicios para que grupos al margen de la ley (guerrilla, paramilitares y bandas emergentes) obtengan beneficios a través de su participación directa o indirecta en actividades económicas ilícitas.

En la última década, la minería ilegal de oro ha aumentado en Colombia y América Latina debido a la alta demanda y precios internacionales elevados. El mercado del oro mantiene un crecimiento sostenido, impulsado por su creciente demanda en diversos sectores. Además de su tradicional uso en joyería, el oro desempeña un papel clave en la industria electrónica debido a sus propiedades de conductividad y resistencia a la corrosión. Asimismo, las barras o lingotes de oro continúa siendo un refugio ante la inflación y las fluctuaciones de divisas, lo que refuerza su relevancia en los mercados globales (77,78). Esto ha motivado la participación de grupos armados en la explotación y exportación ilegal de oro. La minería ilegal de oro se ha convertido en una importante fuente de financiamiento para estos grupos, incluso superando al tráfico de cocaína (75).

Los mineros ilegales o de hecho se enfrentan a condiciones de trabajo inseguras y de alto riesgo en salud en comparación con la minería formal, debido a la exposición de químicos, ruidos, vibración, esfuerzos físicos excesivos, equipamiento inadecuado, riesgo de accidentes de trabajo, entre otros. Se evidencia un reporte de información insuficiente en parte debido al miedo de los mineros por enfrentar sanciones que puedan afectar sus medios de subsistencia (68).

La organización de las naciones unidas recomienda a los gobiernos toman medidas de apoyo y asistencia técnica a los mineros artesanales y de pequeña escala, brindándoles un ambiente más propicio. Lo anterior con el fin de mejorar el desarrollo socioeconómico y reducción de la pobreza de la población que participa en este sector; además de convertirlo en un mercado más competitivo, rentable y sustentable. Sin embargo, la minería informal persiste debido a diversas razones, como la falta de conocimiento sobre requisitos legales, prácticas culturales arraigadas, cargas tributarias elevadas, acceso limitado a concesiones mineras y falta de control gubernamental, entre otros factores (69). Legalizar estas actividades puede ser costoso y complicado para los pequeños mineros, y en áreas remotas, el gobierno suele carecer de capacidad para regular o apoyar la minería informal (68).

3. MARCO TEÓRICO

El origen de las enfermedades es multifactorial, lo que hace que sea complejo identificar las conexiones entre las diferentes vías de exposición, el entorno y las enfermedades. Es importante tener en cuenta que la mera presencia de un contaminante en el entorno o en los tejidos humanos no conduce necesariamente a la aparición de una enfermedad. Las condiciones sociales, económicas y políticas en las que las personas viven y trabajan tienen un impacto fundamental en su salud; las inequidades en estas condiciones influyen en la dinámica de exposición y contaminación por metales pesados. Se podría plantear como marco teórico para este proyecto el Modelo de Determinantes Sociales de la Salud de la OMS (79).

No obstante, este enfoque no abarca todas las dimensiones necesarias para comprender la complejidad de esta problemática, incluyendo sus implicaciones

biológicas, ambientales, sociales y políticas, así como las interacciones entre ellas. En este sentido, se presenta en la figura 1 un marco teórico que busca abordar la complejidad de estas múltiples dimensiones, destacando tanto los aspectos biológicos como los ambientales, sociales y políticos relacionados con la minería informal, particularmente su vínculo con la exposición al mercurio.

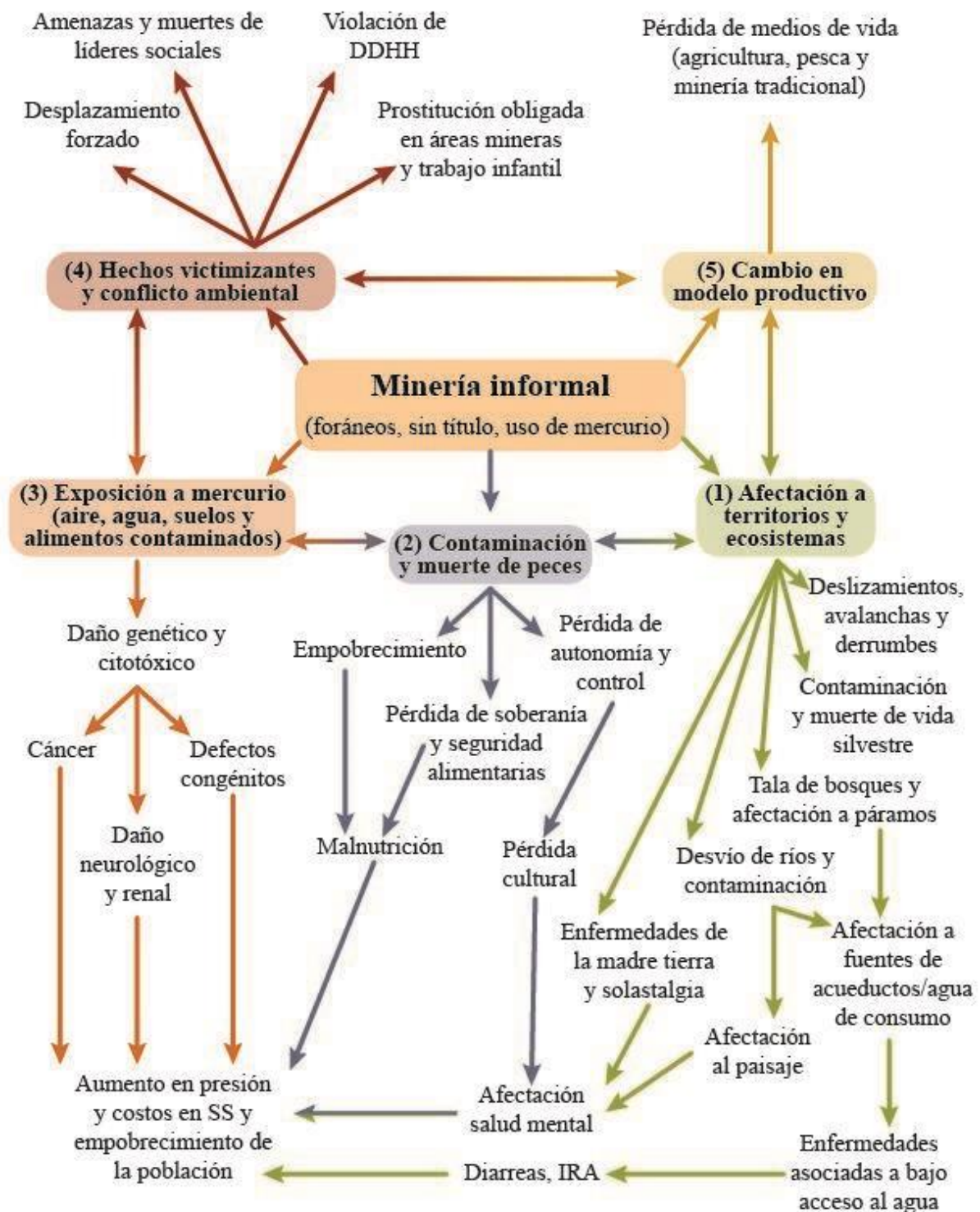


Figura 1. Efectos potenciales sobre la salud de la extracción informal de oro en diferentes dimensiones de sistemas ecológicos y sociales.

Tomado de: Fabian Méndez Paz. Panorama de los cambios socioambientales y su impacto en la salud humana en el marco del conflicto armado, Colombia (1970-2015).

1. Impacto en territorios y ecosistemas:

La minería informal debido a sus efectos en salud y los ecosistemas, se considera una forma de contaminación violenta. Este impacto se manifiesta a través de múltiples efectos, como el aumento en el riesgo de avalanchas y deslizamientos de tierra, la contaminación y pérdida de la vida silvestre, la tala de bosques y su influencia en los páramos, el desvío de ríos y la contaminación de las fuentes de agua. Además, este efecto en los ecosistemas se asocia a lo que en las comunidades ancestrales llaman la "enfermedad de la madre tierra", o en términos recientes se ha nombrado como "solastalgia," que se refiere a la sensación de pérdida y tristeza experimentada por las personas cuando observan el deterioro de su entorno natural debido a factores como la contaminación, la deforestación, la expansión no regulada de áreas urbanas o a los impactos del cambio climático.

Estos cambios en el entorno natural tienen consecuencias profundas, incluyendo la alteración del paisaje, impactos negativos en la salud mental de las comunidades afectadas y un perjuicio significativo en las fuentes de agua, lo que resulta en un aumento de las enfermedades relacionadas con la escasa disponibilidad de agua potable.

2. Contaminación y muerte de peces:

La minería informal a menudo conlleva la liberación de sustancias tóxicas, como mercurio, en cuerpos de agua cercanos. Esta contaminación tiene efectos devastadores en la fauna acuática, incluyendo la muerte de peces y otros organismos acuáticos. La pérdida de peces no solo tiene un impacto directo en la biodiversidad de los ecosistemas acuáticos, sino que también afecta gravemente a las comunidades que dependen de la pesca como fuente de alimento y sustento.

Este proceso de contaminación y disminución de la población de peces contribuye a un ciclo de efectos adversos, que incluyen el empobrecimiento de las comunidades locales, la pérdida de autonomía y control sobre sus recursos naturales, la disminución de la soberanía y seguridad alimentaria, y la erosión de la cultura local. Además, la malnutrición puede convertirse en un problema

común en estas áreas debido a la escasez de alimentos tradicionalmente obtenidos de la pesca. Este ciclo de impactos negativos también aumenta la presión sobre las comunidades afectadas, ya que se ven obligadas a buscar formas alternativas de subsistencia y enfrentar desafíos económicos y de salud.

3. *Exposición humana al mercurio (aire, agua, suelo y alimentos contaminados):*

La exposición al mercurio tiene efectos perjudiciales para la salud humana. Las personas expuestas a altos niveles de mercurio, ya sea a través del aire contaminado, el agua o alimentos contaminados, enfrentan riesgos significativos para su salud. La exposición crónica al mercurio puede causar daños genéticos y citotóxicos, lo que aumenta la probabilidad de desarrollar enfermedades graves, como cáncer, defectos congénitos, daños neurológicos y renales.

Estos efectos adversos en la salud humana, probablemente los más estudiados de todas estas 5 dimensiones, generan una presión adicional sobre los sistemas de atención médica y aumentan los costos asociados con la atención médica y el tratamiento de enfermedades relacionadas con la exposición al mercurio. Además, la población afectada enfrenta el empobrecimiento debido a la disminución de la capacidad de trabajo y la carga económica asociada a la atención médica.

4. *Hechos victimizantes y conflicto medioambiental*

Es esencial destacar los hechos victimizantes y el conflicto medioambiental que a menudo acompañan la minería informal. La minería informal puede dar lugar al desplazamiento forzoso de comunidades enteras, que se ven obligadas a abandonar sus hogares debido a la participación y control de grupos armados, la degradación ambiental, la falta de seguridad y el riesgo para su salud. Además, los líderes comunitarios y ambientales que luchan por proteger sus tierras y recursos naturales a menudo enfrentan amenazas y, en algunos casos, asesinatos, lo que resalta la peligrosidad de defender el entorno y los derechos humanos en estas zonas. Esta situación va acompañada de la violación de los derechos humanos de las comunidades afectadas, incluyendo

la falta de acceso a servicios básicos y la explotación laboral infantil. En algunos lugares mineros, también se ha documentado la prostitución forzada como una consecuencia de la minería informal.

5. *Cambio de modelo de producción:*

El cambio de modelo de producción en las áreas afectadas por la minería informal a menudo se traduce en una pérdida significativa de medios de subsistencia tradicionales, que incluyen la agricultura tradicional, la pesca y, en algunos casos, la minería tradicional. Esta pérdida de medios de subsistencia tiene un impacto negativo en las comunidades que históricamente han dependido de estas actividades para su supervivencia. La agricultura y la pesca no solo proporcionan alimentos, sino que también representan aspectos fundamentales de la cultura y la identidad de estas comunidades. La transición a la minería informal puede llevar a la dislocación económica y social, a menudo sin ofrecer alternativas sostenibles o empleo adecuado para aquellos cuyas vidas se ven afectadas.

Este enfoque a la complejidad de los efectos del mercurio en los sistemas sociales y ecológicos permite visualizar de manera integral cómo estas cinco dimensiones se entrelazan y afectan mutuamente en el contexto de la minería informal. Además, proporciona una base sólida y aplicable para comprender y abordar los desafíos particulares asociados con la práctica de la minería informal. Por tanto, esta investigación se guió por este modelo teórico, aunque abordó de manera directa sus tres primeros componentes, reconoce las dimensiones sociales de la contaminación por mercurio.

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo general

Identificar los efectos de la minería aurífera sobre el nivel de mercurio y la presencia de síntomas neurológicos en la población de las veredas La Toma y Yolombó, Cauca.

4.2. Objetivos específicos

- Describir las características demográficas, ocupacionales, y dietarias de la población de las veredas La Toma y Yolombó, Cauca.
- Valorar los síntomas y signos neurológicos relacionados con la exposición a mercurio de la población de las veredas La Toma y Yolombó, Cauca.
- Determinar los niveles de mercurio en muestras de cabello y su asociación con prácticas, dieta, y ocupación de la población de las veredas La Toma y Yolombó, Cauca.
- Establecer la asociación entre niveles de mercurio y la condición neurológica de la población de las veredas La Toma y Yolombó, Cauca.

5. METODOLOGÍA

5.1. Tipo de Estudio

El diseño más apropiado para evaluar la asociación causal entre la exposición al mercurio y los efectos en salud podría ser un estudio de cohorte prospectivo, ya que permite realizar un seguimiento de la exposición a lo largo del tiempo y evaluar la relación causal entre la exposición al mercurio debido a la minería de oro y los efectos neurológicos. Sin embargo, por razones de eficiencia y ética, este proyecto se desarrolló mediante un diseño transversal, como parte de un proyecto más grande denominado “Afectación en salud y su relación con contaminación por mercurio secundaria a exposición a minería aurífera en las veredas La Toma y Yolombó, municipio de Suárez, Cauca, en el año 2020”, en adelante denominado proyecto general. Desde una perspectiva ética, no sería apropiado implementar un estudio de cohorte prospectivo en este contexto, pues implicaría el seguimiento de personas expuestas a una sustancia potencialmente nociva sin intervenir para prevenir o mitigar dicha exposición.

Es importante reconocer que los estudios transversales presentan limitaciones para establecer causalidad debido a la dificultad para determinar la secuencia temporal

entre la exposición y el evento. No obstante, este tipo de diseño facilitó la identificación de asociaciones relevantes, sentando las bases para futuras investigaciones orientadas a explorar posibles relaciones causales. Además, su implementación requirió menos tiempo y recursos, y permitió obtener información de una muestra representativa de la población, lo que lo convirtió en una opción metodológica adecuada para los objetivos y alcances de esta investigación.

El proyecto general tuvo como objetivo valorar las condiciones ambientales y de salud de la población y su asociación con la exposición al mercurio producto de la minería de oro en el río Ovejas. Así como, fomentar la apropiación social del conocimiento generado por parte de la comunidad e las veredas La Toma y Yolombó. La investigación combinó enfoques cualitativos y cuantitativo. En la fase cualitativa, se trabajó de manera colaborativa con la comunidad y sus líderes en la construcción conjunta de la propuesta de investigación, definiendo participativamente los objetivos y alcances del proyecto. Los resultados obtenidos fueron socializados con la comunidad.

En la fase cuantitativa, se llevaron a cabo muestreos de agua y peces, que fueron analizados en laboratorio para evaluar sus características fisicoquímicas y la presencia de mercurio. Adicionalmente, se aplicó una encuesta adaptada del Global Mercury Project (80), que incluyó preguntas relacionadas con sintomatología atribuible a la exposición a mercurio. Posteriormente, se recolectaron muestras de sangre, cabello y uñas para el análisis de biomarcadores de exposición, se realizaron pruebas de laboratorio complementarias (hemoglobina, hematocrito y creatinina), y se efectuó una evaluación clínica y psicológica orientada a valorar el estado general de salud y el desarrollo cognitivo de los habitantes de La Toma y Yolombó

5.2. Área de estudio

El área estudio correspondió al corregimiento de La Toma y la vereda Yolombó, en el municipio de Suárez, departamento del Cauca. El municipio de Suarez ubicado al noroccidente del Cauca cuenta con una población de aproximadamente 33.053 habitantes para el año 2022, del cual el 81.6% se encuentra en la zona rural. La Toma se sitúa al norte del departamento del Cauca entre el río Ovejas y el río Cauca,

cercano al embalse La Salvajina; y hace parte de la zona rural de Suarez. Los habitantes en estas zonas son en gran parte afrodescendientes, quienes se encuentran en este territorio desde la época colonial. Su extensión geográfica es de alrededor de 7000 hectáreas en las que residen alrededor de 1300 familias, en quienes se reconoce como su principal actividad económica la minería artesanal de oro y en pequeña escala, actividad que se realiza en las riberas de los ríos, principalmente el río Ovejas y Cauca.

En el municipio de Suarez Cauca cerca del 57% de la población se identifica como afrodescendiente, y el 22,79% como indígena. En medio de condiciones sociales y político-administrativas de pobreza y ausencia del estado en este municipio ha habido históricamente la presencia de grupos armados ilegales, que se disputan el territorio para la siembra de cultivos ilícitos y la minería ilegal. Las viviendas presentan grandes deficiencias estructurales por ausencia de control en las obras civiles. Para el año 2020 la cobertura de acueducto fue de 60.69%, la cobertura de alcantarillado de 16,44%, el índice de riesgo de calidad del agua para consumo humano de 14,83% (riesgo medio). Para el 2021 el aseguramiento en salud fue de 59,52%. Se reporta en el año 2018 la proporción de población bajo la línea de pobreza de 14,43%; cerca de 13,10% de hogares con analfabetismo, y tasas de cobertura bruta de educación primaria, secundaria y media del 81.94, 70.99 y 47.81%, respectivamente (10).

Esta población presentó limitaciones en el acceso a servicios públicos y en la prestación de servicios de salud. Se ha demostrado la contaminación por mercurio en las diferentes fuentes hídricas que rodeaban estas dos áreas, así como una mala calidad del agua destinada al consumo humano (13,81). Por lo anterior, la población del corregimiento de La Toma y la vereda Yolombó requirió una investigación mayor para comprender mejor los efectos de la exposición al mercurio sobre la salud neurológica y el medio ambiente.

5.3. Población y muestra

En el proyecto general la población objetivo se definió como aquellas personas mayores de 5 años, de cualquier etnia y sexo, que habían residido en el área rural durante más de 6 meses. Interesó caracterizar ciertos grupos de mayor interés de

acuerdo con ciertos criterios de riesgo para la exposición y los efectos en la salud del mercurio. El presente estudio se restringió a personas adultas (edad ≥ 18 años) que cumplieron los criterios de residencia y elegibilidad.

5.4. Tamaño de muestra:

El estudio macro tomó como parámetro la prevalencia de niveles de mercurio en cabello por encima de los límites tolerables ($> 1 \mu\text{g}$) para tres grupos de interés: 1) personas mayores de 18 años con alguna actividad minera, 2) niños entre los 8 a 11 años, y 3) personas mayores de 18 años que no declaran actividad minera. Las prevalencias estimadas de acuerdo a la literatura para estas subpoblaciones son 0.69, 0.46 y 0.55, respectivamente.

Dada una limitación presupuestal para procesar un total de 150 muestras, se optó por un muestreo estratificado para los 3 grupos de subpoblación mencionados, asignando 140 participantes ($n_1 = 15$, $n_2 = 66$, $n_3 = 59$), con un nivel de confianza del 95%, y un error de estimación del 7.5%. El marco de muestreo, basado en un listado de 412 habitantes, seleccionó participantes aleatorios, excluyendo algunos según criterios de inclusión y exclusión preestablecidos.

En el estudio macro se obtuvo una muestra de 129, en la Tabla 1 se presentan las estimaciones de poder esperadas según el tamaño de muestra y las diferentes probabilidades de presentar signos neurológicos en una población expuesta crónicamente al mercurio. Se utilizó el temblor como referencia, dado que es el signo más frecuente de exposición excesiva al mercurio. Las proporciones de población expuesta y no expuesta se basaron en los estudios de Bose-O'Reilly S et al. y Corbett CE et al. (56).

Tabla 1. Estimaciones de poder

Tamaño de muestra	Proporción de casos en expuestos		
	0.15	0.20	0.25
120	0.3415	0.8483	0.9892

130	0.3928	0.8884	0.9944
140	0.4422	0.9186	0.9971
150	0.3999	0.9107	0.9971

Proporción de casos en no expuestos: 0.10

5.5. Variables y procedimientos

Se definieron como variables de exposición aquellas relacionadas con características sociodemográficas (edad, nivel socioeconómico, nivel educativo, tiempo de residencia, entre otras), las relacionadas con exposición ocupacional secundaria a la minería de oro (tiempo de trabajo, trabajo con quema de amalgama, etc.) y otras fuentes de exposición (consumo de pescado, vivienda cerca de minas o comercialización de oro, entre otras). Como variable de desenlace principal la concentración de mercurio en cabello, y como desenlace secundario la presencia de síntomas neurológicos (Tabla 2).

El trabajo de campo incluyó la aplicación de encuestas estructuradas por una médica entrenada, quien recopiló información sobre fuentes de exposición al mercurio, tipo de minería, hábitos alimenticios y fuentes de agua y alimentos. Posteriormente, se realizó una evaluación clínica detallada mediante anamnesis y examen físico completo a los adultos participantes, con el objetivo de detectar posibles signos de afectación neurológica y sistémica. Además, se tomaron muestras de cabello para analizar la presencia de mercurio (ver Anexo 1). Estas muestras fueron procesadas en el Laboratorio de Análisis Industriales de la Universidad del Valle. En los que la cantidad de cabello recolectado fue insuficiente, se realizó posteriormente una toma adicional.

Tabla 2. Tabla de Variables

Covariables				
Variable	Definición de la Variable	Tipo de Variable	Nivel operativo o categorías	Método de recolección
Edad	Edad en años cumplidos	Cuantitativa continua	Número entero	Encuesta

Sexo	Sexo biológico	Categórica dicotómica	Femenino Masculino	Encuesta
Años de Educación	Cantidad total de años que ha completado de educación formal.	Cuantitativa continua	Número entero	Encuesta
Educación	Nivel educativo aprobado	Categórica ordinal	Primaria Secundaria Técnico Universitario Posgrado Ninguno	Encuesta
Régimen de Afiliación al SGSS	Régimen de afiliación de la persona al sistema general de seguridad social en salud en Colombia	Categórica politómica	Régimen Contributivo Régimen Subsidiado Régimen Especial No asegurado	Encuesta
Estado Civil	Situación legal o personal respecto al matrimonio o unión conyugal.	Categórica politómica	Soltero Casado Unión libre	Encuesta
Tiempo de residencia	Tiempo en meses que lleva viviendo en las veredas de la Toma o Yolombó	Cuantitativa discreta	Cualquier número entero mayor o igual a 6 meses.	Encuesta

Variables de Exposición				
Variable	Definición de la Variable	Tipo de Variable	Nivel operativo o categorías	Método de recolección

Oficio actual	Actividad laboral que desempeña	Categórica politómica	Minería con Mercurio Minería sin mercurio Otras ocupaciones	Encuesta
Tiempo de trabajo	Años de trabajo en la zona minera	Cuantitativa discreta	Número en años	Encuesta
Consumo de pescado	Ingesta de pescado como parte de la dieta habitual.	Categórica nominal	Si No	Encuesta
Frecuencia de consumo de pescado	Regularidad con la que una persona ingiere pescado en su dieta habitual.	Categórica ordinal	Nunca Al menos una vez al mes Al menos una vez a la semana Al menos una vez al día	Encuesta
Vive cerca de una mina o de zona de comercialización de oro	Residencia principal del participante a una distancia no mayor de 2 kilómetros de una mina activa o de una zona de comercialización de oro.	Categórica dicotómica	Si No	Encuesta

Variables de resultado (Evento)				
Variable	Definición de la Variable	Tipo de Variable	Nivel operativo o categorías	Método de recolección
Nivel de mercurio en cabello	Cuantificación en $\mu\text{g/g}$ de niveles de mercurio medio en cabello	Cuantitativa continua	$\geq 0 \mu\text{g/g}$.	Muestra de cabello

Síntomas Neurológicos				
Temblor esencial	Movimiento involuntario de las manos u otra parte del cuerpo	Categórica dicotómica	Si No	Encuesta
Alteración de la memoria	Disminución en la capacidad de retención y recuperación de información, evaluada mediante el test de dígitos directos e inversos.	Categórica dicotómica	Si No	Valoración médica.
Marcha atáxica	Alteración en la coordinación del movimiento al caminar, caracterizada por pasos inestables y falta de equilibrio.	Categórica dicotómica	Si No	Valoración médica.
Entumecimiento	Sensación reducida o ausencia de sensibilidad en una zona del cuerpo.	Categórica dicotómica	Si No	Encuesta
Rigidez en la marcha	Dificultad para iniciar o mantener un patrón fluido de movimiento al caminar, con sensación de rigidez en extremidades.	Categórica dicotómica	Si No	Valoración médica.
Disdiadococinesia	Dificultad para realizar movimientos alternados rápidos,	Categórica dicotómica	Si No	Encuesta

Temblores en párpados	Movimientos involuntarios y rápidos de los párpados	Categórica dicotómica	Si No	Encuesta
Temblores intencionales	Movimientos temblorosos que aumentan al intentar ejecutar una acción dirigida	Categórica dicotómica	Si No	Encuesta
Temblores dedo-nariz	Alteración en la estabilidad del movimiento al intentar tocar la nariz con el dedo.	Categórica dicotómica	Si No	Valoración médica.
Dismetria dedo-nariz	Incapacidad para alcanzar con precisión un objetivo, como tocar la nariz con el dedo	Categórica dicotómica	Si No	Valoración médica.
Reflejo mentolabial	Contracción involuntaria del labio inferior al estimular la barbilla	Categórica dicotómica	Si No	Valoración médica.
Reflejo Babinski	Extensión anómala del dedo gordo del pie tras la estimulación de la planta.	Categórica dicotómica	Si No	Valoración médica.
Reflejo Hoffmann	Flexión involuntaria del pulgar y los dedos tras la estimulación del dedo medio	Categórica dicotómica	Si No	Valoración médica.
Alteraciones sensoriales	Cambios en la percepción sensorial, como hipoestesia,	Categórica dicotómica	Si No	Encuesta

	hiperalgesia o parestesias			
--	-------------------------------	--	--	--

5.6. Análisis estadístico

Inicialmente, se llevó a cabo un análisis exploratorio de los datos con el objetivo de evaluar la calidad de la información y seleccionar los métodos estadísticos más adecuados. Como parte de la caracterización de la población de estudio, se calcularon medidas descriptivas adaptadas a la naturaleza de las variables analizadas. Las variables cuantitativas fueron analizadas mediante la prueba de Kolmogórov-Smirnov para determinar la normalidad de su distribución. Aquellas con distribución normal se resumieron utilizando la media y la desviación estándar (DE), mientras que las que no seguían una distribución normal se describieron mediante la mediana y los rangos intercuartílicos (RIC). Por su parte, las variables categóricas se expresaron en frecuencias absolutas y relativas.

Con base en la literatura, se estableció un punto de corte de 1 µg/g en la medición de mercurio en cabello, permitiendo la clasificación de los participantes en dos grupos de exposición (82–84). Para analizar la asociación entre las variables de exposición y los niveles de mercurio en cabello, se estimaron razones de prevalencia (RP) con sus respectivos intervalos de confianza al 95% (IC 95%) utilizando un modelo de regresión de Poisson con varianza robusta. Esta modelación ha demostrado ser la estrategia de estimación más adecuada computacionalmente (85–87).

Inicialmente, se llevó a cabo un análisis crudo para evaluar la relación univariada entre cada variable independiente y la presencia de mercurio en cabello en concentraciones superiores a 1 µg/g. Posteriormente, se ajustó el modelo para controlar posibles factores de confusión, incorporando variables como edad, sexo y otras relacionadas con la exposición, de acuerdo con la literatura y criterios epidemiológicos. La evaluación de la confusión se llevó a cabo mediante la comparación de los valores ajustados y crudos, considerando un cambio del 10% como criterio para la identificación de confusión substancial. Asimismo, se exploró la modificación del

efecto mediante la inclusión de términos de interacción entre las exposiciones de interés.

La condición neurológica se evaluó a partir de la presencia de signos y síntomas identificados en la anamnesis y el examen físico. Estas variables del examen físico fueron caracterizadas en categorías dicotómicas (presencia/ausencia). Posteriormente, se exploró su asociación con los niveles de mercurio en cabello. Para ello, se estimaron razones de prevalencia con IC 95% mediante modelos de regresión de Poisson con varianza robusta, tanto en análisis crudos como ajustados. Para este análisis multivariado también se ajustó por edad, sexo y escolaridad, con el fin de controlar posibles factores de confusión.

Para todos los análisis estadísticos, se estableció un nivel de confianza del **95%** y un criterio de significancia estadística de **0.05**. No obstante, siguiendo recomendaciones de Hosmer y Lemeshow (88), algunos resultados en los modelos de regresión múltiple consideraron valores de significancia valores <0.1 y <0.2 como sugestivos de asociación. Los procedimientos estadísticos fueron realizados utilizando el software Stata 17.1® (Stata Corp, College Station, Texas, USA).

6. CONSIDERACIONES ÉTICAS

Esta investigación está basada y apoyada en una exhaustiva revisión de la literatura científica y fuentes de información relevantes. Sigue las pautas éticas internacionales para la investigación relacionada con la salud con seres humanos elaboradas por el Consejo de Organizaciones Internacionales de las Ciencias Médicas (CIOMS) en colaboración con la Organización Mundial de la Salud (OMS) en 2016 (74).

El presente trabajo de grado utilizó como fuente de información la base de datos del proyecto de investigación “Afectación en salud y su relación con contaminación por mercurio secundaria a exposición a minería aurífera en las veredas La Toma y Yolombó, municipio de Suarez, Cauca, en el año 2020” desarrollado por un equipo interdisciplinario de investigadores de la Universidad del Valle incluyendo el grupo de Epidemiología y Salud Poblacional. Tanto el proyecto general como este estudio

específico en salud contaron con la aprobación del comité de ética de la Universidad del Valle. El proyecto general desarrolló procesos para la participación voluntaria de las personas, incluyendo la obtención de consentimiento informado que detallaba los riesgos, beneficios y procedimientos a realizar. Este consentimiento informado incluyó la autorización del uso de los datos en investigaciones posteriores relacionadas con los objetivos del proyecto.

Los riesgos asociados con esta investigación fueron evaluados, identificando la potencial pérdida de privacidad y confidencialidad, en relación con la seguridad y almacenamiento de los datos. En consecuencia, se mantuvo la codificación asignada en el proyecto general, se emplearon los datos de acuerdo con los propósitos del presente estudio y no se solicitó información que permitiera la identificación de los participantes. Solo los miembros autorizados del equipo investigador con previa capacitación tuvieron acceso a la base de datos. Considerando los riesgos mencionados, se clasificó este proyecto como de "Riesgo Mínimo".

7. RESULTADOS

En la población estudiada (n=129), un poco más de la mitad fueron mujeres (51.94%) y la mediana de edad fue de 42 años. Más del 60% tenía entre 30 y 59 años, y el nivel educativo predominante fue la secundaria (53.49%). La mayoría de los participantes estaban afiliados al régimen subsidiado de salud (75.78%) y en unión libre o casados (71.32%).

7.1 Niveles de mercurio:

Se analizó el nivel de mercurio en cabello para evaluar la exposición acumulada en los últimos seis meses. No se obtuvo resultado en 14 casos debido a cabello demasiado corto o muestras insuficientes, reduciendo el total de mediciones a 115. Los niveles de mercurio en cabello presentaron una media de 0.76 µg/g (DE 1.85) y una mediana de 0.37 µg/g (RIC 0.26 – 0.57), un 5% de la población registró valores superiores a 2.16 µg/g, con niveles máximos de 14.01 µg/g, 13.98 µg/g, 3.33 µg/g y

3.02 $\mu\text{g/g}$. En la Figura 2, se presentan estos valores distribuidos en una escala logarítmica, con una línea de referencia en 1 $\mu\text{g/g}$.

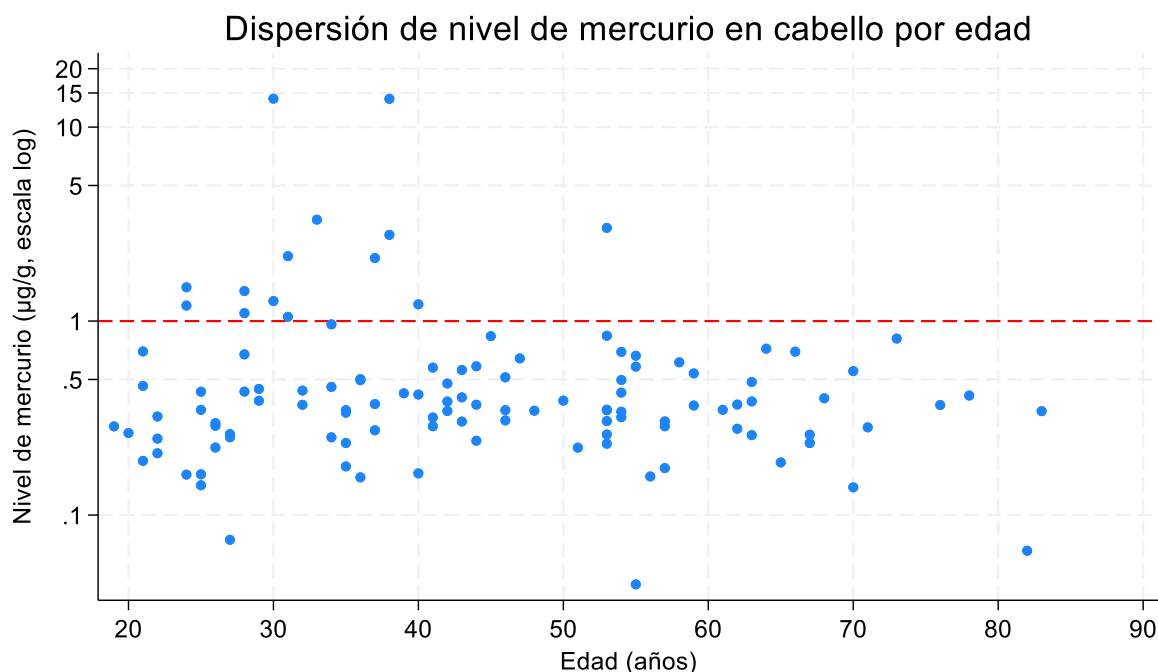


Figura 2. Distribución de niveles de mercurio en cabello según edad.

Nota: El eje Y se presenta en escala logarítmica para facilitar la visualización de la dispersión de los datos; sin embargo, los puntos corresponden a las concentraciones absolutas de mercurio en cabello ($\mu\text{g/g}$).

7.2. Niveles de mercurio y características sociodemográficas

Se observó que las personas con niveles de mercurio mayor a 1 $\mu\text{g/g}$ presentaron mayor proporción de escolaridad en nivel de secundaria (78.57%) y de afiliación al régimen subsidiado de salud (100%) (Tabla 3).

En la población de estudio, el nivel de mercurio en cabello mostró una mediana de 0,37 $\mu\text{g/g}$ (RIC: 0,26 – 0,58). En mineros expuestos a mercurio, la mediana fue 0,54 $\mu\text{g/g}$ (RIC: 0,29 – 1,20) y el promedio 1,54 $\mu\text{g/g}$, con valores máximos hasta 14 $\mu\text{g/g}$. Los mineros sin uso de mercurio presentaron una mediana de 0,30 $\mu\text{g/g}$ (RIC: 0,17 – 0,44), mientras que en otras ocupaciones la mediana fue 0,35 $\mu\text{g/g}$ (RIC: 0,14 – 0,46). Se observó mayor dispersión en los niveles de mercurio en cabello en participantes con consumo diario de pescado (mediana 0,71 $\mu\text{g/g}$; RIC: 0,32 – 7,49), comparado

con consumo semanal (0,36 µg/g; RIC: 0,26 – 0,50), mensual (0,35 µg/g; RIC: 0,25 – 0,58) o sin consumo (0,51 µg/g; RIC: 0,43 – 0,84).

Tabla 3. Características sociodemográficas de la población estudiada según concentración de mercurio en cabello.

Variables Sociodemográficas	Total (n=129)	Concentración de Mercurio en Cabello	
		Menor a 1 µg/g (n=101)	Mayor a 1 µg/g (n=14)
Sexo, n (%)			
Masculino	62 (48.06)	43 (42.57)	8 (57.14)
Femenino	67 (51.94)	58 (57.43)	6 (42.86)
Edad (años), mediana (RIC)	42 (31 - 55)	44 (34 - 57)	31 (28 - 38)
Categoría edad, n (%)			
< 30 años	29 (22.48)	23 (22.77)	4 (28.57)
30 a 59 años	78 (60.47)	58 (57.43)	10 (71.43)
> 60 años	22 (17.05)	20 (19.80)	0 (0.00)
Años de educación, mediana (RIC)	7 (3 - 11)	7 (3 - 11)	10.5 (6 - 11)
Escolaridad, n (%)			
Sin escolaridad	2 (1.55)	2 (1.98)	0 (0.00)
Primaria	50 (38.76)	40 (39.60)	2 (14.29)
Secundaria	69 (53.49)	53 (52.48)	11 (78.57)
Técnico	5 (3.88)	3 (2.97)	1 (7.14)
Universitario	3 (2.33)	3 (2.97)	0 (0.00)
Afiliación al sistema de salud, n (%)			
Subsidiado	97 (75.78)	74 (73.27)	14 (100)
Contributivo o Especial	19 (18.84)	18 (17.82)	0 (0.00)
No afiliado	12 (9.38)	8 (7.92)	0 (0.00)
Estado civil, n (%)			
Soltero	37 (28.68)	31 (30.69)	3 (21.43)
Casado / Unión Libre	92 (71.32)	70 (69.31)	11 (78.57)

Es interesante destacar la diferencia en la distribución por sexo de acuerdo al uso de mercurio en la minería del oro. Específicamente, se encontró que casi tres de cada 4 personas que reportaron dedicarse a la minería con mercurio eran hombres (71,4%). En contraste, en la minería sin mercurio se evidenció una mayor participación de mujeres (64,2%) (Tabla 4).

Tabla 4. Distribución del oficio actual según sexo.

Oficio actual	Masculino (n=62)	Femenino (n=67)
Minería con mercurio, n (%)	30 (71.43)	12 (28.57)
Minería sin mercurio , n (%)	19 (35.85)	34 (64.15)
Otras ocupaciones, n (%)	13 (38.24)	21 (61.76)

7.3. Niveles de mercurio y factores de exposición

En relación con los factores de exposición, el 41.09% de la población se dedicaba a la minería sin mercurio, el 32.56% a la minería con mercurio y el 26.36% tenía otras ocupaciones. Se observó que la mayoría de los participantes con niveles de mercurio en cabello superiores a 1 µg/g se dedicaban a la minería con uso de mercurio (78.57%). Las ocupaciones sin relación con mercurio fueron más frecuentes entre quienes presentaron concentraciones bajas. La exposición a amalgamas (mezcla de mercurio metálico con partículas de oro u otros metales) fue similar entre ambos grupos, aunque levemente mayor entre quienes tenían niveles más altos de mercurio (35.71% vs. 32.67%). Esta exposición se reportó tanto por participación directa en actividades mineras, como por uso cotidiano o por haber recibido amalgamas como obsequio. Asimismo, los individuos con concentraciones elevadas de mercurio en cabello presentaron un mayor tiempo de exposición indirecta al mercurio (mediana: 150 meses, RIC: 120-180), en comparación con el grupo de menores concentraciones (mediana: 54 meses, RIC: 12-108) (Tabla 5).

Tabla 5. Características de exposición al mercurio según concentración de mercurio en cabello.

Variables de Exposición	Total (n=129)	Concentración de Mercurio en Cabello	
		Menor a 1 µg/g (n=101)	Mayor a 1 µg/g (n=14)
Oficio actual			
Minería sin mercurio	53 (41.09)	46 (45.54)	1 (7.14)
Minería con mercurio	42 (32.56)	26 (25.74)	11 (78.57)
Otras ocupaciones	34 (26.36)	29 (28.71)	2 (14.29)
Uso de amalgama			
No	87 (67.97)	68 (67.33)	8 (57.14)
Si	41 (32.03)	33 (32.67)	5 (35.71)
Ubicación de la vivienda			
Lejos	70 (54.26)	57 (56.44)	8 (57.14)
Cerca	59 (45.74)	44 (43.56)	6 (42.86)
Consumo de pescado			
No	11 (8.53)	8 (7.92)	2 (14.29)
Si	118 (91.47)	93 (92.08)	12 (85.71)
Frecuencia de consumo de pescado			
Nunca	11 (8.53)	8 (7.92)	2 (14.29)
1 vez al mes	43 (33.33)	34 (33.66)	5 (35.71)
1 vez a la semana	69 (53.49)	56 (55.45)	6 (42.86)
1 vez al día	6 (4.65)	3 (2.97)	1 (7.14)
Tiempo de exposición directa (meses), mediana (RIC) n=45	8 (2.7 - 24)	4.6 (1.6 - 28.8)	8 (7.2 - 16)
Tiempo de exposición indirecta (meses), mediana (RIC) n=25	60 (12 - 120)	54 (12 -108)	150 (120 - 180)

7.4. Niveles de mercurio, signos y síntomas

En la evaluación de los signos neurológicos según la concentración de mercurio en cabello, se observó que los más frecuentes fueron temblor en el párpado (73.64%), disdiadococinesia (65.89%) y rigidez en la marcha (51.94%). La disdiadococinesia fue más frecuente en el grupo con menor exposición (69,3% vs. 28,6%). En contraste, el puntaje alterado de memoria fue más común en el grupo con mayor concentración de mercurio (57,1% vs. 40,6%). Otros síntomas como el temblor esencial, temblor en párpado, rigidez en la marcha y marcha atáxica mostraron proporciones similares entre los grupos (tabla 6).

Tabla 6. Signos y síntomas neurológicos y concentración de mercurio en cabello.

Signos y síntomas	Total (n=129)	Concentración de Mercurio en Cabello	
		Menor a 1 µg/g (n=101)	Mayor a 1 µg/g (n=14)
Entumecimiento*			
No	76 (58.91)	59 (58.42)	10 (71.43)
Si	52 (40.31)	41 (40.59)	4 (28.57)
Temblor esencial			
No	109 (84.50)	84 (83.71)	12 (85.71)
Si	20 (15.50)	17 (16.83)	2 (14.29)
Rigidez en la marcha*			
No	60 (46.51)	47 (46.53)	7 (50.00)
Si	67 (51.94)	52 (51.49)	7 (50.00)
Marcha atáxica*			
No	87 (67.44)	67 (66.34)	9 (64.29)
Si	40 (31.01)	32 (31.68)	5 (35.71)
Disdiadococinesia*			
No	41 (31.78)	28 (27.72)	10 (71.43)
Si	85 (65.89)	70 (69.31)	4 (28.57)
Temblor en parpado			
No	34 (26.36)	26 (25.74)	4 (28.57)
Si	95 (73.64)	75 (74.26)	10 (71.43)
Temblor intensional			

No	109 (84.50)	85 (84.16)	12 (85.71)
Si	20 (15.50)	16 (15.84)	2 (14.29)
Temblor dedo-nariz*			
No	63 (48.84)	49 (48.51)	8 (57.14)
Si	65 (50.39)	51 (50.50)	6 (42.86)
Dismetría dedo-nariz			
No	102 (79.97)	78 (77.23)	12 (85.71)
Si	8 (6.20)	7 (6.93)	0 (0.00)
Reflejo mentolabial*			
No	125 (96.90)	97 (96.04)	14 (100)
Si	0 (0.00)	0 (0.00)	0 (0.00)
Reflejo de Babinski*			
No	125 (96.90)	97 (96.04)	14 (100)
Si	0 (0.00)	0 (0.00)	0 (0.00)
Reflejo de Hoffmann*			
No	121 (93.80)	93 (92.08)	14 (100)
Si	3 (2.33)	3 (2.97)	0 (0.00)
Alteraciones sensoriales*			
No	123 (95.35)	97 (96.04)	12 (85.71)
Si	3 (2.33)	2 (1.98)	1 (7.14)
Prueba de memoria*			
Conservada	75 (58.14)	59 (59.42)	6 (42.86)
Alterada	53 (41.09)	41 (40.59)	8 (57.14)

* Los porcentajes se calcularon con base en el total de cada grupo (n=129, n=101 y n=14). Algunas variables tienen datos perdidos, por lo que las sumas pueden no coincidir con el total.

7.5 Análisis de asociación con nivel de mercurio elevado

En el análisis bivariado, se encontró una asociación significativa entre la edad y la concentración elevada de mercurio en cabello. Los participantes menores de 40 años presentaron una mayor prevalencia de niveles de mercurio ≥ 1 $\mu\text{g/g}$ en comparación con los mayores de 40 años (RP: 0.13; IC 95%: 0.03–0.55; $p=0.006$), asociación que se mantuvo en el modelo ajustado (RP: 0.07; IC 95%: 0.02–0.19; $p<0.001$). La minería

con mercurio se asoció significativamente con niveles de mercurio ≥ 1 $\mu\text{g/g}$ tanto en el análisis crudo (RP: 13.97; IC 95%: 1.87–104.29; $p=0.010$) como en el ajustado (RP: 25.10; IC 95%: 3.03–208.00; $p=0.003$). El sexo masculino no mostró una asociación significativa en el análisis crudo (RP: 1.67; IC 95%: 0.62–4.53; $p=0.312$), pero en el modelo ajustado se observó una tendencia a menor prevalencia de mercurio elevado entre los hombres (RP: 0.39; IC 95%: 0.15–1.04; $p=0.061$). Las variables de escolaridad, frecuencia de consumo de pescado y tiempo de exposición indirecta no presentaron asociaciones significativas en los modelos ajustados (Tabla 7). Aunque en la muestra el consumo diario de pescado no fue muy frecuente, ese subgrupo fue el único que en el análisis de regresión simple y ajustado presentó RP mayores que 1, sugiriendo un potencial efecto en los niveles de mercurio por el consumo alto de pescado.

Tabla 7. Razones de prevalencia de niveles de mercurio en cabello según variables sociodemográficas y de exposición.

Variable	Menor a 1 µg/g n=101	Mayor a 1 µg/g n=14	Crudo		Ajustado	
			RP	IC (valor de p)	RP	IC (valor de p)
Sociodemográficos						
Sexo						
Femenino, n (%)		6 (42.86)	1		1	
Masculino, n (%)	43 (42.57)	8 (57.14)	1.67	0.62 - 4.53 (0.312)	0.69	0.13 – 1.01 (0.053)
Edad						
< 40 años	38 (37.62)	12 (85.71)	1		1	
> 40 años	63 (62.38)	2 (14.29)	0.13	0.03 – 0.55 (0.006)	0.07	0.03 – 0.21 (0.000)
Escolaridad						
Técnico / Universitario	6 (5.94)	1 (7.14)	1		1	
Secundaria	53 (52.48)	11 (78.57)	1.20	0.18 – 8.05 (0.849)	0.58	0.06 – 5.32 (0.942)
Sin escolaridad / Primaria	42 (41.58)	2 (14.29)	0.32	0.03 – 3.10 (0.324)	1.10	0.07 – 17.78 (0.635)
Exposición						
Oficio actual						
Minería sin mercurio	46 (86.79)	1 (1.89)	1		1	
Minería con mercurio	26 (61.90)	11 (26.19)	13.97	1.87 - 104.29 (0.010)	26.66	2.96 – 240.42 (0.003)
Otras ocupaciones	29 (85.29)	2 (5.88)	3.03	0.28 - 32.36 (0.358)	2.90	0.36 – 23.50 (0.318)
Frecuencia de consumo de pescado						
Nunca	11 (8.53)	8 (7.92)	1		1	
1 vez al mes	43 (33.33)	34 (33.66)	0.64	0.14 – 2.85 (0.559)	1.35	0.31 – 5.83 (0.685)
1 vez a la semana	69 (53.49)	56 (55.45)	0.48	0.11 – 2.08 (0.330)	0.80	0.19 – 3.35 (0.767)
1 vez al día	6 (4.65)	3 (2.97)	1.25	0.15 – 10.32 (0.836)	1.69	0.28 – 10.15 (0.566)

Tiempo de exposición indirecta (meses)	54 (12 - 108)	150 (120 - 180)	1.01	1.00 - 1.02 (0.019)	0.96	0.88 – 1.04 (0.292)
--	---------------	-----------------	------	----------------------------	------	---------------------

RP: Razón de prevalencia. IC: Intervalo de confianza del 95%. Las razones de prevalencia ajustadas provienen de un modelo de regresión de Poisson con varianza robusta. Categorías de referencia: Sexo (Femenino), Edad (<40 años), Escolaridad (Técnico / Universitario), Oficio (Minería sin mercurio), Frecuencia de consumo de pescado (Nunca).

Adicionalmente, se exploró la posibilidad de confusión o modificación del efecto entre la frecuencia de consumo de pescado y la ocupación. Al realizar una regresión múltiple entre los niveles de mercurio en cabello (<1 µg/g o ≥1 µg/g) y la frecuencia de consumo de pescado, ajustando por la ocupación, aunque no se encontraron asociaciones estadísticamente significativas, se evidenciaron cambios en las estimaciones. Por ejemplo, quienes consumían pescado diariamente presentaron una RP de 2.05 (IC95%: 0.43–9.77; p = 0.368), independiente del tipo de oficio, lo que sugiere una posible tendencia al aumento del riesgo. Al examinar los resultados por subgrupos, se observó que entre las personas que trabajan en minería con uso de mercurio, el consumo diario de pescado se asoció con una mayor prevalencia de niveles elevados de mercurio (RP = 5.00; IC95%: 0.86–29.08; p = 0.073) lo que sugiere una modificación del efecto.

Tabla 8. Razones de Prevalencia de signos y síntomas neurológicos según niveles de mercurio.

Síntomas neurológicos	Menor a 1 µg/g n=101	Mayor a 1 µg/g n=14	Crudo		Ajustado	
			RP	IC (valor de p)	RP	IC (valor de p)
Entumecimiento						
No	76 (58.91)	59 (58.42)	1		1	
Si	52 (40.31)	41 (40.59)	0.79	0.29 – 1.65 (0.413)	1.18	0.49 – 2.79 (0.703)
Marcha Atáxica						
No	67 (66.34)	9 (64.29)	1		1	
Si	32 (31.68)	5 (35.71)	1.10	0.51 – 2.37 (0.797)	1.05	0.47 – 2.32 (0.903)
Disdiadococinesia						
No	41 (31.78)	28 (27.72)	1		1	
Si	85 (65.89)	70 (69.31)	0.4	0.17 – 0.93 (0.033)	0.48	0.20 – 1.12 (0.090)
Temblores dedo-nariz						
No	63 (48.84)	49 (48.51)	1		1	
Si	65 (50.39)	51 (50.50)	0.84	0.44 – 1.59 (0.593)	0.96	0.50 – 1.84 (0.902)
Prueba de memoria						
Conservada	59 (59.42)	6 (42.86)	1		1	
Alterada	41 (40.59)	8 (57.14)	1.39	0.83 – 2.33 (0.205)	1.23	0.73 – 2.08 (0.439)

RP: Razón de prevalencia. IC: Intervalo de confianza del 95%. RP ajustado por edad, sexo y nivel educativo. Variable de exposición: mercurio en cabello ≥ 1 $\mu\text{g/g}$ vs <1 $\mu\text{g/g}$.

Se realizó un análisis para todos los síntomas neurológicos registrados, con el objetivo de identificar posibles asociaciones con los niveles de mercurio en cabello. Posteriormente, se ajustaron modelos de regresión por edad, sexo y escolaridad para controlar posibles factores de confusión. En el análisis bivariado se encontró una asociación significativa entre niveles elevados de mercurio y menor frecuencia de disdiadococinesia (RP: 0,40; IC95%: 0,17–0,93; $p=0,033$), aunque esta asociación disminuyó significancia en el análisis multivariado (RP: 0,48; IC95%: 0,20–1,12; $p=0,090$). Al analizar la edad de los participantes con este signo neurológico, se observó que tenían una media de 47.2 años, considerablemente mayor que la de quienes no lo presentaban (36.3 años). Para los demás signos y síntomas evaluados, no se observaron asociaciones estadísticamente significativas en ninguno de los modelos. En la tabla 8 se presentan algunos signos y síntomas neurológicos seleccionados con base en su relevancia teórica.

En la figura de cajas se observa la distribución de los niveles de mercurio en cabello según el estado de la memoria. Aunque los niveles medianos de mercurio son similares entre quienes presentaron memoria conservada y aquellos con memoria alterada (mediana 0.37 RIC 0.27 – 0.57 vs mediana 0.35 RIC 0.26 – 0.55), se evidencia una mayor dispersión en el grupo con alteración de la memoria, con presencia de valores atípicos más elevados (Figura 3). En este grupo, el 10% de los participantes registró niveles de mercurio superiores a 2.16 $\mu\text{g/g}$, y se encontraron los valores más elevados en la muestra: 14.01 $\mu\text{g/g}$, 13.98 $\mu\text{g/g}$, 3.33 $\mu\text{g/g}$, y 3.02 $\mu\text{g/g}$. Cabe destacar que las personas con estos valores tenían como ocupación actual la minería con uso de mercurio

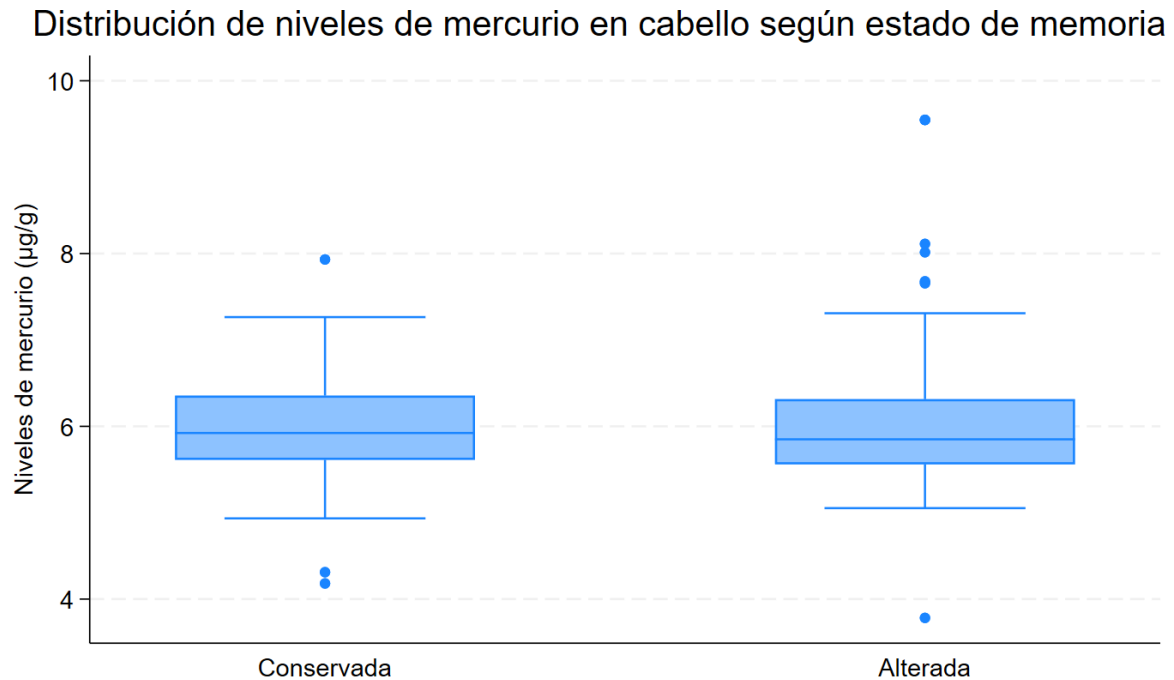


Figura 3. Distribución de niveles de mercurio en cabello según alteración de la memoria.

8. DISCUSIÓN

Hallazgos principales

En esta investigación, se identificó que los niveles más elevados de mercurio en cabello se presentaron principalmente en personas dedicadas a la minería con uso de mercurio, en su mayoría hombres jóvenes, afiliados al régimen subsidiado de salud y con nivel educativo secundario. Aunque en esta población la mediana general de mercurio fue baja ($0,37 \mu\text{g/g}$), se observaron valores considerablemente más altos en este grupo ocupacional (hasta $14 \mu\text{g/g}$), así como una mayor duración de exposición indirecta al metal. A pesar de que algunos signos y síntomas neurológicos, como el temblor en párpado y la rigidez en la marcha, fueron frecuentes en la población general, solo el puntaje alterado de memoria mostró mayor prevalencia en el grupo con mayores concentraciones de mercurio. La tendencia observada a una menor ocurrencia de disdiacocinesia en las personas con mayor nivel de mercurio es paradójica. No obstante, por un lado, es posible una situación de causalidad reversa, esto es que la aparición de algunos de estos síntomas neurológicos origine la suspensión de actividades de exposición al mercurio. De otra parte, podría ser posible

que los síntomas aparezcan luego de exposiciones prolongadas a bajas concentraciones cuando la exposición por actividad de minería ya ha sido suspendida, como en los adultos mayores. Además, tanto la minería con mercurio como la edad menor de 40 años se asociaron significativamente con niveles elevados del metal en cabello, incluso tras ajustar por posibles factores de confusión.

Comparación con otros estudios

En nuestro estudio se observó una asociación significativa entre la edad y los niveles de mercurio en cabello, siendo los adultos más jóvenes quienes presentaron las concentraciones más elevadas. Al contrastar estos hallazgos con el estudio de Pamphlett (2021), se observa una tendencia distinta: la prevalencia de mercurio inorgánico en órganos humanos, como el cerebro, riñón y páncreas, aumenta con la edad, pero disminuye en personas mayores de 80 años (89). Este hallazgo sugiere una acumulación progresiva de mercurio durante la vida, aunque en las personas muy longevas la presencia de mercurio es menor, posiblemente porque los que sobreviven podrían haber tenido exposiciones más bajas o una mejor capacidad para eliminar el metal. En nuestra población minera, los adultos jóvenes podrían estar más expuestos actualmente por su participación en actividades relacionadas con el mercurio, lo cual podría explicar los niveles más altos encontrados en este grupo etario.

Nuestros hallazgos son consistentes con lo reportado por Barbieri et al. (2009) en Cachuela Esperanza, Bolivia, donde los mineros presentaron niveles significativamente más altos de mercurio en cabello (media: 5.75 µg/g; IC 95%: 4.09–8.08) en comparación con personas con trabajos sedentarios (2.77 µg/g) o con ocupaciones diversas (4.15 µg/g), reforzando la relevancia de la exposición ocupacional como un factor determinante en la acumulación de mercurio (90). En contraste, en el estudio realizado en mineros de Guayana Francesa, la mediana de mercurio en cabello fue de 4.5 µg/g y el 46.7 % de los participantes presentó concentraciones superiores a 5 µg/g (91). En nuestra población expuesta a minería con uso de mercurio, la mediana fue de 0,54 µg/g y el promedio de 1,54 µg/g. Aunque se observaron valores individuales altos (percentil 95:13,97 µg/g), la mayoría de los participantes tuvo concentraciones por debajo del umbral de 5 µg/g. Estas diferencias

podrían explicarse por factores como la intensidad del uso de mercurio, las prácticas de seguridad, el consumo de pescado contaminado y las condiciones sociolaborales. Por otra parte, en nuestro estudio, el sexo masculino no mostró una asociación significativa en el análisis crudo (RP: 1.67; IC 95%: 0.62–4.53; $p=0.312$). Sin embargo, en el modelo ajustado se observó una tendencia a menor prevalencia de niveles elevados de mercurio entre los hombres (RP: 0.39; IC 95%: 0.15–1.04; $p=0.061$). Esto sugiere que la ocupación minera con uso de mercurio, presente en una gran parte de la población masculina, es el verdadero determinante de la carga corporal del metal, más allá del sexo biológico.

Nuestros hallazgos indican que la minería sin mercurio presenta una mayor participación femenina. En la fase cualitativa del estudio general, se observó que la minería tradicional sin mercurio ha sido para muchas mujeres un espacio de sustento económico, autonomía, preservación cultural y redes de solidaridad. Además, las mujeres perciben el mercurio como un riesgo para la salud y evitan su manipulación directa. Sin embargo, factores como la contaminación por mercurio, la escasez de oro y la presión laboral han limitado su participación, llevándolas a migrar o asumir roles secundarios en la minería de oro, donde las decisiones sobre el uso del mercurio son tomadas por hombres (92). Estos hallazgos reflejan la persistencia de desigualdades de género en el acceso, control y gestión de la minería.

Aunque no se identificó una asociación estadísticamente significativa entre la frecuencia de consumo de pescado y los niveles de mercurio en cabello, en línea con lo reportado en otros estudios (93), se observó una tendencia a mayor riesgo en quienes reportaron ingestas muy frecuentes. Por otro lado, otras investigaciones han identificado una relación positiva entre el consumo regular de pescado y los niveles de mercurio, considerándolo como la segunda fuente de exposición más relevante después de la ocupacional (91,94). Si bien en nuestra población no se puede confirmar que el pescado sea la principal fuente de exposición al mercurio, tampoco se puede descartar que un consumo elevado influya en ciertos subgrupos. Los análisis por subgrupos revelaron que, entre las personas que trabajan en minería con uso de mercurio, el consumo diario de pescado se asoció con una mayor prevalencia de niveles elevados de mercurio, lo que sugiere una posible sinergia entre ambas fuentes de exposición, aumentando el riesgo de acumulación de mercurio en el

organismo. Por ello, se recomienda orientar y educar a la comunidad sobre la importancia de un consumo moderado, evitando ingestas diarias, especialmente en contextos donde pueden coexistir fuentes ocupacionales de exposición al mercurio.

En concordancia con otros estudios, si bien se observó una frecuencia ligeramente mayor de alteraciones neurológicas en la población con niveles más elevados de mercurio, no se encontró una asociación estadísticamente significativa entre estos síntomas y los niveles de mercurio en cabello, tras ajustar por edad, sexo y nivel educativo (93). Este hallazgo difiere de lo descrito por Bose-O'Reilly et al. (2017), quienes señalaron que los síntomas característicos de la intoxicación crónica por mercurio metálico incluyen temblores, ataxia, dificultades en la coordinación motora, hipersalivación y la percepción de un sabor metálico. En el estudio de Bose-O'Reilly et al. (2017) los participantes pertenecientes a los grupos expuestos obtuvieron resultados significativamente inferiores en diversas pruebas neuropsicológicas en comparación con el grupo de control (95). Igualmente otros estudios han evidenciado el impacto de la exposición al mercurio en las funciones cognitivas y motoras (58,96).

La ausencia de asociación en nuestra población podría explicarse por la naturaleza transversal del estudio, lo que limita la inferencia causal, así como por posibles sesgos en el autorreporte y la coexistencia de otras condiciones no medidas. No obstante, estos hallazgos no descartan la posibilidad de efectos neurológicos subclínicos, por lo que se recomienda mantener una vigilancia epidemiológica continua para detectar posibles impactos a largo plazo. Un aspecto clave en este análisis es la causalidad reversa, un fenómeno en el que la relación entre la exposición al mercurio y los efectos neurológicos podría interpretarse incorrectamente (97,98). Es decir, las personas con síntomas neurológicos pueden haber modificado sus hábitos de exposición antes de la medición, lo que genera una percepción sesgada de los niveles reales de toxicidad. En este sentido, es posible que quienes presentan afectaciones neurológicas hayan reducido su contacto con fuentes de mercurio debido a manifestaciones clínicas graves, dando lugar a niveles medidos que están por debajo del umbral de toxicidad, aunque el daño neurológico ya sea irreversible.

Además de generar evidencia sobre la exposición al mercurio y sus posibles efectos neurológicos, el proyecto macro permitió implementar talleres participativos para

compartir resultados, educar sobre los riesgos del mercurio y fomentar prácticas de protección. Estas estrategias son fundamentales en contextos de exposición ambiental, ya que fortalecen la vigilancia en salud pública y promueven la apropiación social del conocimiento, elementos clave para una intervención efectiva (99,100). Se ha resaltado la importancia de incluir acciones educativas y de concienciación comunitaria como parte integral de las respuestas sanitarias para mejorar la salud y bienestar de las poblaciones, especialmente en América Latina (101). En este sentido, el estudio no solo aportó información científica, sino que también facilitó procesos de empoderamiento comunitario y articulación con actores locales para una gestión más integral del riesgo

Finalmente, aunque en nuestro estudio no se evaluó de manera específica la dimensión del modelo teórico relacionada con los impactos de la minería en los territorios y ecosistemas, resulta esencial destacar algunos aspectos. La minería informal del oro con mercurio se desarrolla en un contexto de profundas problemáticas socioambientales que impactan directamente la salud de las comunidades (102). En el Cauca se ha documentado la contaminación de fuentes hídricas por vertimientos de químicos, cambios en la coloración del agua y altos niveles de sedimentación, que comprometen su calidad y disponibilidad. A esto se suman la remoción masiva de tierra y la disposición inadecuada de estériles y escombros, que deterioran la estructura y las propiedades físico-químicas del suelo. El paisaje también se ve transformado por la deforestación, la apertura de socavones y el abandono de material, afectando no solo la estética del entorno sino también las condiciones culturales de los territorios (13,15,103). Hallazgos similares se han reportado en Antioquia, donde la degradación ambiental persiste incluso en zonas sin disponibilidad de mineral que no son posteriormente reforestadas (104). La ausencia del Estado ha favorecido un desarrollo desequilibrado en medio de violencia, narcotráfico, disputa por la tierra y pérdida de identidad cultural. En este escenario, la minería ilegal se configura como un problema de salud pública interconectado a la amenaza profunda para los ecosistemas y el tejido social, cuya mitigación exige acciones estatales firmes y efectivas que se desarrollen con la participación de las organizaciones comunitarias locales.

Limitaciones y fortalezas

Existen varias limitaciones de nuestro estudio que es importante reconocer. En primer lugar, el diseño transversal basado en fuente secundaria, no puede prevenir la ocurrencia de sesgos relacionados con los cambios en la exposición después del inicio de síntomas lo que podría limitar el establecimiento de relaciones causales. Adicionalmente, el tamaño muestral alcanzado pudo haber limitado la potencia estadística para encontrar asociaciones con exposiciones poco frecuentes. También, el uso de cabello como biomarcador puede mostrar la exposición al mercurio solamente durante los últimos 3 meses y, aunque es mejor que el análisis de sangre u orina que solo reflejan exposición reciente (días o pocas semanas) representa una limitación en relación con exposiciones de larga duración. Tampoco se incluyeron poblaciones vulnerables como niños, adolescentes o mujeres embarazadas, lo que restringe la generalización de los resultados. Además, el autorreporte para algunas variables como la frecuencia de consumo de pescado puede introducir sesgos.

Como fortalezas, se destaca la inclusión de una muestra representativa de adultos con distintos niveles de exposición ocupacional y la medición objetiva de mercurio en cabello, útil para evaluar exposiciones de los últimos 2 a 3 meses. El estudio se desarrolló mediante un proceso genuino de participación comunitaria y generó evidencia útil para intervenciones en salud pública, identificó personas con posible intoxicación crónica y facilitó su remisión para atención médica, fortaleciendo el vínculo entre investigación y acción comunitaria.

Futuros estudios:

Futuros estudios podrían ser el desarrollo de diseños longitudinales para evaluar los efectos a largo plazo de la exposición al mercurio, así como intervenciones educativas y de mitigación. La incorporación de biomarcadores complementarios (sangre, orina), pruebas neurológicas específicas y seguimiento clínico podría mejorar la caracterización de los riesgos.

Implicaciones en salud pública:

Los hallazgos de este estudio resaltan la necesidad de fortalecer los sistemas de vigilancia ambiental y de salud en comunidades con actividades mineras informales.

Las alteraciones neurológicas observadas, junto con los niveles detectables de mercurio en cabello, evidencian la urgencia de intervenciones orientadas a reducir la exposición ocupacional, y mejorar el acceso a diagnósticos neuroconductuales en estas poblaciones.

Durante el desarrollo del proyecto Macro, se llevaron a cabo diversas actividades para sensibilizar a la población sobre esta problemática. Se organizaron talleres de socialización del material digital, que incluyeron una cartilla de resultados, videos del proyecto, podcasts y ambientes virtuales de aprendizaje. Además, se realizaron encuentros donde se analizó la distinción de género en las prácticas mineras, permitiendo visibilizar las preocupaciones y el conocimiento que las mujeres tienen sobre el mercurio. Asimismo, se desarrollaron talleres dirigidos a la población minera, en los cuales se identificaron actores clave en el territorio, se reconocieron aspectos del entorno y se propusieron estrategias para la transformación territorial. Se llevó a cabo la socialización de los resultados en las comunidades de La Toma y Yolombó (105).

Además, parte de los resultados del proyecto han sido divulgados y compartidos con la comunidad científica y el público en general, a través de la publicación de artículos de revistas y artículos científicos (13,106–109). También se organizó un seminario virtual donde se abordaron temas de actualidad científica y pertinencia socio-política, relacionados con el uso de mercurio en entornos mineros, sus efectos en la salud humana, la legislación internacional y los desafíos que enfrentan comunidades y gobiernos en la gobernabilidad ambiental de regiones extractivistas.

Finalmente, se considera que futuros estudios observacionales permitirían comprender mejor la progresión de los efectos neurotóxicos del mercurio, así como el impacto acumulativo en distintos grupos etarios.

9. CONCLUSIONES

En esta población minera, los niveles de mercurio en cabello fueron significativamente más altos en quienes trabajaban directamente con mercurio, especialmente en

menores de 40 años, confirmando que la exposición laboral es el principal factor de riesgo. Aunque el consumo frecuente de pescado es común en la región, no se encontró una asociación clara entre esta vía y los niveles elevados de mercurio, lo que sugiere que la actividad minera es la fuente predominante de exposición.

En cuanto a los síntomas neurológicos, los hallazgos mostraron que alteraciones como temblor en párpado, rigidez en la marcha y disdiadococinesia fueron frecuentes en la población general, aunque la disdiadococinesia fue más común en el grupo con menor concentración de mercurio. Sin embargo, el deterioro en la función de memoria fue más prevalente en aquellos con niveles elevados, sugiriendo un posible impacto neurotóxico asociado a la exposición crónica al mercurio. La falta de significancia entre los síntomas neurológicos y los niveles de mercurio en cabello podría explicarse porque las personas que comienzan a presentar síntomas tienden a suspender o reducir sus actividades mineras y, por ende, la exposición al mercurio, lo que disminuye sus niveles corporales a pesar de que el daño neurológico ya esté presente. En consecuencia, la concentración de mercurio en cabello puede no reflejar completamente el impacto clínico en la población afectada.

Estos resultados resaltan la importancia de implementar medidas de prevención y control en la minería artesanal para reducir la exposición al mercurio y mitigar sus efectos neurológicos en la población. También se recomienda el monitoreo periódico de los niveles de mercurio y la evaluación clínica para detectar tempranamente alteraciones neurológicas, especialmente en los trabajadores jóvenes expuestos directamente a este metal.

10. REFERENCIAS

1. Hentschel T, Hruschka F, Priester M. Global Report on Artisanal & Small-Scale Mining [Internet]. Mining, Minerals and Sustainable Development; 2002 p. 2-67. Disponible en: <https://www.iiied.org/sites/default/files/pdfs/migrate/G00723.pdf>
2. Cardenas Santa Maria, Mauricio, Medina González, Henry, González Estrada, Tomas, Cante Puentes, Carlos Andrés, Arce, Juan Carlos, Maya, Julián, et al. Censo Minero Departamental 2010 - 2011 [Internet]. Bogotá D.C.: Ministerio de

- Minas y Energía; 2012 [citado 4 de mayo de 2024]. Disponible en: <https://repositoriobi.minenergia.gov.co/bitstream/handle/123456789/2181/2732.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
3. González-González A, Clerici N, Quesada B. Growing mining contribution to Colombian deforestation. *Environ Res Lett.* mayo de 2021;16(6):064046.
 4. V. Capparelli M, Cabrera M, Rico A, Lucas-Solis O, Alvear-S D, Vasco S, et al. An Integrative Approach to Assess the Environmental Impacts of Gold Mining Contamination in the Amazon. *Toxics.* julio de 2021;9(7):149.
 5. Hurtado CA, Quintero LFC. Water, land and gold: Extractivism and the environment in Colombia. En: *From Extractivism to Sustainability.* Routledge; 2023.
 6. Muñoz Telles, John Maximino, Martínez Rivillas, Alexander. *La Colosa : una disputa entre el valor del oro y el valor del medio ambiente en Colombia : análisis desde el enfoque del desarrollo humano que busca entender el funcionamiento de la capacidad de agencia a través del estudio de un caso.* [Buenos Aires]: FLACSO; 2021.
 7. Corte Constitucional de Colombia. Sentencia T445 de 2016 [Internet]. 2016. Disponible en: https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/06/Sentencia_T_445_de_2016.pdf
 8. Ministerio de Minas y Energía, Ministerio de Educación Nacional. Caracterización sectorial, sector minas. [Internet]. 2016 [citado 3 de julio de 2023]. Disponible en: https://www.colombiaaprende.edu.co/sites/default/files/files_public/2021-08/caracterizacion-sector-minero.pdf
 9. Pantoja Timarán, Freddy Hernán, Pantoja Barrios, Sebastian David. Problemas y desafíos de la minería de oro artesanal y en pequeña escala en Colombia. *Rev Fac Cienc Económicas.* 2016;24(2):147-61.
 10. Henry Valencia Carabali, Diana Yurani Agredo Delgado. Análisis de situación de salud con el modelo de los determinantes sociales de salud 2022. Suarez, Cauca: Ministerio de Salud y Protección Social; 2023.
 11. Lisifrey Ararat, Eduar Mina, Axel Rojas, Ana María Solarte, Gildardo Vanegas, Luis Armando Vargas, et al. La Toma historias de territorio, resistencia y autonomía en la cuenca del auto cauca. En: *Observatorio de Territorios Étnicos - Pontificia Universidad Javeriana* [Internet]. 1.^a ed. Bogotá D.C.; 2013 [citado 11 de junio de 2023]. Disponible en: <https://etnoterritorios.org/apc-aa->

files/92335f7b3cf47708a7c984a309402be7/la-toma-libro-la-toma_historia-de-resistencia-autonoma.pdf

12. Vanegas, Diana, Vélez-Torres, Irene. Jornadas de muestreo en el corregimiento de la Toma, vereda Yolombó [Internet]. Cali: Universidad del Valle; 2016 oct. Disponible en: <https://cinara.univalle.edu.co/images/Slider-2/Resultados-Mercurio-La-Toma-Octubre-21-de-2016.pdf>
13. Casso-Hartmann L, Rojas-Lamos P, McCourt K, Vélez-Torres I, Barba-Ho LE, Bolaños BW, et al. Water pollution and environmental policy in artisanal gold mining frontiers: The case of La Toma, Colombia. *Sci Total Environ*. 15 de diciembre de 2022;852:158417.
14. Vélez-Torres I, Méndez F. Slow violence in mining and crude oil extractive frontiers: The overlooked resource curse in the Colombian internal armed conflict. *Extr Ind Soc*. 1 de marzo de 2022;9:101017.
15. Vélez-Torres I, Vanegas D. Contentious environmental governance in polluted gold mining geographies: The case of La Toma, Colombia. *World Dev*. 1 de septiembre de 2022;157:105953.
16. Organizacion Mundial de la Salud. Organización Mundial de la Salud. 2017 [citado 3 de junio de 2023]. El mercurio y la salud. Disponible en: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/mercury-and-health>
17. Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). Toxicological Profile for Mercury (Draft for Public Comment). En: US Department of Health and Human Services, Public Health Service. Atlanta, GA; 2022.
18. Gustin MS, Bank MS, Bishop K, Bowman K, Branfireun B, Chételat J, et al. Mercury Biogeochemical Cycling: A Synthesis of Recent Scientific Advances. *Sci Total Environ*. 1 de octubre de 2020;737:139619.
19. UN Environment. Global Mercury Assessment 2018. En: UN Environment Programme, Chemicals and Health Branch Geneva. Switzerland; 2019.
20. Gutiérrez-Mosquera H, Sujitha SB, Jonathan MP, Sarkar SK, Medina-Mosquera F, Ayala-Mosquera H, et al. Mercury levels in human population from a mining district in Western Colombia. *J Environ Sci*. 1 de junio de 2018;68:83-90.
21. Mahaffey KR. Mercury Exposure: Medical and Public Health Issues. *Trans Am Clin Climatol Assoc*. 2005;116:127-54.

22. United States Environmental Protection Agency [Internet]. 2023 [citado 11 de junio de 2023]. Health Effects of Exposures to Mercury. Disponible en: <https://www.epa.gov/mercury/health-effects-exposures-mercury>
23. Cordy P, Veiga MM, Salih I, Al-Saadi S, Console S, Garcia O, et al. Mercury contamination from artisanal gold mining in Antioquia, Colombia: The world's highest per capita mercury pollution. *Sci Total Environ*. 1 de diciembre de 2011;410-411:154-60.
24. Instituto Nacional de Salud, Ministerio de Salud y Protección Social. Intoxicaciones Colombia 2018 [Internet]. Instituto Nacional de Salud; 2019 may [citado 28 de agosto de 2023] p. 1-17. (Proceso Vigilancia y Análisis del riesgo en salud pública). Disponible en: https://www.ins.gov.co/buscador-eventos/Informesdeevento/INTOXICACIONES_2018.pdf
25. Ministerio de Trabajo. Plan de Acción Mercurio 2018-2023. Bogotá D.C.; 2018.
26. Muñoz Guerrero, Maria Nathalia, Domínguez Majin, Lady Jhoana. Vigilancia epidemiológica de enfermedades priónicas en Colombia, 2005 a 2012,. En Bogotá D.C.: IQEN 2013; 2013. p. 42-56.
27. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Sinopsis nacional de la minería aurífera artesanal y de pequeña escala [Internet]. Bogotá D.C.; 2012. Disponible en: https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/06/Sinopsis_Nacional_de_la_ASGM.pdf
28. Convenio de Minamata sobre el Mercurio: texto y anexos. Convenio de Minamata; 2023.
29. Clifton JC. Mercury Exposure and Public Health. *Pediatr Clin North Am*. 1 de abril de 2007;54(2):237.e1-237.e45.
30. Hachiya N. The History and the Present of Minamata Disease. *JMAJ*. 2006;49(3):112-8.
31. Kudo A, Turner RR. Mercury Contamination of Minamata Bay: Historical Overview and Progress Towards Recovery. *Mercury Contam Sites Charact Risk Assess Remediat*. 1999;143-58.
32. Eto K. Minamata disease. *Neuropathology*. septiembre de 2000;20 Suppl:S14-19.
33. Harada M. Minamata disease: methylmercury poisoning in Japan caused by environmental pollution. *Crit Rev Toxicol*. 1995;25(1):1-24.

34. Gerstner HB, Huff JE. Selected Case Histories and Epidemiologic Examples of Human Mercury Poisoning. *Clin Toxicol.* septiembre de 1977;11(2):131-50.
35. Skerfving SB, Copplestone JF. Poisoning caused by the consumption of organomercury-dressed seed in Iraq. *Bull World Health Organ.* 1976;54(1):101-12.
36. Clarkson TW, Amin-Zaki L, Al-Tikriti SK. An outbreak of methylmercury poisoning due to consumption of contaminated grain. *Fed Proc.* octubre de 1976;35(12):2395-9.
37. Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. RESUMEN DE SALUD PÚBLICA: Mercurio [Internet]. 1999 [citado 3 de junio de 2023]. Disponible en: https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs46.pdf
38. Noelle E. Selin. Global Biogeochemical Cycling of Mercury: A Review. *Annu Rev Environ Resour.* 15 de octubre de 2009;34(1):43-63.
39. Yamamoto M, Charoenraks T, Pan-Hou H, Nakano A, Apilux A, Tabata M. Electrochemical behaviors of sulfhydryl compounds in the presence of elemental mercury. *Chemosphere.* 1 de septiembre de 2007;69(4):534-9.
40. Calao-Ramos C, Bravo AG, Paternina-Urbe R, Marrugo-Negrete J, Díez S. Occupational human exposure to mercury in artisanal small-scale gold mining communities of Colombia. *Environ Int.* 1 de enero de 2021;146:106216.
41. Spiegel SJ, Veiga MM. International guidelines on mercury management in small-scale gold mining. *J Clean Prod.* 1 de marzo de 2010;18(4):375-85.
42. Steckling N, Tobollik M, Plass D, Hornberg C, Ericson B, Fuller R, et al. Global Burden of Disease of Mercury Used in Artisanal Small-Scale Gold Mining. *Ann Glob Health.* 1 de marzo de 2017;83(2):234-47.
43. Moreno-Brush M, McLagan DS, Biester H. Fate of mercury from artisanal and small-scale gold mining in tropical rivers: Hydrological and biogeochemical controls. A critical review. *Crit Rev Environ Sci Technol.* 3 de marzo de 2020;50(5):437-75.
44. Saalidong BM, Aram SA. Mercury Exposure in Artisanal Mining: Assessing the Effect of Occupational Activities on Blood Mercury Levels Among Artisanal and Small-Scale Goldminers in Ghana. *Biol Trace Elem Res.* 1 de octubre de 2022;200(10):4256-66.
45. Veiga MM, Marshall BG. The Colombian artisanal mining sector: Formalization is a heavy burden. *Extr Ind Soc.* 1 de enero de 2019;6(1):223-8.

46. US EPA O. United States Environmental Protection Agency. 2015 [citado 12 de junio de 2023]. How People are Exposed to Mercury. Disponible en: <https://www.epa.gov/mercury/how-people-are-exposed-mercury>
47. Storelli MM, Barone G, Piscitelli G, Marcotrigiano GO. Mercury in fish: Concentration vs . fish size and estimates of mercury intake. Food Addit Contam. 1 de diciembre de 2007;24(12):1353-7.
48. Basu N, Bastiansz A, Dórea JG, Fujimura M, Horvat M, Shroff E, et al. Our evolved understanding of the human health risks of mercury. Ambio. mayo de 2023;52(5):877-96.
49. Vargas Licon SP, Marrugo Negrete JL. Mercurio, metilmercurio y otros metales pesados en peces de Colombia: riesgo por ingesta. Acta Biológica Colomb. 1 de mayo de 2019;24(2):232-42.
50. Fuentes-Gandara F, Pinedo-Hernández J, Marrugo-Negrete J, Díez S. Human health impacts of exposure to metals through extreme consumption of fish from the Colombian Caribbean Sea. Environ Geochem Health. 1 de febrero de 2018;40(1):229-42.
51. Clarkson TW, Magos L. The toxicology of mercury and its chemical compounds. Crit Rev Toxicol. septiembre de 2006;36(8):609-62.
52. Mercurio - OPS/OMS | Organización Panamericana de la Salud [Internet]. 2024 [citado 11 de junio de 2024]. Disponible en: <https://www.paho.org/es/temas/mercurio>
53. Gutierrez, Myriam. Efectos tóxicos del mercurio. Revista de la Facultad de Medicina Universidad Nacional. 1997;45(3).
54. Kanlun S, Gottlieb CA. A clinical pathologic study of four adult cases of acute mercury inhalation toxicity. Arch Pathol Lab Med. enero de 1991;115(1):56-60.
55. Cappelletti S, Piacentino D, Fineschi V, Frati P, D'Errico S, Aromatario M. Mercuric chloride poisoning: symptoms, analysis, therapies, and autoptic findings. A review of the literature. Crit Rev Toxicol. abril de 2019;49(4):329-41.
56. Nierenberg DW, Nordgren RE, Chang MB, Siegler RW, Blayney MB, Hochberg F, et al. Delayed Cerebellar Disease and Death after Accidental Exposure to Dimethylmercury. N Engl J Med. 4 de junio de 1998;338(23):1672-6.
57. Malek A, Aouad K, El Khoury R, Halabi-Tawil M, Choucair J. Chronic Mercury Intoxication Masquerading as Systemic Disease: A Case Report and Review of the Literature. Eur J Case Rep Intern Med. 24 de mayo de 2017;4(6):000632.

58. Taux K, Kraus T, Kaifie A. Mercury Exposure and Its Health Effects in Workers in the Artisanal and Small-Scale Gold Mining (ASGM) Sector-A Systematic Review. *Int J Environ Res Public Health*. 13 de febrero de 2022;19(4):2081.
59. Counter SA, Buchanan LH, Laurell G, Ortega F. Blood mercury and auditory neuro-sensory responses in children and adults in the Nambija gold mining area of Ecuador. *Neurotoxicology*. abril de 1998;19(2):185-96.
60. Bose-O'Reilly S, Drasch G, Beinhoff C, Tesha A, Drasch K, Roider G, et al. Health assessment of artisanal gold miners in Tanzania. *Sci Total Environ*. 15 de enero de 2010;408(4):796-805.
61. Graeme KA, Pollack CV. Heavy metal toxicity, Part I: arsenic and mercury. *J Emerg Med*. 1998;16(1):45-56.
62. Dantzig PI. A new cutaneous sign of mercury poisoning? *J Am Acad Dermatol*. diciembre de 2003;49(6):1109-11.
63. Cheryl A Fields, Jonathan Borak, Elan D Louis. Mercury-induced motor and sensory neurotoxicity: systematic review of workers currently exposed to mercury vapor. *Crit Rev Toxicol*. noviembre de 2017;47(10):811-44.
64. Edward J Calabrese, Ivo Iavicoli, Vittorio Calabrese, Deborah A Cory-Slechta, James Giordano. Elemental mercury neurotoxicity and clinical recovery of function: A review of findings, and implications for occupational health. *Environ Res*. mayo de 2018;163:134-48.
65. Wang Y, Li L, Yao C, Tian X, Wu Y, Xie Q, et al. Mercury in human hair and its implications for health investigation. *Curr Opin Environ Sci Health*. 1 de agosto de 2021;22:100271.
66. Liberda EN, Tsuji LJS, Martin ID, Ayotte P, Dewailly E, Nieboer E. The complexity of hair/blood mercury concentration ratios and its implications. *Environ Res*. 1 de octubre de 2014;134:286-94.
67. Packull-McCormick S, Ratelle M, Lam C, Napenas J, Bouchard M, Swanson H, et al. Hair to blood mercury concentration ratios and a retrospective hair segmental mercury analysis in the Northwest Territories, Canada. *Environ Res*. 1 de enero de 2022;203:111800.
68. La minería de hecho en Colombia. En BogotáD.C: Defensoría del Pueblo; 2010. Disponible en: https://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/F11B784C597AC0F005257A310058CA31/%24FILE/La-miner%C3%ADa-de-hecho-en-Colombia.pdf

69. Hentschel, Thomas, Hruschka, Felix, Priester, Michael. Artisanal and Small-Scale Mining - Challenges and Opportunities. En: Mining, Minerals, and Sustainable Development Project (MMSD), [Internet]. London; 2003. Disponible en: <https://www.iied.org/sites/default/files/pdfs/migrate/9268IIED.pdf>
70. Ministerio de Minas y Energías. Glosario Técnico Minero. Decreto 2191 DE 2003 [Internet]. ago 4, 2003. Disponible en: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=9198>
71. Congreso de la República de Colombia. Código de Minas [Internet]. Ley 685 ago 15, 2001. Disponible en: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=9202>
72. Castro Díaz, Laura del Pilar, Ramos, Pablo Andrés. Minería de oro artesanal y a pequeña escala en Timbiquí-cauca: una aproximación histórica a sus efectos socioambientales desde la perspectiva de los actores locales [Internet]. [Bogotá]: Pontificia Universidad Javeriana; 2011. Disponible en: <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/12439/CastroDiazLauradelPilar2011.pdf?sequence=1>
73. Gudynas E, Rojas A. Informal, ilegal, artesanal, tradicional, ancestral: Desentrañando el entramado de los extractivismos por el oro en los ríos sudamericanos: Yeiyá. 28 de diciembre de 2020;1(1):21-45.
74. Santiago Español Cano. Contaminación con mercurio por la actividad minera. Biomédica [Internet]. septiembre de 2012 [citado 28 de mayo de 2025];32(3). Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-41572012000300001
75. Organización de los Estados Americanos, Departamento contra la Delincuencia Organizada Transnacional (DDOT). Tras el dinero del oro ilícito: fortalecimiento de la lucha contra las finanzas de la minería ilegal: El caso de Colombia. En 2022. Disponible en: <https://www.oas.org/es/sms/ddot/docs/Tras-el-dinero-del-oro-ilicito-El-caso-de-Colombia.pdf>
76. Ministerio de Minas y Energías, Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito. Colombia Explotación de oro de aluvión: Evidencias a partir de percepción remota 2021 [Internet]. 2022. Disponible en: https://www.unodc.org/documents/colombia/2022/Junio/Informe_Colombia_Explotacion_de_Oro_de_Aluvion_Evidencias_a_Partir_de_Percepcion_Remota_2021_SP_.pdf

77. ¿Cómo la minería de oro puede construir competitividad a largo plazo? | EY - Colombia [Internet]. [citado 10 de junio de 2025]. Disponible en: https://www.ey.com/es_co/insights/mining-metals/centro-excelencia-mineria-metales/mineria-oro-competitividad-largo-plazo
78. Tamaño del mercado de minería de oro, acciones e Informe de la industria 2033 [Internet]. [citado 10 de junio de 2025]. Disponible en: <https://www.globalgrowthinsights.com/es/market-reports/gold-mining-market-106340>
79. Blas E, Sivasankara Kurup A, World Health Organization. Equity, social determinants and public health programmes / editors Erik Blas and Anand Sivasankara Kurup. 2010;291.
80. Marcello Veiga, Randy Baker. Protocols for Environmental and Health Assessment of Mercury Released by Artisanal and Small-Scale Gold Miners [Internet]. Vienna, Austria; 2004 [citado 3 de septiembre de 2025]. Disponible en: <https://www.delvedatabase.org/uploads/resources/protocols-for-environmental-and-health-assessment-of-mercury-released-by-artisanal-and-small-scale-gold-miners.pdf>
81. Universidad del Valle. «La Toma» con mercurio hasta el cuello [Internet]. 2016 [citado 28 de mayo de 2025]. Disponible en: <https://www.univalle.edu.co/ciencia-y-tecnologia/la-toma-con-mercurio-hasta-el-cuello>
82. Nuttall KL. Interpreting Hair Mercury Levels in Individual Patients. Ann Clin Lab Sci. 20 de junio de 2006;36(3):248-61.
83. U.S. Environmental Protection Agency. Water Quality Criterion for the Protection of Human Health: Methylmercury. 2001.
84. Hightower JM, Moore D. Mercury levels in high-end consumers of fish. Environ Health Perspect. abril de 2003;111(4):604-8.
85. Espelt A, Marí-Dell'Olmo M, Penelo E, Bosque-Prous M. Estimación de la Razón de Prevalencia con distintos modelos de Regresión: Ejemplo de un estudio internacional en investigación de las adicciones. Adicciones. 14 de junio de 2016;29(2):105-12.
86. Barros AJ, Hirakata VN. Alternatives for logistic regression in cross-sectional studies: an empirical comparison of models that directly estimate the prevalence ratio. BMC Med Res Methodol. 20 de octubre de 2003;3(1):21.

87. Coutinho LMS, Scazufca M, Menezes PR. Methods for estimating prevalence ratios in cross-sectional studies. *Rev Saude Publica*. diciembre de 2008;42(6):992-8.
88. Hosmer DW, Lemeshow S, Sturdivant RX. *Applied logistic regression*. Third edition. Hoboken, New Jersey: Wiley; 2013. 500 p. (Wiley series in probability and statistics).
89. Roger Pamphlett. The prevalence of inorganic mercury in human cells increases during aging but decreases in the very old. *Sci Rep [Internet]*. 18 de agosto de 2021 [citado 28 de mayo de 2025];11(16714). Disponible en: <https://www.nature.com/articles/s41598-021-96359-8>
90. Barbieri FL, Cournil ,Amandine, and Gardon J. Mercury exposure in a high fish eating Bolivian Amazonian population with intense small-scale gold-mining activities. *Int J Environ Health Res*. 1 de agosto de 2009;19(4):267-77.
91. Douine M, Lambert Y, Plessis L, Bardon T, Adenis A, Nacher M, et al. A cross-sectional study assessing mercury exposure and poisoning among workers in informal gold mines in French Guiana. 1 de abril de 2025 [citado 28 de mayo de 2025]; Disponible en: <https://bmjopen.bmj.com/content/15/4/e094535>
92. Vélez-Torres, Irene, Henao-Gallego, Natalia. Acciones para la protección de la vida y del territorio en entornos mineros. *Aprendizajes sobre la contaminación con mercurio en el Consejo Comunitario de La Toma, Cauca*. Santiago de Cali: Universidad del Valle; 2022 p. 70-5.
93. Olivero-Verbel J, Caballero-Gallardo K, Negrete-Marrugo J. Relationship Between Localization of Gold Mining Areas and Hair Mercury Levels in People from Bolivar, North of Colombia. *Biol Trace Elem Res*. 1 de diciembre de 2011;144(1):118-32.
94. Feingold BJ, Berky A, Hsu-Kim H, Rojas Jurado E, Pan WK. Population-based dietary exposure to mercury through fish consumption in the Southern Peruvian Amazon. *Environ Res*. 1 de abril de 2020;183:108720.
95. Bose-O'Reilly S, Bernaudat L, Siebert U, Roider G, Nowak D, Drasch G. Signs and symptoms of mercury-exposed gold miners. *Int J Occup Med Environ Health [Internet]*. 22 de marzo de 2017 [citado 5 de mayo de 2024]; Disponible en: <http://www.journalssystem.com/ijomeh/Signs-and-symptoms-of-mercury-exposed-gold-miners,61808,0,2.html>

96. Abbas HH, Sakakibara M, Sera K, Arma LH. Mercury Exposure and Health Problems in Urban Artisanal Gold Mining (UAGM) in Makassar, South Sulawesi, Indonesia. *Geosciences*. septiembre de 2017;7(3):44.
97. Porta M. Reverse Causation. En: *A Dictionary of Epidemiology* [Internet]. Oxford University Press; 2016 [citado 11 de junio de 2025]. Disponible en: <https://www.oxfordreference.com/display/10.1093/acref/9780199976720.001.0001/acref-9780199976720-e-2332>
98. Banack HR, Bea JW, Kaufman JS, Stokes A, Kroenke CH, Stefanick ML, et al. The Effects of Reverse Causality and Selective Attrition on the Relationship Between Body Mass Index and Mortality in Postmenopausal Women. *Am J Epidemiol*. octubre de 2019;188(10):1838-48.
99. Prüss-Üstün A, Corvalán CF, World Health Organization. Ambientes saludables y prevención de enfermedades : hacia una estimación de la carga de morbilidad atribuible al medio ambiente: resumen de orientación / A. Prüss-Üstün, C. Corvalán. *Prev Dis Healthy Environ Estim Environ Burd Dis Exec Summ*. 2006;16.
100. PlanetGOLD Colombia. Acciones de salud pública para la prevención y minimización de personas con exposición a mercurio y sus compuestos. 2023.
101. Bernal-Ordoñez LK, Niño-Gutiérrez EL, Casanova ML, Treviño Del Campo F, Rodríguez A, Jiménez García DA. Participación y empoderamiento comunitario en la atención primaria en salud en América Latina: revisión sistemática exploratoria. *Rev Panam Salud Pública*. 4 de diciembre de 2024;48:1.
102. Cruz GM. Estado actual de la minería en Colombia y la identificación de impactos. Repositorio Institucional UniLibre. 10 de junio de 2023;
103. Defensoria del Pueblo. La minería sin Control. Un enfoque desde la vulneración de los Derechos Humanos. En Colombia; [citado 25 de agosto de 2025]. Disponible en: <https://publicaciones.defensoria.gov.co/desarrollo1/ABCD/bases/marc/documentos/textos/InformedeMinerla2016.pdf>
104. Rafael Correa Argota. Desarrollo socio-económico regional: Impactos de la minería artesanal en el Bajo Cauca antioqueño. *Rev Int Coop Desarro*. 3 de junio de 2017;4(1):46-61.
105. Mercurio AltoCauca – Estudio integral participativo del Mercurio en el Alto Cauca [Internet]. [citado 11 de junio de 2025]. Disponible en: <https://mercurioaltocauca.com/>

106. Morgan VL, McLamore ES, Correll M, Kiker GA. Emerging mercury mitigation solutions for artisanal small-scale gold mining communities evaluated through a multicriteria decision analysis approach. *Environ Syst Decis*. 1 de septiembre de 2021;41(3):413-24.
107. Morgan VL, Casso-Hartmann ,L., Velez-Torres ,I., Vanegas ,D. C., Muñoz-Carpena ,R., McLamore ,E. S., et al. Modeling exposure risk and prevention of mercury in drinking water for artisanal-small scale gold mining communities. *Hum Ecol Risk Assess Int J*. 7 de junio de 2021;27(6):1492-508.
108. Mercury Pollution and Artisanal Gold Mining in Alto Cauca, Colombia: Woman's Perception of Health and Environmental Impacts - Irene Vélez-Torres, Diana C. Vanegas, Eric S. McLamore, Diana Hurtado, 2018 [Internet]. [citado 11 de junio de 2025]. Disponible en: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/1070496518794796>
109. Motion A. Chemistry World. 2020 [citado 11 de junio de 2025]. Mapping mercury contamination from mining. Disponible en: <https://www.chemistryworld.com/opinion/mapping-mercury-contamination-from-mining/4012803.article>

11. ANEXO 1: Procedimiento para la recolección y medición de nivel de mercurio en cabello

1. Recolección de la muestra

La toma de muestras de cabello fue realizada por personal debidamente entrenado en el procedimiento. Inicialmente, el cabello de cada participante fue lavado con jabón no iónico y enjuagado con abundante agua, dejándose secar al aire ambiente.

Para la recolección se utilizaron tijeras previamente limpiadas con alcohol. El corte se efectuó en la región occipital, lo más cerca posible del cuero cabelludo. En los casos de cabellos largos, se seleccionó una longitud máxima de 2 cm desde la raíz. Las hebras recolectadas fueron almacenadas en condiciones adecuadas y con la respectiva codificación para su posterior análisis.

2. Preparación de la muestra

Las hebras de cabello fueron pesadas en un beaker y humedecidas ligeramente con agua. Posteriormente, se adicionaron 5 mL de ácido nítrico concentrado y, con precaución, 5 gotas de peróxido de hidrógeno (30 %). La mezcla se calentó en plancha a baja temperatura hasta lograr la completa disolución del cabello, obteniéndose una solución de aspecto amarillento traslúcido. Una vez enfriada a temperatura ambiente, la solución se llevó a volumen con ácido nítrico al 0,1 %.

3. Curva de calibración y análisis de mercurio

Para la determinación de mercurio total, se preparó una curva de calibración con una solución estándar de mercurio, en concentraciones de 5 µg/L, 10 µg/L, 15 µg/L, 20 µg/L y 30 µg/L. Las lecturas de absorbancia de los patrones y de las muestras se realizaron en un espectrofotómetro de absorción atómica, siguiendo las especificaciones del método.

4. Control de calidad

Con el fin de asegurar la validez y confiabilidad de los resultados, se implementaron procedimientos de control de calidad, incluyendo:

- Limpieza del material de corte antes de cada uso.
- Uso exclusivo de reactivos de grado analítico.
- Preparación y verificación de la curva de calibración en cada corrida analítica.