

# CAPÍTULO I

## PASIVOS AMBIENTALES POR MINERÍA AURÍFERA EN EL DEPARTAMENTO DE CÓRDOBA

## ENVIRONMENTAL LIABILITIES OF GOLD MINING IN THE DEPARTMENT OF CÓRDOBA

Durante-Yánez. E.V<sup>12</sup>, Laza-Durante. M<sup>2</sup>, Caraballo-Laza. M. J<sup>2</sup>,  
Tapia- Contreras. E.E<sup>2</sup>, Rosso-Pinto. M<sup>1</sup>, Enamorado-Montes.  
G.H<sup>2</sup>, Paternina-Urbe. R<sup>3</sup> y Marrugo-Negrete. J.L<sup>2</sup>.

**DOI:** <https://doi.org/10.5281/zenodo.14825732>

---

1 Programa de Ingeniería Ambiental, Departamento de Ingeniería Ambiental, Universidad de Córdoba.

2 Programa de Química, Departamento de Química, Grupo de Investigación en Aguas, Química Aplicada y Ambiental, Universidad de Córdoba.

3 Programa de Regencia y Farmacia, Departamento de Regencia y Farmacia, Universidad de Córdoba.

\*Autor por correspondencia: jmarrugo@correo.unicordoba.edu.co

## Resumen

Los pasivos ambientales surgen como consecuencia de actividades humanas, representando una deuda ambiental significativa. Recientemente, en Colombia, se expidió la Ley N° 2327 del 13 de septiembre de 2023, que establece la definición de pasivo ambiental y fija los lineamientos para su gestión participativa, adecuada y oportuna. De manera específica, en el contexto de la minería aurífera, estos pasivos reflejan los impactos ambientales derivados de los procesos de extracción y beneficio del oro. Sin embargo, la falta de metodologías para su identificación ha llevado a una escasa documentación de estos sitios como pasivos ambientales en el país. El departamento de Córdoba, uno de los principales productores de oro en Colombia, no está exento de los impactos negativos de la minería aurífera, que se reflejan en la contaminación de los ecosistemas naturales. El objetivo de este capítulo es contextualizar el papel del departamento de Córdoba en la minería aurífera y sus impactos, presentando como estudio de caso la degradación y contaminación de suelos por mercurio en el municipio de Ayapel. Los resultados de este estudio en el Distrito de Manejo Integrado de Recursos Naturales del Complejo de Humedales de Ayapel revelaron la degradación y contaminación del suelo debido a la minería aurífera, lo que ha provocado un deterioro en los servicios ecosistémicos y representa un riesgo para la salud humana y ambiental. Esta situación amenaza la seguridad alimentaria y los medios de vida sostenibles en la zona. Con base en estos hallazgos, se espera un avance en el desarrollo de metodologías para la identificación y declaración de pasivos ambientales mineros, con el fin de garantizar la recuperación de los ecosistemas afectados y promover un control y monitoreo efectivos de los sitios mineros en operación, evitando así la creación de áreas abandonadas sin un plan de cierre adecuado.

**Palabras claves:** AMEAs, DMI Ayapel, Hg, matrices ambientales, PAM.

## Abstract

Environmental liabilities are debts owed to the environment as a result of human activity. Recently, Colombia issued Law No. 2327 on September 13, 2023, which defines environmental liabilities and provides guidelines for their participatory, adequate, and timely management. In the context of gold mining, these liabilities specifically reflect the environmental impacts resulting from the gold extraction and beneficiation processes. However, the lack of identification methodologies has led to limited documentation of these sites as environmental liabilities in the country. The Department of Córdoba, one of the major gold producers in Colombia, is not exempt from the adverse effects of gold mining, which are evident in the pollution of natural ecosystems. The objective of this chapter is to contextualize the role of the department of Córdoba in gold mining and its impacts, presenting as a case study the degradation and contamination of soils by mercury in the municipality of Ayapel. The study conducted in the Ayapel Wetlands Complex Integrated Natural Resources Management District provides evidence of these negative impacts, leading to degradation of ecosystem services and risks to human and environmental health. This situation threatens food security and sustainable livelihoods in the area. Progress is expected in developing methodologies for identifying and declaring environmental mining liabilities. This will ensure the recovery of affected ecosystems and promote effective control and monitoring of mining sites in operation, as well as prevent the creation of abandoned areas without an adequate closure plan.

**Keywords:** AMEAs, DMI Ayapel, Hg, environmental matrices, PAM.

## 1.1. Introducción

Las actividades de minería son importantes en el desarrollo y crecimiento económico de muchos países porque generan empleos, incrementan a nivel nacional el producto interno bruto (PIB) y tienen ganancias en moneda extranjera (Sako et al., 2018). El sector minero energético en Colombia es fundamental para su economía, con PIB minero para 2019 (USD 5218 millones), 2020 (USD 5787 millones) y tercer trimestre de 2021 (USD 3799 millones) que representaron el 1,62 %, 1,27 % y 1,32 % del PIB total colombiano, respectivamente. La minería aurífera contribuye en la dinámica y crecimiento de este sector de la economía colombiana, destacándose un incremento de la producción de oro que pasó de 37,5 t en 2019 a 47,8 t en 2020 (Ministerio de Minas y Energía [MinEnergía], 2020).

El departamento de Córdoba aportó 2,25 t y 3,22 t de oro en 2019 y 2020, respectivamente. Sin embargo, la contribución económica de la minería aurífera es insignificante frente a los efectos en la salud humana y ambiental, generados por la inadecuada disposición de residuos sin ningún tratamiento previo en cuerpos de agua o suelos generando contaminación de agua, suelos y aire, afectando la supervivencia de los organismos, la salud y calidad de vida de la población que se encuentre en el área de influencia directa e indirecta de las actividades de minería (Betancur et al., 2018).

En Colombia, el sector de la minería de oro está formado principalmente por minería formal a gran escala, y minería artesanal a pequeña escala (MAPE); la primera se expande debido a los inversores internacionales, y la segunda por el aumento del precio del oro, el cual se ubicó con mayor valor en el período de 2020 (Betancur et al., 2018).

Muchas minas en zona rural empobrecidas operan ilegalmente bajo la ley colombiana, sin derechos mineros válidos, títulos de propiedad o permisos ambientales. La formalidad y legalidad de la minería frente a las entidades mineras y ambientales permite un mayor control y monitoreo de

los sitios mineros para regular los beneficios económicos y efectos en el ambiente (Torrance et al., 2021).

Teniendo en cuenta que la explotación minera en un sitio tiene un determinado tiempo por la disponibilidad del mineral o metal, la normativa colombiana, Ley N° 685 de 2001, establece los planes de cierre de minas, los cuales deben ser ejecutados por el titular de la mina, con el objetivo de rehabilitar el área utilizada en el proyecto minero (Congreso de la República, 2001). Sin embargo, se evidencian sitios mineros cerrados o abandonados que no cumplen lo dispuesto en la normativa vigente, sin ningún titular responsable, esto como consecuencia por la falta de regulación por lo entes de control, la ilegalidad e informalidad.

Estos sitios impactados por la minería por lo general presentan contaminación de suelos con altas concentraciones de elementos potencialmente tóxicos, y alteraciones de sus propiedades físicas, químicas y biológicas, ocasionando un deterioro de los servicios ambientales que ofrece este recurso no renovable. Las áreas afectadas deben ser compensadas, remediadas o restauradas para evitar riesgos en la salud. De esta manera, estos sitios se han acumulado como Pasivos Ambientales Mineros (PAM), entendiéndose como una deuda ambiental u obligación de buscar soluciones sostenibles que permitan la recuperación del sitio (López et al., 2017). Sin embargo, en Colombia se promulgó la Ley N° 2327 del 13 de septiembre de 2023 por el Congreso de la República (2023), la cual establece la definición de pasivo ambiental y establece directrices para su gestión participativa, adecuada y oportuna. Además, en el año siguiente a la entrada en vigor de dicha ley, diversas entidades gubernamentales y autoridades ambientales competentes colaborarán para establecer los lineamientos necesarios para la formulación, implementación y evaluación de una política pública en esta materia.

El departamento de Córdoba no es ajeno a los impactos ambientales ocasionados por la minería aurífera evidenciado en la contaminación de ecosistemas naturales (Marrugo et al., 2007; Marrugo Negrete et al., 2008;

Marrugo Negrete et al., 2010; Murillo et al., 2017; Marrugo Negrete et al., 2018a; Marrugo Negrete et al., 2020; Marrugo Negrete et al., 2018b; Cruz et al., 2019; Calao et al., 2021; Marrugo Negrete et al., 2021; Pedraza y Espinosa, 2022).

En Córdoba, el distrito de minería aurífera está conformado por los municipios: Ayapel, Buenavista, La Apartada, Montelíbano, Planeta Rica, Pueblo Nuevo, y Puerto Libertador (Unidad de Planeación Minero Energética [UPME], 2014). MinEnergía y UNODC para el año 2022 reportaron que Córdoba tuvo más del 90 % de evidencias de explotación de oro de aluvión (EVOA) en tierra en la categoría de explotación ilícita; el 70 % del total de EVOA se concentra en áreas protegidas del Distrito de Manejo Integrado de Recursos Naturales del Complejo de Humedales de Ayapel (MinEnergía, 2022).

La Contraloría General del Departamento de Córdoba (2010) informó sobre los impactos asociados ambientales por la extracción de oro ilegal en el municipio de Ayapel, sugiriendo contabilizar los costos económicos del pasivo ambiental generados para los efectos de las actividades de minería aurífera en desarrollo como las minas abandonadas; sin embargo, concluyeron que la capacidad para identificar PAM, y determinar los responsables, es débil por la falta de metodologías para realizar la valoración. En este sentido, este capítulo tiene como objetivo contextualizar el papel del departamento de Córdoba en la minería aurífera y sus impactos, y presenta como estudio de caso la degradación y contaminación de suelos por mercurio en el municipio de Ayapel.

## 1.2. Minería aurífera en Córdoba

La minería de oro en el departamento de Córdoba se ha desarrollado en los municipios Ayapel, Buenavista, La Apartada, Montelíbano, Planeta Rica, Pueblo Nuevo, Puerto Libertador, Sahagún, San Antero, San Carlos y San José de Uré. Actualmente, la extracción de oro se destaca en los municipios de Ayapel, Puerto Libertador y San José de Uré, que hacen

parte del Distrito Minero de Montelíbano (Sistema de Información Minero Colombiano [SIMCO], 2022). En estos municipios, las actividades de minería aurífera se realizan bajo la MAPE., siendo el oro en su mayoría extraído por barequeo. Sin embargo, en algunas áreas implementan maquinarias para la remoción del material como retroexcavadoras, motores hidráulicos, motobombas y dragas; seguidamente extraen el metal precioso del material mediante procesos de trituración, concentración, separación, y en muchos casos el método de amalgamación, el cual requiere del uso del mercurio (Hg) para recuperar el oro (UPME, 2014).

De acuerdo al SIMCO y UPME, la producción histórica de oro en Córdoba desde 2001 hasta el primer trimestre de 2022 ha sido alrededor de 44,3 t (SIMCO, 2022). En el año 2001, ocupó el primer lugar como productor aurífero en el país con 6,7 t, entre 2002 y 2004 estuvo el segundo lugar y en 2005 el tercero (UPME, 2014). En el 2006, la producción tuvo una reducción en un 87,6 % hasta 0,5 t, llegando en 2007 y 2008 ha producir menos de 0,082 t. En 2009 y 2010 aumentó la producción a 0,5 y 0,6 t, respectivamente, seguido en 2011 con una producción de 0,069 t. Entre 2012 y 2018, la producción de oro se mantuvo superior a 0,5 t. En los últimos años, Córdoba se encuentra entre los cinco departamentos de Colombia que representan la mayor producción de oro a nivel nacional, registrando para los años 2019, 2020 y 2021 una producción de 2,2 t (el 5,8% del total nacional), 3,2 t (el 7% del total nacional) provienen 2,5 t de subcontratos y 0,8 t de barequeros, y 1,6 t (3,6 % del total nacional), respectivamente; a nivel municipal, Ayapel (Figura 1.1) se encuentra entre los 10 municipios de Colombia con mayor reporte de producción de oro en el periodo 2017 - 2021, con 3,7 % de participación del total nacional (MinEnergía, 2021).

Es importante mencionar que los datos publicados por el SIMCO hacen referencia a la producción con base en regalías, suministrados por la Agencia Nacional de Minería. En este sentido, la producción de oro puede ser mayor a las registradas por las entidades estatales, teniendo en cuenta que en Córdoba más del 90 % de su EVOA en tierra se encuentra como explotaciones ilícitas, menores al 10 % y 5 %, en tránsito a la legalidad, y con

permisos técnicos y ambientales, respectivamente (MinEnergía, 2022). De igual manera, esto se ve reflejado en el municipio de Ayapel con el 91 % (3971 ha) de EVOA en la categoría de explotación ilícita (MinEnergía, 2021). En la Figura 1.1. se presenta el desarrollo de actividades de minería aurífera en el municipio de Ayapel, Córdoba.

### Figura 1.1.

*Desarrollo de actividades de minería artesanal en el municipio de Ayapel, Córdoba*



*Nota:* Tomado de Universidad de Córdoba (2024).

### 1.3. Áreas mineras en estado de abandono (AMEAs) en Córdoba

Las áreas mineras en estado de abandono (AMEAs) hacen referencia a áreas que en el pasado han sido degradadas por la extracción ilícita de minerales, por parte de actores que no contaban con un título minero (SIMCO, 2022). En este sentido, las AMEAs se pueden considerar PAM al

ocasionar deudas como consecuencias del deterioro ambiental por causa de las actividades de minería abandonadas (MinEnergía, 2021).

Entre las causas de abandono que registra el SIMCO y UPME, se encuentran la calidad del mineral, conflicto ambiental, conflicto social, conflicto socioambiental, no identificado y otros. A nivel nacional, en Colombia se han identificado para oro 170 AMEAs, de las cuales 11 corresponde al departamento de Córdoba, y se encuentran ubicadas en el municipio de Ayapel, con un sistema de explotación a cielo abierto, teniendo como causa de abandono la calidad del oro (SIMCO, 2022). Sin embargo, a 2022 no se encuentran registros publicados de estos AMEAs como PAM.

#### 1.4. Contaminación de matrices ambientales por mercurio en Córdoba

La contaminación ambiental por mercurio (Hg) es un tema de relevancia mundial por los efectos tóxicos de este elemento en la salud humana y ambiental (Contraloría General de la República de Colombia, 2021). La liberación del mercurio al ambiente se puede dar de forma natural como resultado de actividad volcánica, erosión de las rocas, movimientos del agua y procesos biológicos, y por actividades antrópicas de minería e industriales, principalmente por la extracción de mercurio, oro, plata y otros metales, en centrales eléctricas de carbón, calderas industriales a carbón, y plantas de incineración de desechos (Qureshi, 2022).

Estas actividades a nivel mundial han aumentado la concentración de Hg en matrices ambientales (agua, aire, suelo, sedimentos, fauna y flora), generando un riesgo para la salud humana por la presencia de este metal en la cadena alimentaria (Organización Mundial de la Salud [OMS], 2021; Driscoll et al., 2013). Esta problemática despertó el interés de los gobiernos, adoptando en el 2013, el Convenio de Minamata sobre mercurio, en el que se destacan una serie de medidas que buscan eliminar gradualmente el uso del mercurio, y controlar las emisiones a la atmósfera, suelo y agua (Marrugo Madrid, 2021).

En el departamento de Córdoba, el mercurio es utilizado principalmente en procesos para el beneficio del oro. Según UPME (2014), la cantidad de mercurio utilizada en los procesos mineros no es excesiva en las minas que fueron objeto de estudio en este departamento; sin embargo, estimaron una disposición promedio de mercurio en el ambiente de aproximadamente de 1,96 t/año. Es importante destacar que los municipios de Ayapel y Puerto Libertador, reciben aguas contaminadas con mercurio desde los ríos Cauca y San Jorge durante la época de lluvias, proveniente de la minería de la zona aurífera más grande de Colombia (sur de Bolívar, cuenca del San Jorge y nordeste de Antioquia) (Marrugo Negrete, 2018a). De esta manera, las altas concentraciones de mercurio en aire, suelos y sedimentos alrededor de los sitios mineros reflejan la dispersión de este elemento en el ambiente (UPME, 2014).

Diferentes estudios han reportado concentraciones de mercurio en agua, suelo, aire, flora, fauna y en personas, en diferentes municipios del departamento de Córdoba (Marrugo et al., 2007; Marrugo Negrete et al., 2008; Marrugo Negrete et al., 2010), respectivamente, reportaron concentraciones medias de  $0,288 \pm 0,145$ ,  $0,370 \pm 0,123$  y  $0,298 \pm 0,148$  mg Hg/kg, para especies de peces (*Prochilodus magdalenae*, *Pseudoplatystoma fasciatum*, *Caquetaia krassi*, *Sorubin cuspidatus*, *Hoplias malabaricus*, *Plasgioscion surinamensis*, *Ageneiosus caucanus*, *Leporinus muyscoruma*) de la ciénaga de Ayapel. Estudios como el realizado por Gracia et al. (2010), presentaron para habitantes del municipio de Ayapel resultados de concentración media en cabello de  $2,18 \pm 1,77$  mg Hg/kg. También, obtuvieron una concentración media de  $0,416 \pm 0,245$  mg Hg/kg, para muestras de peces (*Pseudoplatystoma fasciatum*, *Sorubin cuspidatus*, *Petenia kraussi*, *Hoplias malabaricus*, *Plasgioscion surinamensis*, *Prochilodus magdalenae*, *Leporinus muyscoruma*) recolectadas en la ciénaga de Ayapel. Madero y Marrugo (2011), reportaron una concentración media de  $0,027 \pm 0,019$  y  $0,028 \pm 0,025$  mg Hg/kg, respectivamente en hígado y músculo pectoral derecho de bovino de la raza cebú mestiza (Brahman mestizo por *Bos Taurus*), procedentes de fincas de la zona del Sinú y San Jorge.

Zapata et al. (2014), obtuvieron concentraciones medias de  $0,25 \pm 0,18$  mg Hg/kg,  $0,14 \pm 0,09$  mg Hg/kg y  $0,06 \pm 0,04$   $\mu$ g Hg/L, en muestras de músculo, caparazón y sangre de tortugas (*Trachemys callirostris*), respectivamente, recolectadas en el municipio de Santa Cruz de Lorica. Burgos et al. (2014), presentaron un rango de concentraciones de  $0,31 - 9,17$  mg Hg/kg y  $0,63 - 6,29$  mg Hg/kg, en muestras de plumas e hígado de *Pelecanus occidentalis*, respectivamente, recolectadas en la Bahía de Cispatá. Marrugo Negrete et al. (2015a), reportaron un rango de concentraciones de  $0,128 - 2,53$  mg Hg/kg, en muestras de peces (*Hoplias malabaricus*, *Caquetaia kraussii*, *Leporinus muyscorum*, *Prochilodus magdalenae*, *Cyphocharax magdalenae*), recolectadas después del llenado del embalse de la estación hidroeléctrica de Urrá ubicada en el río Sinú, municipio de Tierralta. Además, Marrugo Negrete et al. (2015b), presentaron concentración media de  $0,235 \pm 0,049$  mg Hg/kg en sedimentos de la ciénaga de Ayapel.

Marrugo Negrete et al. (2016), para el municipio de Puerto Libertador, reportaron concentraciones medias de  $0,916 \pm 0,007$  y  $0,78 \pm 0,002$  mg Hg/kg en sedimentos y suelos circundantes del río San Pedro, respectivamente. También, para la Mina El Alacrán, presentaron rangos de concentraciones medias de  $0,23 \pm 0,0005 - 6,32 \pm 0,004$  mg Hg/kg en suelos,  $1$  y  $46000$  ng/m<sup>3</sup> en aire, y  $0,0287 \pm 0,0002 - 5,983 \pm 0,002$  mg Hg/kg en raíz, tallo y hojas de especies vegetales (*Jatropha curcas*, *Thalia geniculata*, *Piper marginatum*, *Cyperus ferax*, *Ricinus communis*, *Pityrogramma colomelanos*, *Capsicum annuum*, *Stecherus bifidus*, *Guazuma ulmifolia*, *Senna alata*, *Tabebuia rosea*, *Calathea lutea*, *Eleocharis interstincta*, *Cecropia peltata*, *Oxycaryum cúbense*, *Phyllanthus niruri*, *Psidium guajava*, *Cyperus luzulae*, *Ceiba pentandra*, *Muntingia calabura*, *Clidemia sp.*, *Plectramthus sp.*, *Ludwigia octovalvis*, *Inga edulis*). Burgos et al. (2017), obtuvieron un rango de concentraciones medias de  $0,96 \pm 0,46 - 10,19 \pm 4,99$  mg Hg/kg en plumas de aves marinas (*Pelecanus occidentalis*, *Fregata magnificens*, *Phalacrocorax brasilianus*, *Thalasseus maximus*) recolectadas en la Bahía de Cispatá. También, reportaron concentraciones de  $0,00163 - 0,13566$  mg Hg/kg y  $0,10 - 0,67$  mg Hg/kg en sedimentos y peces (*Cetengraulis edentulus*, *Eugerres plumieri*, *Centropomus undecimalis*, *Trichirus lepturus*).

Marrugo Negrete et al. (2017), presentaron concentraciones medias de  $0,159 \pm 0,081$  mg Hg/kg en suelos agrícolas de la cuenca del río Sinú. Murillo et al. (2017), reportaron concentraciones medias de  $0,226 \pm 0,570$  µg Hg/L y  $1,061 \pm 1,022$  µg Hg/L, en agua de la ciénaga de Ayapel. Marrugo Negrete et al. (2018), obtuvieron concentraciones medias de  $0,56 \pm 0,16$  mg Hg/kg para los peces (*Hoplias malabaricus*, *Sorubim cuspicaudus*) y  $0,19 \pm 0,07$  mg Hg/kg para los peces (*Leporinus muyscorum*, *Prochilodus magdalenae*), recolectados en la ciénaga de Ayapel. Marrugo-Negrete et al. (2018b), presentaron concentraciones medias de  $0,085 \pm 0,007$  mg Hg/kg en sedimentos, y  $0,121 \pm 0,006$  mg Hg/kg y  $0,043 \pm 0,008$  mg Hg/kg, en raíz y frondas de macrófita (*Eichhornia crassipes*), respectivamente, recolectadas en el municipio de Ayapel. Cruz et al. (2019), reportaron una concentración media de  $21,9 \pm 9,3$  µg Hg/L en sangre de los participantes del estudio de Bocas de Ure (Montelíbano), Torno rojo y Mina El Alacrán (Puerto Libertador).

Marrugo Negrete et al. (2021), obtuvieron concentración media de 0,306 mg Hg/kg en sedimentos de cuenca alta de San Jorge y cuenca media de San Jorge, en sitios del departamento de Córdoba. Calao et al. (2021) presentaron concentraciones medias de 0,05 y 0,04 mg Hg/kg en hígado y bazo de murciélagos, respectivamente, recolectados en el municipio de Ayapel. Marrugo Madrid et al. (2021), reportaron concentraciones de 0,127 y 0,184 mg Hg/kg en suelos de la vereda Valdez, Puerto Libertador. Pedraza y Espinosa (2021), obtuvieron para muestras de peces concentraciones medias de  $0,8 \pm 0,4$  mg Hg/kg (*Sorubim cuspicaudus*) y  $0,19 \pm 0,09$  mg Hg/kg (*Prochilodus magdalenae*), recolectadas en las ciénagas centrales de Ayapel, Escobillas y Paticos.

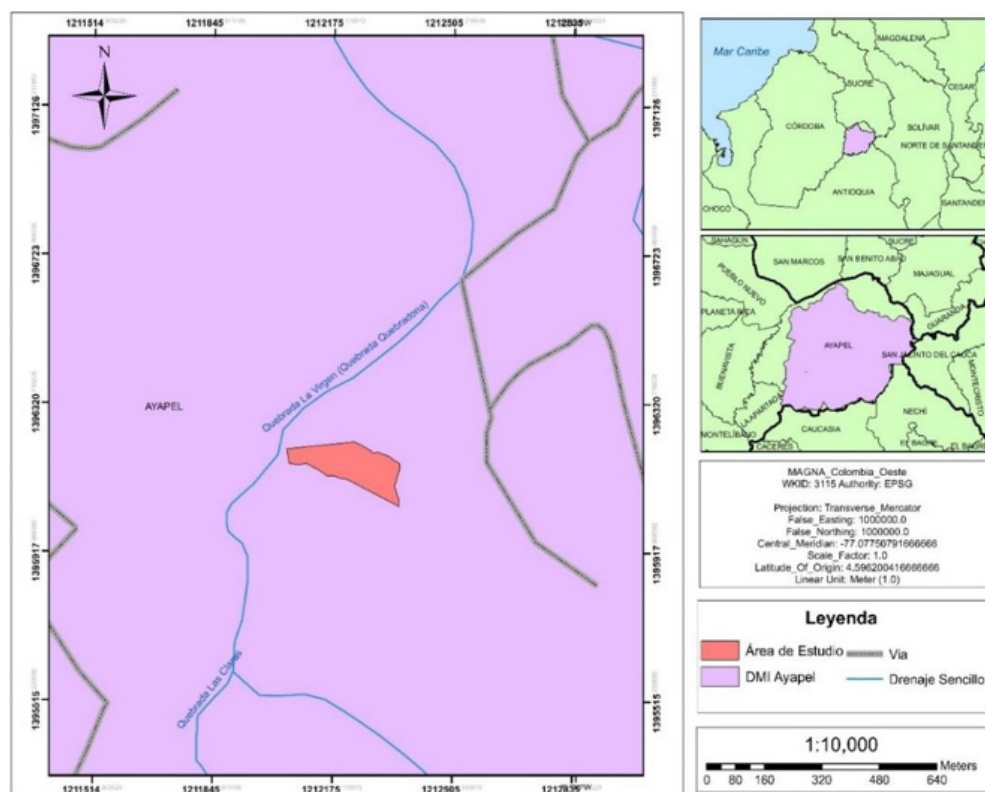
Los resultados de los estudios anteriormente expuestos para el departamento Córdoba, evidencian la problemática de contaminación ambiental por mercurio como consecuencia de la minería, teniendo en cuenta la presencia de concentraciones de este metal en diferentes matrices ambientales y biológicas; siendo el ecosistema de la ciénaga de Ayapel, el más recurrente entre los estudios, reflejándose la bioacumulación y biomag-

nificación del mercurio en la cadena trófica a través de las últimas dos décadas, convirtiéndose en una amenaza para la seguridad alimentaria, y un riesgo para la salud humana. En este sentido, cabe destacar que estos sitios contaminados directa e indirectamente como efecto de las actividades mineras eventualmente pueden ser o convertirse en pasivos ambientales.

Caso de estudio: degradación y contaminación de suelos con mercurio en el distrito de manejo integrado de los recursos naturales (DMI) del complejo de humedales de Ayapel

**Figura 1.2.**

*Área de estudio ubicada en el DMI del complejo de humedales de Ayapel*



*Nota:* Tomado de Universidad de Córdoba (2024).

En el Distrito de Manejo Integrado de los Recursos Naturales (DMI) del complejo de humedales de Ayapel (Acuerdo No 175 del Consejo Directivo de la Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y del San Jorge, 2011) (Registro Único Nacional de Áreas Protegidas [RUNAP], 2011), particularmente en la vereda La Quebradona ( $8^{\circ}10'37,3''$  N  $-75^{\circ}09'05,3''$  W), sitio en el que se han desarrollado actividades de minería aurífera (Contraloría General del Departamento de Córdoba, 2010; Cuéllar y Pacito, 2021). Se determinó la presencia de Hg y el contenido de algunos parámetros físicoquímicos del suelo en un área de 2,4 ha (Figura 1.2).

### Figura 1.3.

*Toma de muestras de suelo*



*Nota:* Tomado de Universidad de Córdoba (2024).

Para el estudio, se tomaron 12 muestras de suelo (Figura 1.3), cada muestra compuesta por 5 submuestras recolectadas de una cuadrícula de 10 m x 10 m, a una profundidad de menos de 30 cm (RUNAP, 2011). Los parámetros físico químicos evaluados fueron textura del suelo mediante el método de Bouyoucos y el tipo de suelo se clasificó utilizando el triángulo de textura del suelo (Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), 2006). El pH del suelo se midió en una relación suelo-agua 1:1 con un medidor de pH (WTW 330i).

El contenido de materia orgánica (MO) se determinó multiplicando los valores de carbono orgánico por un factor de 1,724 (Tandon, 2006). El carbono orgánico (CO) se determinó mediante el método de Walkley-Black (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), 2013). El contenido de azufre (S) y fósforo (P) disponible se determinó mediante el método Monofostato de calcio 0,008 M y el método Bray II (IGAC, 2006), respectivamente, y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) se calculó como resultado de la suma de las concentraciones de  $\text{Ca}_2^+$ ,  $\text{Mg}_2^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{Al}_3^+ + \text{H}^+$ , determinados mediante el método de acetato de amonio 1,0 M a pH 7,0. La concentración de Hg se determinó utilizando un analizador directo de mercurio (DMA-80 TRICELL; Milestone Inc., Italia), siguiendo el método EPA 7473 (U.S. Environmental Protection Agency, 2007).

Los resultados obtenidos muestran que en el área de estudio predomina la textura de suelo arenosa, indicando que tienen un contenido promedio de arena superior al 50 % y un contenido de arcilla inferior al 20 % (Huang y Hartemink, 2020). El pH se caracterizó por ser ácido con un valor de  $5,015 \pm 0,258$ , y la MO baja con  $0,296 \pm 0,160$  %, considerado normal en suelos que han sido impactados por actividades de minería aurífera (Marrugo Negrete et al., 2017; Durante et al., 2022). Las bajas concentraciones de S ( $3,707 \pm 1,822$  mg/kg) y P ( $2,240 \pm 1,026$  mg/kg), son factores limitantes para el crecimiento de plantas (Liu et al., 2014; Maurya et al., 2020); y la CIC de  $2,702 \pm 2,551$  cmol/kg; indica de acuerdo con los estándares sugeridos por Guan (2006), una retención de nutrientes muy débil en el suelo.

Los bajos valores de CIC y MO pueden deberse a la textura arenosa del suelo, debido a que estos suelos tienen un tamaño granular hasta 50 cm de profundidad, por lo que retienen pocos nutrientes, siendo directamente proporcional con los contenidos de los macronutrientes, MO y CIC (Liu et al., 2014; Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2024).

El área de estudio presentó una concentración media de Hg de  $1,681 \pm 3,11$  mg/kg, superior al valor de referencia (0,058 mg Hg/kg) de las Tablas de Referencia Rápida para la Detección de la NOAA (SQiRTs, por sus siglas en inglés) (Buchman, 2008). También, superior al valor reportado para suelo no contaminado en Colombia ( $0,028 \pm 0,007$  mg Hg/kg) (Marrugo Negrete et al., 2017). Este resultado se puede explicar por ser una zona en la que utilizan el Hg en los procesos del beneficio del oro (Contraloría General del Departamento de Córdoba, 2010; UPME, 2014; Cuéllar y Pacito, 2021). Además, los suelos de esta área podrían ser receptor de elementos potencialmente tóxicos como el Hg por eventos de inundación del río Cauca y San Jorge, que transportan estos elementos como consecuencia de actividades agrícolas, mineras e industriales (Marrugo Negrete et al., 2018a; Marrugo Negrete, 2021).

Diferentes investigaciones soportan los resultados obtenidos. Liu et al. (2014), reportaron para un sitio minero ubicado en Guilin, provincia de Guangxi, China, suelo con textura arenosa, pH ácido (3,98), bajos contenidos de P, N, MO, y CIC (8,9 cmol/kg). Velásquez et al. (2020), obtuvieron para suelos impactados por la minería de oro aluvial en la Región de Madre de Dios, Perú, una textura arenosa ( $87,36 \pm 14,92$  % partículas de arena), pH ácido ( $5,22 \pm 0,44$ ), bajos contenidos de MO ( $0,48 \pm 0,68$ %), CIC ( $6,06 \pm 3,15$  cmol/kg) y concentración de Hg de  $0,020 \pm 0,010$  mg/kg. Marrugo Madrid et al. (2021), evidenciaron para suelos impactados por la minería aurífera, en dos zonas de la vereda Valdez (Puerto Libertador, Córdoba, Colombia), pH ácido (Zona 1: 5,70; Zona 2: 4,0), bajos contenidos de MO (Zona 1: 0,68 %; Zona 2: 0,75 %), P (Zona 1 y 2: 2,5 mg/kg), CIC (Zona 1: 15,90 cmol/kg; Zona 2: 9,60 cmol/kg), y concentraciones de

Hg de 0,127 mg/kg (Zona 1) y 0,184 mg/kg (Zona 2), inferiores a las de este estudio. Marrugo Negrete et al. (2015c) y Durante et al. (2022) han reportado para áreas de minería aurífera de Colombia, concentraciones de  $1,76 \pm 0,09$  mg Hg/kg,  $1,03 \pm 0,23$  y  $1,95 \pm 0,19$  mg Hg/kg, respectivamente, similares a las obtenidas en este estudio.

En general, los suelos del área de estudio presentan signos característicos de degradación, desprovisto de cubierta vegetal (Figura 1.4), con condiciones físico químicas de una baja fertilidad del suelo, capacidad de absorción y contaminación por metales pesados (Hg) (Velásquez et al., 2020).

#### Figura 1.4.

*Suelos del área de estudio*



*Nota:* Tomado de Universidad de Córdoba (2024).

Es importante, mencionar que los parámetros fisicoquímicos obtenidos (pH ácido, bajo contenido de MO, macronutrientes, CIC y textura arenosa), propician la movilidad y biodisponibilidad del Hg presente en el suelo (Petelka et al., 2019); lo que incide en la dispersión y acumulación de este metal a suelos aledaños, vegetación y cuerpos de agua, al igual que la dinámica ambiental por condiciones climáticas (fuertes lluvias o vientos) e hidráulicas (escorrentías) del lugar. En este sentido, se convierte en un potencial foco de contaminación, que altera el equilibrio de los ecosistemas circundantes, y puede causar problemas ambientales secundarios. También, amenaza la seguridad alimentaria porque el Hg influye en la productividad de los cultivos debido a la fitotoxicidad, y se puede translocar a las partes aéreas o cosechables de las plantas, siendo un riesgo para la salud humana de la población que habita el DMI de Ayapel, por los efectos tóxicos de este metal.

Existen evidencias de explotación de oro de aluvión en 3774 ha del Distrito de Manejo Integrado de Recursos Naturales (DMI) del Complejo de Humedales de Ayapel (MinEnergía, 2022). Sin embargo, la información PAM es escasa, por lo que no se encuentran registros publicados sobre la ubicación de PAM como resultados de actividades de minería aurífera para este DMI. De esta manera, no es posible afirmar que el área de estudio sea un PAM, pero los resultados obtenidos reflejan los impactos de la minería aurífera en el suelo, siendo esto una deuda para el ambiente, teniendo en cuenta que se encuentra ubicado como parte del DMI de Ayapel, en el Sistema Nacional de Áreas Naturales Protegidas de Colombia, adicionalmente el complejo cenagoso de Ayapel se encuentra designado como sitio Ramsar mediante el Decreto No 356 de 2018 (Petelka et al., 2019). En este sentido, se hace necesario la recuperación y/o restauración de este ecosistema, mediante soluciones basadas en la naturaleza.

## 1.6. Conclusiones

La producción de oro en el departamento de Córdoba ha sido significativa para el sector minero energético de Colombia; sin embargo, la

mayoría de las evidencias de explotación de oro se encuentran en categoría ilícita, lo que no permite tener un mayor control y monitoreo por parte de las autoridades competentes sobre el uso sostenible y óptimo de estos sitios al final de las actividades mineras, resultando en el abandono de los sitios sin un plan de cierre que garantice la medidas de compensación y mitigación de las áreas impactadas por los procesos mineros. Adicionalmente, estos sitios, aunque algunos se encuentren registrados como áreas mineras abandonas (AMAs), la información es escasa, lo que incide en la declaración de pasivos ambientales como resultado de la minería aurífera.

Los resultados obtenidos para el área de estudio en el Distrito de Manejo Integrado de Recursos Naturales del Complejo de Humedales de Ayapel, demostraron la degradación y contaminación de suelos por Hg como efecto de las actividades de minería aurífera; ocasionando un deterioro de los servicios ecosistémicos que ofrece este recurso. También, estos suelos son un riesgo para la salud humana y ambiental, y amenazan la seguridad alimentaria y los medios de vida sostenibles de la zona.

Por último, en función de los hallazgos del estudio de caso se espera un mayor desarrollo de metodologías para la declaración de PAM; que permitan garantizar la recuperación de estos ecosistemas degradados, y promover el control y monitoreo de los sitios mineros que se encuentran operando, para evitar áreas abandonas sin un plan de cierre adecuado.

## 1.7. Agradecimientos

Este trabajo fue apoyado por el proyecto titulado “Implementación de una estrategia sostenible en la recuperación de ecosistemas degradados y contaminados con mercurio generados por la minería aurífera en los departamentos de Córdoba, Sucre y Choco”. Código BPIN 2020000100055. Los autores también agradecen el apoyo del Departamento de Química, Grupo de Química del Agua, Aplicada y Ambiental de la Universidad de Córdoba, Colombia.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Betancur Corredor, B., Loaiza Usuga, J., Denich, M., & Borgemeister, C. (2018). Gold mining as a potential driver of development in Colombia: Challenges and opportunities. *Journal of Cleaner Production*, 199, 538–553. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.142>
- Buchman, M. (2008). *Screening Quick Reference Tables (SQuiRTs) (NOAA OR & R Report No. 08-1)*. National Oceanic and Atmospheric Administration, Office of Response and Restoration. <https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/9327>
- Burgos, S., Navarro, A., Marrugo, J., Enamorado, G., & Urango, I. (2017). Polycyclic aromatic hydrocarbons and heavy metals in the Cispata Bay, Colombia: A marine tropical ecosystem. *Marine Pollution Bulletin*, 120(1-2), 379-386. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.05.016>
- Burgos, S., Marrugo, J., Navarro, A., & Urango, I. (2014). Mercury in *Pelecanus occidentalis* of the Cispata bay, Colombia. *Revista MVZ Córdoba*, 19(2), 4168-4174. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4746083>
- Calao Ramos, C., Gaviria Angulo, D., Marrugo Negrete, J., Calderón Rangel, A., Guzmán Terán, C., Martínez Bravo, C., & Mattar, S. (2021). Bats

- are an excellent sentinel model for the detection of genotoxic agents. Study in a Colombian Caribbean región. *Acta Tropica*, 224. <https://doi.org/10.1016/j.actatropica.2021.106141>
- Congreso de la República. (2001). Ley N° 685 de 2001. Por la cual se expide el Código de Minas y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial.
- Congreso de la República. (2023). Ley N°2327 de 2023. Por medio de la cual se establece la definición de pasivo ambiental, se fijan lineamientos para su gestión y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial.
- Contraloría General del Departamento de Córdoba. (2010). *Queja N° 037 “Presunto daño al recurso natural por caer residuos en la ciénaga de Ayapel, producto de la extracción de oro, municipio de Ayapel”*. [Informe]. <https://es.scribd.com/document/388078175/Informe-Final-Oro-Ayapel-1>
- Contraloría General de la República de Colombia. (2021). *Auditoría de desempeño pasivos ambientales mineros coordinada con la OLACEFS, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible - MADS, Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres - UNGRD, Corporaciones Autónomas Regionales y de Desarrollo Sostenible, 2015-2020* [Informe]. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/02/Informe-Auditoria-de-Desempeno-Pasivos-Ambientales-Mineros-OLACEFS-2020.pdf>
- Cruz Esquivel, Á., Marrugo Negrete, J., & Calao Ramos, C. (2019). Genetic damage in human populations at mining sites in the upper basin of the San Jorge River, Colombia. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 10961-10971. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-019-04527-1>

- Cuéllar Ramírez, C., & Pacito Mora, W. (2021). *La generación de problemas sociales como consecuencia de la minería ilegal: caso municipio de Ayapel en el período 2015-2018* [Tesis de grado, Universidad Cooperativa de Colombia]. <https://repository.ucc.edu.co/entities/publication/ab572dfb-f3b3-43e8-b31e-b946e9a90e0b>
- Durante Yáñez, E., Martínez Macea, M., Enamorado Montes, G., Combatt Cabello, G., & Marrugo Negrete, J. (2022). Phytoremediation of Soils Contaminated with Heavy Metals from Gold Mining Activities Using *Clidemia sericea* D. Don. *Plants*, 11(5). <https://doi.org/10.3390/plants11050597>
- Driscoll, C., Mason, R., Chan, H., Jacob, D., & Pirrone, N. (2013). Mercury as a Global Pollutant: Sources, Pathways, and Effects. *Environ. Sci. Technol.* 47(10), 4967–4983. <https://doi.org/10.1021/es305071v>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2024). *Manejo de suelos problemáticos: Suelos arenosos*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://www.fao.org/soils-portal/soil-management/manejo-de-suelos-problematicos/suelos-arenosos/es/>
- Gracia, L., Marrugo, J., & Alvis, E. (2010). Contaminación por mercurio en humanos y peces en el municipio de Ayapel, Córdoba, Colombia, 2009. *Rev. Fac. Nac. Salud Pública*. 28(2), 118-124. <https://revistas.udea.edu.co/index.php/fnsp/article/view/1753/6641>
- Guan, L. (2006). *General soil science*. Agriculture Press (in Chinese). Beijing: China.
- Huang, J., & Hartemink, A. (2020). Soil and environmental issues in sandy soils. *Earth-Science Reviews*, 208. <https://doi.org/10.1016/j.earsci-rev.2020.103295>

- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). (2013). *NTC 5403:2021 Calidad del suelo. Determinación del carbono orgánico*. <https://tienda.icontec.org/gp-calidad-del-suelo-determinacion-del-carbono-organico-ntc5403-2021.html>
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2006). *Métodos analíticos del laboratorio de suelos*. Sexta Bogotá D. C. Colombia.
- Liu, J., Zhang, X., Li, T., Wu, Q., & Jin, Z. (2014). Soil characteristics and heavy metal accumulation by native plants in a Mn mining area of Guangxi, South China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 186, 2269-2279. <https://doi.org/10.1007/s10661-013-3535-2>
- López Sánchez, L., López Sánchez, M., & Medina Salazar, G. (2017). La prevención y mitigación de los riesgos de los pasivos ambientales mineros (PAM) en Colombia: una propuesta metodológica. *Entramado*, 13(1), 78–91. <https://doi.org/10.18041/entramado.2017v13n1.25138>
- Madero, A., & Marrugo, J. (2011). Detección de metales pesados en bovinos, en los valles de los ríos Sinú y San Jorge, departamento de Córdoba, Colombia. *Revista MVZ Córdoba*, 16(1), 2391-2401. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3682346>
- Marrugo, J., Lans, E., & Benítez, L. (2007) Hallazgo de mercurio en peces de la Ciénaga de Ayapel, Córdoba, Colombia. *Revista MVZ Córdoba*, 12(1). <https://doi.org/10.21897/rmvz.432>
- Marrugo Madrid, S., Turull, M., Montes, G., Pico, M., Marrugo Negrete, J., & Díez, S. (2021). Phytoremediation of mercury in soils impacted by gold mining: a case-study of Colombia. *Bioremediation for Environmental Sustainability*, 145-160. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820524-2.00007-9>

- Marrugo Negrete, J., Benítez, L., Olivero, J., Lans, E., & Vazquez, F. (2010). Spatial and seasonal mercury distribution in the Ayapel Marsh, Mojana region, Colombia. *Int. J. Environ. Health Res.* 20(60), 451-459. <https://doi.org/10.1080/09603123.2010.499451>
- Marrugo Negrete, J., Durango, J., Pinedo, J., Olivero, J., & Díez, S. (2015a). Phytoremediation of mercury-contaminated soils by *Jatropha curcas*. *Chemosphere*, 127, 58-63. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.12.073>
- Marrugo Negrete, J., Olivero, J., Lans, E., Benitez, L. (2008). Total mercury and methylmercury concentrations in fish from the Mojana region of Colombia. *Environ. Geochem. Health.* 30(1), 21-30. <https://doi.org/10.1007/s10653-007-9104-2>
- Marrugo Negrete, J., Marrugo, S., Pinedo, J., Durango, J., & Díez, S. (2016). Screening of native plant species for phytoremediation potential at a Hg-contaminated mining site. *Sci. Total Environ.* 542(A), 809-816. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.10.117>
- Marrugo Negrete, J., Navarro Frómeta, A. & Ruiz Guzmán, J. (2015c). Total mercury concentrations in fish from Urrá reservoir (Sinú river, Colombia). Six years of monitoring. *Revista MVZ Córdoba*, 20(3), 4754-4765. <https://doi.org/10.21897/rmvz.45>
- Marrugo Negrete, J., Pinedo, J., & Díez, S. (2015b). Geoquímica del mercurio en pantanos tropicales impactados por la minería de oro. *Quimósfera*, 134, 44-51. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.03.012>
- Marrugo Negrete, J., Pinedo, J., & Díez, S. (2017). Assessment of heavy metal pollution, spatial distribution and origin in agricultural soils along the Sinú River Basin, Colombia. *Environ. Res.* 154, 380-388. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.01.021>

- Marrugo Negrete, J., Pinedo, J., Marrugo, S., & Díez, S. (2021). Assessment of trace element pollution and ecological risks in a river basin impacted by mining in Colombia. *Environ Sci Pollut Res Int*. 28(1), 201-210. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10356-4>
- Marrugo Negrete, J., Pinedo, J., Paternina, R., Quiroz, L., & Pacheco, S. (2018a). Distribución espacial y evaluación de la contaminación ambiental por mercurio en la región de la Mojana, Colombia. *Revista MVZ Córdoba*, 23(S), 7062-7075. <https://doi.org/10.21897/rmvz.1481>
- Marrugo Negrete, J., Ruiz, J., & Ruiz, A. (2018b). Biomagnification of Mercury in Fish from Two Gold Mining-Impacted Tropical Marshes in Northern Colombia. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 74(1), 121-130. <https://doi.org/10.1007/s00244-017-0459-9>
- Marrugo Negrete, J., Vargas Licon, S., Ruiz Guzmán, J., Marrugo Madrid, S., Bravo, A., & Díez, S. (2020). Human health risk of methylmercury from fish consumption at the largest floodplain in Colombia. *Environ. Res.* 182. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.109050>
- Maurya, S., Abraham, J., Somasundaram, S., Toteja, R., Gupta, R., & Makhija, S. (2020). Indicators for assessment of soil quality: a mini-review Indicators for assessment of soil quality: a mini-review. *Environ Monit Assess.* 192. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08556-z>
- Ministerio de Minas y Energía (MinEnergía). (2020). Colombia. *Explotación de oro de aluvión. Evidencias a partir de percepción remota 2019*. Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito (UNODC). [https://www.unodc.org/documents/colombia/2020/Octubre/Informe\\_EVOA\\_2019\\_ESP\\_B.pdf](https://www.unodc.org/documents/colombia/2020/Octubre/Informe_EVOA_2019_ESP_B.pdf)

- Ministerio de Minas y Energía (MinEnergía). (2021). Colombia. *Explotación de oro de aluvión. Evidencias a partir de percepción remota 2020*. Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito (UNODC). [https://www.unodc.org/documents/colombia/2021/Julio/EVOA\\_2020\\_Web.pdf](https://www.unodc.org/documents/colombia/2021/Julio/EVOA_2020_Web.pdf)
- Ministerio de Minas y Energía (MinEnergía). (2022). Colombia. *Explotación de oro de aluvión. Evidencias a partir de percepción remota 2021*. Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito (UNODC). [https://www.unodc.org/documents/colombia/2022/Junio/Informe\\_Colombia\\_Explotacion\\_de\\_Oro\\_de\\_Aluvion\\_Evidencias\\_a\\_Partir\\_de\\_Percepcion\\_Remota\\_2021\\_SP\\_.pdf](https://www.unodc.org/documents/colombia/2022/Junio/Informe_Colombia_Explotacion_de_Oro_de_Aluvion_Evidencias_a_Partir_de_Percepcion_Remota_2021_SP_.pdf)
- Murillo, D., León, D., & Jiménez, C.(2017). Passive Samplers Deployment in the Ayapel Swamp for Monitoring Temporal Dynamics of Mercury in the Water Column. *Journal of Water Resource and Protection*, 9(8), 873-880. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2017.98058>
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2021). *Exposición al mercurio: un asunto importante para la salud pública. Prevención de enfermedades a través de ambientes saludables*. 2da ed. <https://www.who.int/es/publications/i/item/9789240023567>
- Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2021). Convenio de Minamata sobre el Mercurio – Textos y anexos. <https://minamataconvention.org/es/resources/convenio-de-minamata-sobre-el-mercurio-textos-y-anexos>
- Pedraza, M., & Espinosa, A. (2022). El legado del arsénico y mercurio en el complejo cenagoso Ramsar de Ayapel, (Córdoba, Colombia): aproximación a la macrocuenca Magdalena-Cauca. *Acta Biológica Colombiana*, 27(2), 164–176. <https://doi.org/10.15446/abc.v27n2.89084>

- Petelka, J., Abraham, J., Bockreis, A., Deikumah, J., & Zerbe, S. (2019). Soil Heavy Metal (loid) Pollution and Phytoremediation Potential of Native Plants on a Former Gold Mine in Ghana. *Water, Air, & Soil Pollution*, 230. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11270-019-4317-4>
- Qureshi, A. (2022). Mercury in the Environment Around Industrially Impacted Locations in India: A Mini-Review. *Bull Environ Contam Toxicol*. 109(6), 937-942. <https://doi.org/10.1007/s00128-022-03548-w>
- Registro Único Nacional de Áreas Protegidas (RUNAP). (2011). *Distrito Regional de Manejo Integrado - Sitio Ramsar del Complejo de Humedales de Ayapel*. <https://runap.parquesnacionales.gov.co/area-protegida/537>
- Sako, A., Semdé, S., & Wenmenga, U. (2018). Geochemical evaluation of soil, surface water and groundwater around the Tongon gold mining area, northern Côte d'Ivoire, West Africa. *Journal of African Earth Sciences*. 145, 297–316. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2018.05.016>
- Sistema de Información Minero Colombiano (SIMCO). (2022). *Áreas Mineras en Estado de Abandono - AMEAs*. <https://public.tableau.com/app/profile/upme/viz/SIMCOInventarioAMEAs/Dashboard1>
- Tandon, H. (2006). *Methods of analysis of soils, plants, waters, fertilisers & organic manures*. New Delhi: Fertiliser Development and Consultation Organization.
- Torrance, K., Redwood, S., & Cecchi, A. (2021). The impact of artisanal gold mining, ore processing and mineralization on water quality in Marmato, Colombia. *Environ Geochem Health*, 43(10), 4265–82. <https://doi.org/10.1007/s10653-021-00898-y>

- Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). (2014). *Estudio de la cadena del mercurio en Colombia con énfasis en la actividad minera de oro*. Tomo 3. <http://bdigital.upme.gov.co/handle/001/1315>
- Universidad de Córdoba. (2024). Implementación de una estrategia sostenible en la recuperación de ecosistemas degradados y contaminados con mercurio generado por la minería aurífera en los departamentos de Córdoba, Sucre, Chocó. Proyecto BPIN 2020000100055. [https://toxicologiaambiental.com/proyecto\\_fitorremediacion/](https://toxicologiaambiental.com/proyecto_fitorremediacion/)
- U.S. Environmental Protection Agency. (2007). *Method 7473: Mercury in solids and solutions by thermal decomposition, amalgamation, and atomic absorption spectrophotometry*. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-12/documents/7473.pdf>
- Velásquez Ramírez, M., Guerrero Barrantes, J., Thomas, E., Gamarra Miranda, L., Pillaca, M., & Tello, Peramas, L. (2020). Heavy metals in alluvial gold mine spoils in the peruvian amazona. *Catena*, 189. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104454>
- Zapata, L., Bock, B., & Palacio, J. (2014). Mercury concentrations in tissues of Colombian slider turtles, *Trachemys callirostris*, from northern Colombia. *Bull Environ. Contam. Toxicol.* 92(5), 562-566. <https://doi.org/10.1007/s00128-014-1198-5>