

Research Article

Toxicity of Metals from the Mining Industry in Latin American Countries

Toxicidad de los Metales de la Industria Minera en Países Latinoamericanos

Jessica Arcos*, Nayely Jara, González Josselyn

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Morona Santiago, Ecuador

ORCID

Jessica Arcos: <https://orcid.org/0000-0002-9462-2219>

INDEXACIÓN II CONGRESO
INTERNACIONAL DE
CIENCIA Y TECNOLOGIA
MORONA SANTIAGO
CICTMS 2021

Corresponding Author:
Jessica Arcos; email:
paola.arcos@epoch.edu.ec

Published: 18 April 2024

Production and Hosting by
Knowledge E

© Jessica Arcos et al. This article is distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution License](#), which permits unrestricted use and redistribution provided that the original author and source are credited.

Abstract

Lead (Pb) and mercury (Hg) are widely recognized as global pollutants that constitute public health problems. This literature review encourages collaborative research in countries with minimal information on the subject and highlights the need for legislation and educational efforts to stop anthropogenic activities that expose Latin American populations. The evidence compiled based on the analysis of 59 documents including books, standards, specialized magazines, etc., presents the reality of the mining industry in countries such as Colombia, Chile, Ecuador, and Peru, with Chile standing out as a producer of Cu and Pb, followed by Peru as the main exporter of Hg. Regarding environmental contamination, the contamination of soil and water in the four countries by Pb, Cu, Hg, among others, were quite evident, concerning a health risk either by exposure or ingestion.

Keywords: *toxicity, heavy metals, mining.*

Resumen

El plomo (Pb) y el mercurio (Hg) son metales ampliamente reconocidos como contaminantes globales, que constituyen problemas de salud pública. Esta revisión bibliográfica alienta la realización de investigaciones colaborativas en países con información mínima sobre el tema, y destaca la necesidad de crear una legislación y esfuerzos educativos para detener las actividades antropogénicas que exponen a las poblaciones latinoamericanas. La evidencia recopilada basada en el análisis de 59 documentos entre los que figuran libros, normas, revistas especializadas, etc, presenta la realidad de la industria minera de países como Colombia, Chile, Ecuador y Perú, destacándose Chile como productora de Cu y Pb, seguido de Perú como principal exportador de Hg. En cuanto a la contaminación ambiental, en los cuatro países la contaminación de suelo y agua por Pb, Cu, Hg, entre otros, es evidente siendo un riesgo para la salud ya sea por exposición o ingestión.

Palabras Clave: *toxicidad, metales pesados, minería.*

 OPEN ACCESS



1. Introducción

Las evaluaciones de riesgos ambientales y las intervenciones para mitigar los riesgos ambientales son esenciales para proteger la salud pública. Si bien la medición objetiva de los peligros ambientales es importante, también es fundamental abordar la percepción subjetiva de los riesgos para la salud. La percepción de una población de los peligros para la salud ambiental es una poderosa fuerza impulsora para la acción y la participación en comportamientos de seguridad y salud y también puede informar el desarrollo de políticas de salud ambiental efectivas y más sostenibles. Hasta la fecha, no se dispone de instrumentos para evaluar la percepción de riesgo de los peligros para la salud ambiental en América del Sur, a pesar de que hay muchos temas preocupantes en la región, incluida la minería.

La percepción de los riesgos debidos a la contaminación ambiental es un área de creciente interés para la comunidad y los tomadores de decisiones. Los principales temas para las comunidades desarrolladas han sido la exposición a bajas dosis de radiación, aditivos alimentarios y la manipulación genética de plantas y animales, entre otros. Si bien algunos países (Estados Unidos, Francia, Japón, Suecia, Noruega, Australia, Inglaterra) han logrado la aplicabilidad de los resultados de la investigación en la percepción del riesgo en la toma de decisiones, sus experiencias no se aplican a los países latinoamericanos como Colombia, Chile, Ecuador, Perú y México, donde los factores estructurales y las estructuras de valores difieren. Sin embargo, la recopilación de información de estos países nos abre las puertas a conocer nuevos proyectos que se están dando en la actualidad para la remediación de la contaminación de la industria minera sin dejar de señalar las inconsistencias y vacíos en la legislación ambiental.

2. Materiales y métodos

La metodología aplicada en el presente trabajo de revisión bibliográfica está constituida por las etapas que se describen a continuación:

Definición del problema

Como tema se definió “Toxicidad de los metales de la industria minera en países latinoamericanos”

Búsqueda de la información

Una vez definido el problema a investigar, se consultaron diferentes fuentes de información, entre normas, reportes técnicos, patentes, revistas especializadas, memorias de conferencias y simposios y tesis doctorales; empleando términos claves como



“toxic”, “metals”, “cadmi”, “cadmium”, “lead”, combinándose en ecuaciones de búsqueda que generaron diferentes resultados.

Organización de la información

Para la organización la información se realizaron agrupaciones en función de temáticas, utilizando por el software Mendeley y Zotero para realizar la gestión de la bibliografía.

Análisis de la información

Se analizaron un total de 59 documentos entre los que figuran libros, normas, revistas especializadas, memorias de conferencias y simposios y tesis doctorales, se analizaron los aspectos más importantes y las ideas más relevantes al tema propuesto en el presente estudio.

3. Resultados

3.1. COLOMBIA

La minería en Colombia en la última década ha tenido un auge por inversores extranjeros que contribuyen en IVA con un 30% en 2015, sin embargo, estas actividades tienen poco control y una falta de conocimiento de los impactos ambientales por parte de la comunidad por esta actividad. (1) En Colombia, diversos estudios realizados durante la última década han demostrado altas concentraciones de elementos potencialmente tóxicos (PTE) en los suelos de los yacimientos de oro ((2); (3); (4); (5); (6)).

Los PTE más comunes en suelos contaminados por procesos de extracción de oro son Hg, Pb y Cd ((7); (8)). La acumulación en los suelos provoca alteraciones en sus propiedades físicas, químicas y biológicas, provocando el deterioro de los servicios ecosistémicos que proporciona este recurso natural no renovable ((9); (10) (11)), convirtiéndose en un riesgo para la seguridad alimentaria debido a los efectos tóxicos generados por estos elementos en la salud humana (12).

3.1.1. Ambiente

Contaminación del suelo

La presencia de metales pesados en los suelos ha incrementado en las últimas décadas por actividades agrícolas (13). La acumulación de estos metales se debe por actividades antropogénicas ocasionando afectaciones en la calidad del agua subterránea y los cultivos a través de la cadena alimenticia. (14)



En la actualidad, se ha demostrado que la fitorremediación es una técnica efectiva, respetuosa con el medio ambiente, no invasiva, estéticamente agradable y económicamente viable para remediar los suelos contaminados con PTE ((15); (16)). Esta tecnología se basa en el uso de plantas capaces de tolerar, acumular, eliminar o inmovilizar contaminantes como los PTE.

Marrugo-Madrid et al. (2021) confirmaron que *C. serícea* podría emplearse como especie para la remediación de suelos contaminados debido a su tolerancia y patrón de acumulación de PTE, demostrando el potencial para el área de fitorremediación. Como planta que crece naturalmente en suelos contaminados cerca de áreas de extracción de oro, podría haber diferentes mecanismos y adaptaciones que promuevan la acumulación de metales y la resistencia de las plantas, mejorando el proceso de remediación (17).

Contaminación del agua

En el municipio de Suárez hay un gran territorio dedicado a minería artesanal, por lo tanto, se completa un estudio regional. (Marrugo- Negrete et al. 2016) (18) determinaron la huella hídrica gris (GWF) en 6 lechos dedicados a la minería artesanal de oro, en el municipio de Suárez, Cauca, Colombia asociados con altos contenidos de TSS (Sólidos suspendidos totales) y Hg (Mercurio).

Los resultados mostrados indicaron que el mayor problema en los altos niveles de GWF por parte de las actividades artesanales de extracción de oro está relacionado con el vertido de sólidos en suspensión totales y en menor medida el vertido de mercurio, sin embargo, el volumen de agua necesario para asimilar la carga contaminante de mercurio sigue siendo alto, por lo que se recomienda la implementación de tecnologías limpias y el no uso de Hg, además de la construcción sistemas de tratamiento.

Marrugo-Negrete et al. (19) evaluaron la calidad del agua en cinco cauces naturales correspondientes a cuatro arroyos con operaciones de extracción de oro y uno en el río Cauca, tomando muestras antes de la entrada de agua y después de la salida en cada operación en los arroyos de Dios Te Dé, Tamboral, Piedra Imán y Lorenzo afectados por la labor artesanal de extracción de oro. que desembocan en el embalse salvajina en el río Cauca en el municipio de Suárez Cauca, Colombia.

Los resultados muestran que los contaminantes asociados con Hg son altos en las estaciones de muestreo en la salida de las operaciones y las estaciones de muestreo de las corrientes con influencia en las operaciones. El puntaje de calidad del agua según el índice ICA IDEAM varió entre aceptable y regular en las diferentes estaciones de muestreo.



3.1.2. Salud

La cuenca del río Atrato es una de las zonas con mayor biodiversidad a nivel mundial, y paradójicamente, es uno de los sitios en Colombia con mayor impacto ambiental de la minería de oro. (Durante-Yáñez et al. 2022) (20) evaluaron la distribución de Hg, As, Pb y Cd en 47 especies de peces y el riesgo acumulativo para la salud humana en habitantes de 13 municipios ubicados a lo largo de la cuenca del río Atrato. Los resultados revelaron que el Hg y el As en los peces presentan un alto riesgo potencial para la salud humana en función de sus concentraciones medias. Los cálculos de la ingesta diaria estimada (EDI) mostraron que los seres humanos podrían presentar efectos perjudiciales para la salud, mientras que ese cociente de peligro objetivo (THQ) por encima de 1 mostró que la población expuesta podría experimentar riesgos para la salud no cancerígenos, principalmente por los efectos acumulativos de Hg (80,4%) y As (18,2%).

Olivero Jesús (21) menciona que el mercurio elemental es el principal tóxico al que están expuestos los mineros auríferos donde el 80% es absorbido por los pulmones y posteriormente distribuidos a todos los órganos del cuerpo. El daño neurológico por la toxicidad de mercurio es el más importante especialmente en los niños (22).

3.2. ECUADOR

Entre 2008 y 2009, el gobierno ecuatoriano redefinió las políticas para promover el crecimiento del sector minero (Banco Central del Ecuador (BCE) 2020) (23). Durante el período 2008-2018, las exportaciones mineras aumentaron en un 86%, posicionándose como el cuarto producto de exportación en Ecuador. Dada la importancia de la minería de oro para la economía de Ecuador y la proliferación de concesiones mineras, la información sobre los impactos ambientales causados por esta actividad es crucial. Los ecosistemas en los Andes orientales de Ecuador, en las transiciones con la Amazonía, se han visto afectados en gran medida por las actividades mineras de oro ((24); (25)).

Estudios realizados en Zaruma y Portovelo muestran concentraciones que superan los límites estipulados en la norma ambiental ecuatoriana niveles de plomo (Pb) (1796.8-4060.0 mg/Kg), arsénico (As) (396.0-8800.0 mg/Kg), zinc (Zn) (513.0-2670.0 mg/Kg), cadmio (Cd) (27.0-44.1 mg/Kg), y mercurio (Hg) (1.0-35.9 mg/Kg). (26)

3.2.1. Ambiente

Contaminación del suelo



González-Valoys et al. (27) tomaron muestras de agua y sedimentos en 11 sitios potencialmente afectados por las actividades mineras de oro en la provincia de Napo. Los impactos ambientales se evaluaron utilizando las líneas de evidencia (LOE), con *Lactuca sativa* y *Daphnia magna*. La germinación de semillas de *L. sativa* tanto en agua (37% a 70%) como en sedimentos (0% a 65%) indica una toxicidad significativa. En cinco sitios, los neonatos de *D. magna* mostraron una reducción del 25% en la supervivencia en comparación con el control. El índice integrado de LOE clasificó los sitios con respecto a su degradación ambiental.

Ferrante y Fearnside (28) dieron la evaluación preliminar del riesgo asociado con la presencia de pasivos ambientales mineros en tres áreas mineras artesanales y de pequeña escala de minería de oro de Ecuador. Según los resultados, Puyango y Tenguel-Ponce Enríquez parecen ser las zonas mineras más afectadas por la presencia de MEL, principalmente depósitos de residuos y entradas a minas. Los vertederos, relaves y entradas a minas presentan un riesgo medio para las personas y el medio ambiente debido al contenido de elementos potencialmente tóxicos.

Contaminación del agua

La cuenca del Amazonas se ha visto históricamente afectada por las actividades mineras ((24); (29); (30)). Los suelos minerales subyacentes a los bosques amazónicos contienen niveles elevados de oro, cuya explotación resulta en modificaciones intensivas del uso de la tierra (31) y contaminación del agua dulce con relaves mineros ((32); (29)). Las áreas mineras se están expandiendo en áreas protegidas y no protegidas de la Amazonía debido a los incentivos gubernamentales ((33); (34); (35)). Además, la minería ilegal se ha expandido recientemente en varias partes de la cuenca del Amazonas, lo que ha resultado en un impacto ambiental cuya extensión es difícil de determinar.

En el sur del Ecuador varios yacimientos mineros se encuentran en zonas con gran biodiversidad generando fragilidad y riesgos, en nacimientos de agua utilizados para consumo humano, agricultura y trabajos mineros que son descargados directamente a los ríos y quebradas (36).

3.2.2. Salud

La minería de oro tradicional, que utiliza mercurio metálico (Hg) para formar amalgama de oro, seguida de la quema para eliminar el Hg, es ampliamente utilizada en América del Sur, África y Asia. El oro se vende a los comerciantes que lo queman de nuevo para eliminar el Hg restante (Adler Miserendino et al. 2013).

En Ecuador, Roy et al. (2018) (29) estudiaron 200 mineros de oro, 37 comerciantes de oro y 72 referentes. los comerciantes de oro tienen una exposición estadísticamente



significativa al mercurio (Hg) más alta que los mineros. Las concentraciones medias de Hg de los referentes en la orina y la sangre total fueron más bajas que las de los comerciantes y mineros de oro. La exposición al Hg se asoció con efectos neurotóxicos: estabilidad postural, frecuencia central del temblor y tiempo de reacción. El metabolismo del Hg fue modificado por polimorfismo en un gen de una enzima en la síntesis de glutatión (GCLM).

3.3. CHILE

3.3.1. Ambiente

Contaminación del suelo

Chile es el principal productor de cobre del mundo, donde la contaminación del suelo por oligoelementos en zonas mineras ha sido severa. Se evaluó la magnitud de los riesgos ecológicos y para la salud humana derivados de la exposición al arsénico (As), cobre (Cu), zinc (Zn) y plomo (Pb) en suelos de las cuencas de La Ligua y Petorca, dos importantes áreas mineras en Chile. Se identificó Cu, As como los elementos más peligrosos en los suelos estudiados, tanto en términos de riesgos ecológicos como para la salud humana (37). Por otro lado, Chile no cuenta actualmente con una legislación específica que establezca límites legales a la contaminación del suelo con oligoelementos.

Contaminación del agua

En el norte y centro de Chile, varias operaciones mineras están ampliamente extendidas. Estas actividades generan grandes cantidades de relaves que deben eliminarse adecuadamente, con el fin de limitar los efectos en los ambientes circundantes ((38); (39)). Los desechos minerales generalmente se depositan en depósitos de desechos conocidos como almacenamiento de relaves o presas de relaves. Los relaves se caracterizan por un pH bajo, una salinidad alta y cantidades variables de metales y metaloides. Uno de los principales problemas derivados de los depósitos de relaves es la generación de drenaje ácido de minas (DMAE). La DMAE se produce por la oxidación de minerales de azufre y se caracteriza por la generación de escorrentía con pH bajo y altas concentraciones de metales pesados y metaloides ((40); (41); (42)).

La gestión adecuada de los relaves marinos permitiría dar una segunda oportunidad a los residuos mineros, con beneficios ambientales, económicos y sociales positivos. Proyectos como "Playa Verde" en Chañaral pueden ser una propuesta factible para el beneficio económico de los viejos residuos mineros, y de paso, recuperar el borde costero que se ha visto afectado durante casi cuatro décadas (43).



A pesar de que Chile ha firmado el Protocolo de Londres, es imposible prohibir la descarga de relaves mineros en el mar. Los vacíos legales han permitido la disposición de relaves en el medio marino en sitios mineros, como la Planta de Pellets en Bahía Huasco (37).

3.3.2. Salud

Taltal es una comuna ubicada en el norte de Chile, donde antiguas actividades en el procesamiento de minerales de cobre dejaron grandes cantidades de residuos mineros enriquecidos con elementos potencialmente tóxicos, PTE.

Leiva, Cayazzo, and Torres (44) realizaron una evaluación de la contaminación del suelo utilizando mapas geoquímicos y de distribución espacial. Se tomaron un total de 101 muestras de suelo circundante de 3 sitios de desechos mineros abandonados para determinar su contenido de PTE (Cu, Mo, Sb, Hg, Pb, Ni, Co, As, Mn, Cr, Cd y Zn) y elementos principales. As, Pb y Cu pueden presentar efectos no cancerígenos para adultos y niños, los valores totales de riesgo de cáncer estuvieron por encima del límite de riesgo aceptable debido a As, Cr y Cd en los tres sitios. El sitio 3, el sitio abandonado más grande, representa la principal preocupación ambiental debido a su alto volumen de residuos y contenido de PTE.

En el sector Puchuncaví existe un gran aumento de contenido de cadmio y arsénico lo que genera riesgos para la salud humana debido a sus características tóxicas y a la facilidad que tienen al ser absorbidos por las plantas y luego siendo transferido a las cadenas tróficas (45).

3.4. PERÚ

Perú es el segundo mayor productor de cobre, plata y zinc, y es el primer productor de oro, zinc, plomo y estaño en América Latina. Sin embargo, la gestión inadecuada de residuos durante la actividad minera y la falta de regulaciones claras sobre el cierre de minas han llevado a la acumulación de Pasivos Ambientales Mineros (sitios MEL) que potencialmente causan problemas ambientales y sociales (46).

3.4.1. Ambiente

Contaminación del suelo



Las muestras de suelo recolectadas alrededor por Saha y Paul (2019) (47) de dos pasivos ambientales mineros (sitios MEL) del distrito de Hualgayoc en los Andes peruanos mostraron valores de pH extremadamente ácidos. La mineralogía del suelo estaba dominada por la illita, la caolinita, el cuarzo y la jarosita, y los carbonatos estaban sistemáticamente ausentes. Monroy, Maceda-Veiga, and de Sostoa (2014) (48) evaluaron la concentración de arsénico (As), cadmio, plomo, hierro y zinc en suelos superficiales y tejidos hipocótilos comestibles de dos ecotipos de *Lepidium meyenii* Walpers (maca) en tres distritos de la provincia de Junín, Perú. El factor de bioconcentración en hipocótilos de maca varió para cada metal estudiado, mostrando Zn y Cd la mayor acumulación, pero con valores inferiores a 1 ((49); (50)).

Contaminación del agua

Cruzado-Tafur et al. (51) monitorearon los niveles de mercurio y otros metales pesados en las cabeceras del río Ramis, encontrando concentraciones muy altas de Hg y otros metales pesados en las corrientes de cabecera cerca de los centros mineros. Monroy et al. (48) determinaron las concentraciones de metales pesados en el lago Titicaca. Este estudio documentó altas concentraciones de Pb, Cu, Zn, Cd y Hg, en el agua en los puntos de descarga de los principales ríos tributarios, que superaron los umbrales de seguridad establecidos por la legislación internacional. Guittard et al. (52) caracterizaron la variabilidad de los metales traza en la cuenca del río Santa a través de un muestreo sinóptico a gran escala, encontrando concentraciones de Mn más altas que los estándares internacionales, y esto implica posibles efectos perjudiciales para la salud humana y del ecosistema.

En la microcuenca del río Huancaray Correa et al. (53) realizaron un monitoreo empleando la técnica de análisis FRX en las concentraciones de metales pesados presentes en los sedimentos del agua, donde encontraron metales como el Zn, Pb, AS, Cu que son elementos críticos y representan un grado alto de toxicidad, se estima que las fuentes contaminantes podrían ser los centros poblados que descargan aguas residuales domésticas al sur de la microcuenca y al norte las actividades ganaderas, agrícolas, pecuarias, mineras con actividades de explotación ilegal.

3.4.2. Salud

La cuenca del río Mantaro juega un papel muy importante en la economía del Perú y la producción agrícola de esta cuenca proporciona alimentos a varias regiones del país.

Bech et al. (49) evaluaron el riesgo para los seres humanos de la exposición a metales pesados y arsénico en el agua de ríos sujetos a influencia minera en los Andes Centrales del Perú. Fe, Zn y As tuvieron mayores porcentajes de contribución en los



ríos Mantaro, Cunas y Chía. El riesgo de cáncer por ingestión para los niños varió de riesgo medio a alto y para los adultos de riesgo bajo a alto.

Además, se evaluó el riesgo para la salud humana debido a la exposición a metales pesados por el consumo de maca donde recolectaron muestras de suelo e hipocótilos de maca en áreas influenciadas por la actividad minera. Las concentraciones de Cd y Pb en suelos e hipocótilos de maca amarilla y púrpura excedieron el límite permisible. La evaluación de los riesgos cancerígenos y no cancerígenos debido a la exposición a metales pesados y arsénico a través de las vías de ingestión y contacto dérmico mostró que, tanto en niños como en adultos, la vía de ingestión contribuía más al riesgo no cancerígeno y carcinogénico.

4. Discusión

El plomo, el mercurio y arsénico constituyen un problema de salud pública a nivel mundial, provocando efectos neurotóxicos, carcinogénicos y mutagénicos coincidiendo con los resultados expuestos por Molina en 2015 donde menciona que la exposición a metales pesados es un riesgo para la salud (54).

En la Amazonía ecuatoriana se han encontrado niveles alarmantes de Mercurio los cuales el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE) expone que esta problemática se afronta desde el 2008, además Villacis en 2022 menciona que la frontera minera ha aumentado considerablemente en un análisis realizado por MAATE desde octubre hasta diciembre donde la expansión minera ilegal aumento en un 87,5% (55). El mercurio al ser utilizado en la pequeña minería en grandes cantidades es dispersado y se encuentran en concentraciones considerables coincidiendo con un estudio realizado por PNUMA, que menciona que el mercurio es dispersado en los sistemas acuáticos contaminando así a la fauna y flora silvestre (56).

Los pasivos ambientales mineros se dispersan y son la fuente de contaminación del suelo. Arango y Olaya, 2012 menciona que esto se da por los cambios que produce esta actividad en el medio ambiente (57). Russi y Martiz, 2003 expone que existen consultores en América Latina que realizan el cálculo de pasivos ambientales que ayudan a la disminución y evolución de los mismo (58). Las leyes sobre el medio ambiente y el código de minería en Colombia se basa principalmente en el Art. 39 del CNRRN donde se deben controlar y prevenir los efectos nocivos que se puedan producir en el ambiente en su uso o tratamientos de minerales en aguas para que no exista contaminación en comparación con Ecuador se basa en la Ley de Gestión Ambiental en el Art. 1 donde establece los límites permisibles y el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales, mientras que la Subsecretaría de Protección



Ambiental del Ministerio de Energía y Minas actividades mineras en base al reglamento se deben realizar estudios ambientales para determinar los daños causados al ambiente (59).

5. Conclusiones

Se relacionó la toxicidad de la industria minera de cada país con la salud y medio ambiente siendo uno de los contaminantes principales el Hg debido a que se usa para el amalgamado de Au poniendo en riesgo cancerígeno y no cancerígeno a quienes tienen contacto.

Se comparó la realidad de la industria minera en los países de Colombia, Chile, Ecuador, y Perú, destacándose Chile como productora de Cobre y Plomo, seguido de Perú en donde se destaca como uno de los principales exportadores de Hg entre estos cuatro países. En cuanto a la contaminación ambiental, en los cuatro países la contaminación de suelo y agua es evidente siendo un riesgo para la salud ya sea por exposición o ingestión.

Se interpretó la situación de los países latinoamericanos frente a la contaminación minera, donde se destaca la importancia de regulaciones claras para proteger el medio ambiente y los residentes de las comunidades mineras, asegurando la sostenibilidad del ecosistema, las poblaciones y la industria minera.

Se concluyó que los sitios de desechos mineros abandonados han llevado a una contaminación sustancial de los suelos circundantes con As, Cu, Pb, Cr y Cd, que exceden las concentraciones de riesgo ecológico y de salud humana.

Conflicto de Intereses

No existe conflictos de intereses por parte de los autores o de la entidad científica que pudiesen afectar directa o indirectamente a los resultados de la investigación.

References

- [1] Chacón y Acosta - 2016 - Evaluación de *Lactuca sativa* e *Hydra attenuata* com.pdf [Internet]. [citado 20 de noviembre de 2022]. Disponible en: <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/57875/13.%20TRABAJ%20GRADO.%20VERSION%20FINAL.pdf?sequence=1&isAllowed=y>



- [2] Gallo Corredor JA, Humberto Pérez E, Figueroa R, Figueroa Casas A. Water quality of streams associated with artisanal gold mining; Suárez, Department of Cauca, Colombia. *Heliyon* [Internet]. 1 de junio de 2021 [citado 27 de noviembre de 2022];7(6):e07047. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844021011506>
- [3] Gallo Corredor JA, Lizeth Vargas González G, Velasco Granados M, Gutiérrez L, Pérez EH. Use of the gray water footprint as an indicator of contamination caused by artisanal mining in Colombia. *Resources Policy* [Internet]. 1 de octubre de 2021 [citado 27 de noviembre de 2022];73:102197. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301420721002117>
- [4] Salazar-Camacho C, Salas-Moreno M, Marrugo-Madrid S, Paternina-Urbe R, Marrugo-Negrete J, Díez S. A human health risk assessment of methylmercury, arsenic and metals in a tropical river basin impacted by gold mining in the Colombian Pacific region. *Environmental Research* [Internet]. 1 de septiembre de 2022 [citado 27 de noviembre de 2022];212:113120. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013935122004479>
- [5] Sarwar N, Imran M, Shaheen MR, Ishaque W, Kamran MA, Matloob A, et al. Phytoremediation strategies for soils contaminated with heavy metals: Modifications and future perspectives. *Chemosphere* [Internet]. 1 de marzo de 2017 [citado 27 de noviembre de 2022];171:710-721. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653516318574>
- [6] Wan X, Lei M, Chen T. Cost–benefit calculation of phytoremediation technology for heavy-metal-contaminated soil. *Science of the Total Environment* [Internet]. 1 de septiembre de 2016 [citado 27 de noviembre de 2022];563-564:796-802. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969715312377>
- [7] Liu L, Li W, Song W, Guo M. Remediation techniques for heavy metal- contaminated soils: Principles and applicability. *Science of the Total Environment* [Internet]. 15 de agosto de 2018 [citado 27 de noviembre de 2022];633:206-219. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969718309215>
- [8] Saleem MH, Ali S, Rehman M, Rana MS, Rizwan M, Kamran M, et al. Influence of phosphorus on copper phytoextraction via modulating cellular organelles in two jute (*Corchorus capsularis* L.) varieties grown in a copper mining soil of Hubei Province, China. *Chemosphere* [Internet]. 1 de junio de 2020 [citado 27 de noviembre de 2022];248:126032. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653520302253>



- [9] Saleem MH, Ali S, Rehman M, Rana MS, Rizwan M, Kamran M, et al. Influence of phosphorus on copper phytoextraction via modulating cellular organelles in two jute (*Corchorus capsularis* L.) varieties grown in a copper mining soil of Hubei Province, China. *Chemosphere* [Internet]. 1 de junio de 2020 [citado 27 de noviembre de 2022];248:126032. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653520302253>
- [10] Avila PF, Coelho P, Candeias C. Mining activities: Health impacts. [citado 27 de noviembre de 2022]; Disponible en: https://www.academia.edu/37705971/Mining_Activities_Health_Impacts
- [11] Sabir A, Naveed M, Bashir MA, Hussain A, Mustafa A, Zahir ZA, et al. Cadmium mediated phytotoxic impacts in Brassica napus: Managing growth, physiological and oxidative disturbances through combined use of biochar and Enterobacter sp. MN17. *Journal of Environmental Management* [Internet]. 1 de julio de 2020 [citado 27 de noviembre de 2022];265:110522. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479720304564>
- [12] Gyamfi E, Appiah-Adjei EK, Adjei KA. Potential heavy metal pollution of soil and water resources from artisanal mining in Kokoteasua, Ghana. *Groundwater for Sustainable Development* [Internet]. 1 de abril de 2019 [citado 27 de noviembre de 2022];8:450-456. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352801X18301607>
- [13] Cortés L, Martín F, Sarria M. Evaluación de la toxicidad de metales pesados en dos suelos agrícolas de Colombia mediante bioensayos. *Temas Agrarios* [Internet]. 10 de julio de 2017 [citado 19 de noviembre de 2022];22(2):43-53. Disponible en: <https://revistas.unicordoba.edu.co/index.php/temasagrarios/article/view/943>
- [14] Marrugo-Negrete J, Pinedo-Hernández J, Díez S. Assessment of heavy metal pollution, spatial distribution and origin in agricultural soils along the Sinú River Basin, Colombia. *Environmental Research* [Internet]. 1 de abril de 2017 [citado 19 de noviembre de 2022];154:380-388. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013935116309562>
- [15] Kahangwa CA, Nahonyo CL, Sangu G, Nassary EK. Assessing phytoremediation potentials of selected plant species in restoration of environments contaminated by heavy metals in gold mining areas of Tanzania. *Heliyon* [Internet]. 1 de septiembre de 2021 [citado 27 de noviembre de 2022];7(9):e07979. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S240584402102082X>
- [16] Valentim dos Santos J, Varón-López M, Fonsêca Sousa Soares CR, Lopes Leal P, Siqueira JO, de Souza Moreira FM. Biological attributes of rehabilitated soils



- contaminated with heavy metals. *Environmental Science and Pollution Research* [Internet]. 1 de abril de 2016 [citado 27 de noviembre de 2022];23(7):6735-6748. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5904-6>
- [17] Marrugo-Madrid S, Turull M, Montes GE, Pico MV, Marrugo-Negrete JL, Díez S. Chapter 7 - Phytoremediation of mercury in soils impacted by gold mining: a case- study of Colombia. En: Saxena G, Kumar V, Shah MP, editores. *Bioremediation for Environmental Sustainability* [Internet]. Elsevier; 2021 [citado 27 de noviembre de 2022]. p. 145-160. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128205242000079>
- [18] Marrugo-Negrete J, Marrugo-Madrid S, Pinedo-Hernández J, Durango-Hernández J, Díez S. Screening of native plant species for phytoremediation potential at a Hg-contaminated mining site. *Science of the Total Environment* [Internet]. 15 de enero de 2016 [citado 27 de noviembre de 2022];542:809-816. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969715309335>
- [19] Marrugo-Negrete J, Durango-Hernández J, Pinedo-Hernández J, Olivero-Verbel J, Díez S. Phytoremediation of mercury-contaminated soils by *Jatropha curcas*. *Chemosphere* [Internet]. 1 de mayo de 2015 [citado 27 de noviembre de 2022];127:58-63. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004565351401515X>
- [20] Durante-Yáñez EV, Martínez-Macea MA, Enamorado-Montes G, Combatt Caballero E, Marrugo-Negrete J. Phytoremediation of soils contaminated with heavy metals from gold mining activities using *Clidemia sericea* D. Don. *Plants* [Internet]. enero de 2022 [citado 27 de noviembre de 2022];11(5):597. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2223-7747/11/5/597>
- [21] Verbel JO. EFECTOS DE LA MINERÍA EN COLOMBIA SOBRE LA SALUD HUMANA. :36.
- [22] Fernandes Azevedo B, Barros Furieri L, Peçanha FM, Wiggers GA, Frizera Vassallo P, Ronacher Simoes M, et al. Toxic effects of mercury on the cardiovascular and central nervous systems. *J Biomed Biotechnol*. 2012;2012:949048.
- [23] ReporteMinero012020.pdf [Internet]. [citado 27 de noviembre de 2022]. Disponible en: <https://contenido.bce.fin.ec/documentos/Estadisticas/Hidrocarburos/ReporteMinero012020.pdf>
- [24] Corzo A, Gamboa N. Environmental impact of mining liabilities in water resources of Parac micro-watershed, San Mateo Huanchar district, Peru. *Environ Dev Sustain* [Internet]. 1 de abril de 2018 [citado 27 de noviembre de 2022];20(2):939-961. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10668-016-9899-z>



- [25] Pérez-Escobar O, Cámara-Leret R, Antonelli A, Bateman R, Bellot S, Chomicki G, et al. Mining threatens Colombian ecosystems. *Science*. 30 de marzo de 2018;359:1475.
- [26] CIBB. Investigación y Competitividad, claves de la producción [Internet]. [citado 27 de noviembre de 2022]. Disponible en: <https://contenido.bce.fin.ec/documentos/Estadisticas/Hidrocarburos/ReporteMinero012020.pdf>.
- [27] CIBE, et al. Contaminación por metales pesados en el sur del Ecuador asociada a la actividad minera. *RB* [Internet]. 15 de diciembre de 2017 [citado 20 de noviembre de 2022];2(4):437-441. Disponible en: <http://revistabionatura.com/2017.02.04.5.html>.
- [28] Naranjo-Morán J. Contaminación por metales pesados en el sur del Ecuador asociada a la actividad minera. *RB* [Internet]. 15 de diciembre de 2017 [citado 20 de noviembre de 2022];2(4):437-41. Disponible en: <http://revistabionatura.com/2017.02.04.5.html>.
- [29] González-Valoys AC, Esbrí JM, Campos JA, Arrocha J, García-Noguero EM, Montezano Destro T, et al. Ecological and health risk assessments of an abandoned gold mine (Remance, Panama): Complex Scenarios Need a Combination of Indices. *International Journal of Environmental Research and Public Health* [Internet]. enero de 2021 [citado 27 de noviembre de 2022];18(17):9369. Disponible en: <https://www.mdpi.com/1660-4601/18/17/9369>
- [30] Ferrante L, Fearnside PM. Brazil's new president and 'ruralists' threaten Amazonia's environment, traditional peoples and the global climate. *Environmental Conservation* [Internet]. diciembre de 2019 [citado 27 de noviembre de 2022];46(4):261-263. Disponible en: <https://www.cambridge.org/core/journals/environmental-conservation/article/brazils-new-president-and-ruralists-threaten-amazonias-environment-traditional-peoples-and-the-global-climate/F5C1E42BF9F6E6BDDB957B87601FC4F7>
- [31] Nuevas concesiones mineras podrían disminuir severamente la biodiversidad y los servicios ecosistémicos en Ecuador - Bitty A. Roy, Martin Zorrilla, Lorena Endara, Dan C. Thomas, Roo Vandegrift, Jesse M. Rubenstein, Tobias Policha, Blanca Ríos-Touma, Morley Read, 2018 [Internet]. [citado 27 de noviembre de 2022]. Disponible en: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/1940082918780427>
- [32] Sonter LJ, Herrera D, Barrett DJ, Galford GL, Moran CJ, Soares-Filho BS. Mining drives extensive deforestation in the Brazilian Amazon. *Nature Communications*[Internet]. 18 de octubre de 2017 [citado 27 de noviembre de 2022];8(1):1013. Disponible en: <https://www.nature.com/articles/s41467-017-00557-w>



- [33] Capparelli MV, Moulatlet GM, Abessa DM de S, Lucas-Solis O, Rosero B, Galarza E, et al. An integrative approach to identify the impacts of multiple metal contamination sources on the Eastern Andean foothills of the Ecuadorian Amazonia. *Science of the Total Environment* [Internet]. 20 de marzo de 2020 [citado 27 de noviembre de 2022];709:136088. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004896971936084X>
- [34] Rorato AC, Camara G, Escada MIS, Picoli MCA, Moreira T, Versteegen JA. Brazilian amazon indigenous peoples threatened by mining bill. *Environmental Research Letters* [Internet]. 1 de octubre de 2020 [citado 27 de noviembre de 2022];15(10):1040a3. Disponible en: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/abb428>
- [35] Salvar los peces migratorios a través de la planificación estratégica de futuras pequeñas centrales hidroeléctricas en Brasil | *Naturaleza Sostenibilidad* [Internet]. [citado 27 de noviembre de 2022]. Disponible en: <https://www.nature.com/articles/s41893-020-00665-4>
- [36] Harari R, Harari F, Gerhardsson L, Lundh T, Skerfving S, Strömberg U, et al. Exposure and toxic effects of elemental mercury in gold-mining activities in Ecuador. *Toxicology Letters* [Internet]. 13 de agosto de 2012 [citado 27 de noviembre de 2022];213(1):75-82. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378427411015190>
- [37] Paiva PFPR, de Lourdes Pinheiro Ruivo M, da Silva Júnior OM, de Nazaré Martins Maciel M, Braga TGM, de Andrade MMN, et al. Deforestation in protect areas in the Amazon: a threat to biodiversity. *Biodivers Conserv* [Internet]. 1 de enero de 2020 [citado 27 de noviembre de 2022];29(1):19-38. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10531-019-01867-9>
- [38] Flores JVZ. Universidad San Francisco De Quito. 148.
- [39] Datos Públicos Depósito de Relaves [Internet]. SERNAGEOMIN. [citado 27 de noviembre de 2022]. Disponible en: <https://www.sernageomin.cl/datos-publicos-deposito-de-relaves/>
- [40] Araya N, Kraslawski A, Cisternas LA. Towards mine tailings valorization: Recovery of critical materials from Chilean mine tailings. *Journal of Cleaner Production* [Internet]. 1 de agosto de 2020 [citado 27 de noviembre de 2022];263:121555. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620316024>
- [41] Nishimoto N, Yamamoto Y, Yamagata S, Igarashi T, Tomiyama S. Acid Mine Drainage Sources and Impact on Groundwater at the Osarizawa Mine, Japan.



- Minerals [Internet]. septiembre de 2021 [citado 27 de noviembre de 2022];11(9):998. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2075-163X/11/9/998>
- [42] Liu W, Chen X, Li W, Yu Y, Yan K. Environmental assessment, management and utilization of red mud in China. *Journal of Cleaner Production* [Internet]. 1 de diciembre de 2014 [citado 27 de noviembre de 2022];84:606-610. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652614006684>
- [43] Reyes A, Cuevas J, Fuentes B, Fernández E, Arce W, Guerrero M, et al. Distribution of potentially toxic elements in soils surrounding abandoned mining waste located in Taltal, Northern Chile. *Journal of Geochemical Exploration* [Internet]. 1 de enero de 2021 [citado 27 de noviembre de 2022];220:106653. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0375674220306130>
- [44] Rodríguez F, Moraga C, Castillo J, Gálvez E, Robles P, Toro N. Submarine tailings in Chile—A review. *Metals* [Internet]. mayo de 2021 [citado 27 de noviembre de 2022];11(5):780. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2075-4701/11/5/780>
- [45] Tapia-Gatica J, Selles I, Bravo MA, Tessini C, Barros-Parada W, Novoselov A, et al. Global issues in setting legal limits on soil metal contamination: A case study of Chile. *Chemosphere* [Internet]. 1 de marzo de 2022 [citado 27 de noviembre de 2022];290:133404. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653521038789>
- [46] Minerals | Free Full-Text | Real-time electrical conductivity monitoring and correlation with sulfate release and acid mine drainage potential from a gold/silver paste tailing storage [Internet]. [citado 27 de noviembre de 2022]. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2075-163X/11/12/143645>. NR16608 (1).pdf.
- [47] Lam EJ, Cánovas M, Gálvez ME, Montofré ÍL, Keith BF, Faz Á. Evaluation of the phytoremediation potential of native plants growing on a copper mine tailing in northern Chile. *Journal of Geochemical Exploration* [Internet]. 1 de noviembre de 2017 [citado 27 de noviembre de 2022]; 182:210-217. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0375674217304260>
- [48] Saha P, Paul B. Assessment of heavy metal toxicity related with human health risk in the surface water of an industrialized area by a novel technique. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal* [Internet]. 19 de mayo de 2019 [citado 27 de noviembre de 2022];25(4):966-987. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/10807039.2018.1458595>
- [49] Monroy M, Maceda-Veiga A, de Sostoa A. Metal concentration in water, sediment and four fish species from Lake Titicaca reveals a large-scale environmental concern. *Science of The Total Environment* [Internet]. 15 de



- julio de 2014 [citado 27 de noviembre de 2022];487:233-244. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969714004860>
- [50] Bech J, Roca N, Tume P, Ramos-Miras J, Gil C, Boluda R. Screening for new accumulator plants in potential hazards elements polluted soil surrounding Peruvian mine tailings. *CATENA* [Internet]. 1 de enero de 2016 [citado 27 de noviembre de 2022];136:66-73. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0341816215300643>
- [51] Custodio M, Cuadrado W, Peñaloza R, Montalvo R, Ochoa S, Quispe J. Human risk from exposure to heavy metals and arsenic in water from rivers with mining influence in the Central Andes of Peru. *Water* [Internet]. julio de 2020 [citado 27 de noviembre de 2022];12(7):1946. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2073-4441/12/7/1946>
- [52] Cruzado-Tafur E, Torró L, Bierla K, Szpunar J, Tauler E. Heavy metal contents in soils and native flora inventory at mining environmental liabilities in the Peruvian Andes. *Journal of South American Earth Sciences* [Internet]. 1 de marzo de 2021 [citado 27 de noviembre de 2022]; 106:103107. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0895981120306507>
- [53] Trace-metal contamination in the glacierized Rio Santa watershed, Peru | SpringerLink [Internet]. [citado 27 de noviembre de 2022]. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-017-6353-0>
- [54] Correa Cuba O. CONTAMINACIÓN POR METALES PESADOS DE LA MICROCUENCA AGROPECUARIA DEL RÍO HUANCARAY– PERÚ. *rsqp* [Internet]. 30 de marzo de 2021 [citado 27 de noviembre de 2022];87(1):26-38. Disponible en: <http://revistas.sqperu.org.pe/index.php/revistasqperu/article/view/320>
- [55] Molina RI. Análisis de arsénico y metales pesados (cadmio, manganeso, mercurio y plomo) en orina y cabello de población infantil residente en huelva [Internet,<http://purl.org/dc/dcmitype/Text>]. Universidad de Granada; 2015 [citado 27 de noviembre de 2022]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=57390>
- [56] Ecuador: la minería ilegal está acabando con dos ríos de la provincia de Napo [Internet]. *Noticias ambientales*. 2022 [citado 26 de noviembre de 2022]. Disponible en: <https://es.mongabay.com/2022/02/ecuador-la-mineria-ilegal-esta-acabando-con-dos-rios-de-napo/>
- [57] [mercurio_en_la_Mineria_de_Au.pdf](#) [Internet]. [citado 27 de noviembre de 2022]. Disponible en: https://ige.org/archivos/IGE/mercurio_en_la_Mineria_de_Au.pdf
- [58] Aramburo MA, Olaya Y. PROBLEMÁTICA DE LOS PASIVOS AMBIENTALES MINEROS EN COLOMBIA. *Gestión y Ambiente* [Internet]. 1 de septiembre



de 2012 [citado 29 de noviembre de 2022];15(3):125-133. Disponible en: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/gestion/article/view/3628658>. 1282-Texto del artículo-4849-1-10-20140612.pdf.

- [59] Moreno Morales C, Chaparro Ávila E. Las leyes generales del ambiente y los códigos de minería de los países andinos: instrumentos de gestión ambiental y minero ambiental. Santiago de Chile: CEPAL, Div. de Recursos Naturales e Infraestructura; 2009. 84 p. (Serie Recursos naturales e infraestructura).