

Contaminación y tratamiento de aguas afectadas por la explotación de oro en América Latina



Editores:

Francisco Alejo, Ph. D.

Pablo A. García-Chevesich, Ph. D.

Julia Zea, Ph. D.

Carlos Zevallos, M. Sc.

Roberto Pizarro, Ph. D.



Cátedra UNESCO
Hidrología de Superficie
Universidad de Talca



EDITORIAL
UNSA

Contaminación y tratamiento de aguas afectadas por la explotación de oro en América Latina



EDITORIAL
UNSA

Contaminación y tratamiento de aguas afectadas por la explotación de oro en América Latina

Editores

Francisco D. Alejo Zapata, Ph. D.

Pablo A. Garcia-Chevesich, Ph. D.

Julia L. Zea Alvarez, Ph. D.

Carlos A. Zevallos Rojas, M. Sc.

Roberto Pizarro, Ph. D.

Arequipa, Perú

2023



**EDITORIAL
UNSA**

**Contaminación y tratamiento de aguas afectadas por la explotación
de oro en América Latina**

Editores

Francisco Alejo, Ph. D.

Pablo A. Garcia-Chevesich, Ph. D.

Julia Zea, Ph. D.

Carlos Zevallos, M. Sc.

Roberto Pizarro, Ph. D.

Editado e Impreso en:

Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

Editorial UNSA

Calle Paucarpata, Puerta 2, Área de ingenierías

Teléfono: 215558

E-mail: editorial@unsa.edu.pe

Arequipa-Perú

Primera edición: agosto del 2023

Tiraje: 50 ejemplares

Hecho en el Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú N°: 2023-06669

ISBN: 978-612-5035-89-9

Reservados todos los derechos. No se permite la reproducción total o parcial de esta obra, ni su incorporación a un sistema informático, ni su transmisión en cualquier forma o por cualquier medio (electrónico, mecánico, fotocopia, grabación u otros) sin autorización previa y por escrito de los titulares del copyright. La infracción de dichos derechos puede constituir un delito contra la propiedad intelectual.

IMPRESO EN PERÚ

Agradecimientos

El equipo de editores de esta obra, junto con la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa (UNSA), Colorado School of Mines (Mines), y la Cátedra Unesco de Hidrología de Superficie, agradecen profundamente el tiempo y dedicación invertidos por cada uno de quienes contribuyeron al desarrollo de esta publicación. Del mismo modo, el agradecimiento se extiende a quienes tuvieron la gentileza de participar como revisores del documento, así como también la colaboración del Centro de Minería Sostenible (UNSA-Mines) y del Centro de Extensión del Senado de la República de Chile.

Equipo editor

Francisco D. Alejo Zapata, Ph. D. Facultad de Química. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. Arequipa, Perú; e-mail: falejo@unsa.edu.pe

Pablo A. Garcia-Chevesich, Ph. D. Department of Civil and Environmental Engineering, Colorado School of Mines, Golden, CO 80401, USA; Intergovernmental Hydrological Programme, UNESCO, Montevideo 11200, Uruguay; pablogarcia@mines.edu

Julia L. Zea Alvarez, Ph. D. Facultad de Química. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. Arequipa, Perú; e-mail: jzeaa@unsa.edu.pe

Carlos A. Zevallos Rojas, M. Sc. Facultad de Química. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. Arequipa, Perú; e-mail: czevallosro@unsa.edu.pe

Roberto Pizarro, Ph. D. Universidad de Talca, Talca, Chile; Cátedra UNESCO Hidrología de Superficie, Talca, Chile; Centro Nacional de Excelencia para la Industria de la Madera (CENAMAD), Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile; Facultad de Ingeniería Forestal y Conservación de la Naturaleza, Universidad de Chile, Santiago, Chile; e-mail: rpizarro@utalca.cl

Revisores

José Luis García Rodríguez, Ph. D. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Montes, Forestal y Medio Natural; Hidráulica e Hidrología – Departamento de Ingeniería y Gestión Forestal y Ambiental. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España; e-mail: josel.garcia@upm.es

Ricardo Schmalbach, Ph. D. International Erosion Control Association (Iberoamerican Chapter). Bogotá, Colombia; e-mail: rschmalbach@hotmail.com

Hugo Arturo Alarcón Caveró, Ph. D. Escuela Profesional de Química; Facultad de Ciencias; Universidad Nacional de Ingeniería, Rímac, Perú; e-mail: halarcon@uni.edu.pe

¿Cómo citar este libro?

Alejo, F., P. A. Garcia-Chevesich, J. Zea, C. Zevallos, R. Pizarro (Eds.). 2023. Contaminación y tratamiento de aguas afectadas por la explotación de oro en América Latina. Cátedra Unesco Hidrología de Superficie. Editorial Universitaria, Arequipa (Perú). 127 p.

TABLA DE CONTENIDOS

Prólogo, 9

Resumen Ejecutivo, 11

Introducción, 11

Métodos, 12

Resultados y discusión, 12

Conclusiones y recomendaciones, 15

Referencias, 15

CAPÍTULO 1. Contaminación y tratamiento de aguas afectadas por la explotación de oro en Argentina, 17

Introducción, 17

Tratamiento de aguas afectadas por la minería, 24

Conclusiones y recomendaciones, 26

Referencias, 28

CAPÍTULO 2. Estudio de caso en Brasil sobre la presencia de arsénico en el río Das Velhas: ¿Origen natural o pasivo ambiental de la explotación de oro? 30

Introducción, 30

Análisis de información, 32

Conclusiones, 40

Referencias, 40

CAPÍTULO 3. Contaminación y tratamiento de aguas contaminadas por la explotación de oro en Chile, 42

Introducción, 42

Marco regulatorio, 44

Tratamiento, 46

Conclusiones y recomendaciones, 50

Referencias, 51

CAPÍTULO 4. Contaminación y tratamiento de aguas afectadas por la explotación de oro en Colombia, 53

Introducción, 53

Marco regulatorio, 56

Tratamientos de los residuos generados en la explotación formal e informal de oro, 59

Conclusiones y recomendaciones, 59

Referencias, 61

CAPÍTULO 5. Contaminación y tratamiento de aguas afectadas por la explotación de oro en Ecuador, 64

Introducción, 64

Consecuencias actuales producidas por la minería, 66

Marco regulatorio, 70

Responsabilidad del Estado, 71

Sucesos recientes, 73

Conclusiones y recomendaciones, 74

Referencias, 76

CAPÍTULO 6. Contaminación y tratamiento de aguas afectadas por la explotación de oro en Nicaragua, 77

Introducción, 77

Marco regulatorio, 79

Tratamiento, 81

Conclusiones y recomendaciones, 82

Referencias, 82

CAPÍTULO 7. Contaminación y tratamiento de aguas afectadas por la explotación de oro en el Perú, 86

Introducción, 86

Marco normativo, 96

Tratamiento, 99

Conclusiones y recomendaciones, 103

Referencias, 104

CAPÍTULO 8. Contaminación y tratamiento de aguas afectadas por la explotación de oro en Venezuela, 106

Introducción, 106

Marco normativo, 118

Tratamiento, 121

Conclusiones y recomendaciones, 123

Referencias, 124

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Ubicación de minería metalífera, operaciones y proyectos avanzados dentro del territorio argentino, 18

Figura 1.2. Cordillera Frontal Calingasta, San Juan, 20

Figura 1.3. Proyecto Minero Pachón, Calingasta, San Juan, Argentina, 21

Figura 2.1. Ubicación de la cuenca del río das Velhas/MG, Brasil, 30

Figura 2.2. Box-plot de las concentraciones de arsénico total en las estaciones monitoreadas por el IGAM en el río das Velhas, entre 2005 y 2021, en las estaciones lluviosa y seca, 33

Figura 2.3. Box-plot de las concentraciones de arsénico disuelto en las estaciones monitoreadas por el IGAM en el río das Velhas, entre 2005 y 2021, en las estaciones lluviosa y seca, 33

Figura 2.4. Resultados del percentil 90, número de violaciones de las normas legales para el arsénico total en las estaciones monitoreadas por el IGAM en el río das Velhas de 2005 a 2021, 36

Figura 2.5. Box-plot de los valores del pH en las estaciones monitoreadas por el IGAM en el río das Velhas de 2005 a 2021, 37

Figura 2.6. Resultados del percentil 90, número de violaciones de las normas legales del pH en las estaciones monitoreadas por el IGAM en el río das Velhas de 2005 a 2021, 37

Figura 2.7. Mapa de presencia de arsénico en los suelos de la cuenca del río São Francisco. Destacada (en círculo) la cuenca del río das Velhas, en el municipio de Baldim, 38

Figura 2.8. Box-plot de la evolución temporal de los valores de arsénico total en el río das Velhas de 2005 a 2021, 39

- Figura 2.9.** Box-plot de la evolución temporal de los valores de arsénico disuelto en el río das Velhas de 2005 a 2021, **39**
- Figura 3.1.** Consumo de agua por sectores productivos en Chile, **42**
- Figura 3.2.** Mapa de promedios de Cianuro (izquierda) y Mercurio (derecha) en Chile, **43**
- Figura 3.3.** Riesgos asociados a depósitos de relaves mineros, **44**
- Figura 3.4.** Diagrama de procesos para concentración gravitacional – flotación de minerales de oro, **47**
- Figura 3.5.** Tranque de relaves, **48**
- Figura 3.6.** Relave en Pasta, **48**
- Figura 3.7.** Cianuración en pila en las instalaciones de la mina El Soldado (V Región), **48**
- Figura 3.8.** Pila de cianuración abandonada en las instalaciones de Punitaqui (IV Región), **49**
- Figura 3.9.** Agentes ambientales que facilitan el drenaje minero, **49**
- Figura 4.1.** Izquierda: Zonas potenciales integrales de recursos mineros - Minerales del oro (principalmente). Derecha: Producción de oro en Colombia por regiones, **54**
- Figura 4.2.** Izquierda: Estimación vertimiento de mercurio al suelo y al agua por beneficio de oro y plata en 2016. Derecha: Niveles de mercurio encontrados en fuentes hídricas de Colombia, **55**
- Figura 4.3.** Panorámica de la degradación ambiental ocasionada por la minería ilegal en río Quito (Municipio de Río Quito, departamento del Chocó, Colombia), **56**
- Figura 5.1.** Distribución geográfica de los yacimientos y explotación de oro de Ecuador, **65**
- Figura 6.1.** Área de mineralización del oro en Centroamérica (Steiner, 2010) y áreas de explotación del oro en Nicaragua, **78**
- Figura 7.1.** Interacciones del sector minero formal con la economía peruana, **87**
- Figura 7.2.** Evolución anual del PBI nacional y minero (%var), entre 2011 y 2021, **88**
- Figura 7.3.** Mapa metalogenético del oro del Perú, con sus respectivas operaciones y proyectos mineros, **90**
- Figura 7.4.** Estructura de la producción de oro por empresas, enero-diciembre. Reporte: 2020 (291 titulares mineros), 2021 (282 titulares mineros), **91**
- Figura 7.5.** Producción nacional de oro (gr) por gravimetría, entre 2010 y 2019, **92**
- Figura 7.6.** Producción nacional de oro (gr) mediante lixiviación, entre 2010 y 2019, **92**
- Figura 7.7.** Producción nacional de oro (gr) mediante gravimetría, en empresas de escala menor, **93**

Figura 7.8. Producción nacional de oro (gr) mediante lixiviación en empresas de pequeña escala, entre 2010 y 2019, **93**

Figura 7.9. Producción nacional de oro (gr) en la minería artesanal, mediante gravimetría, entre 2010 y 2019, **94**

Figura 7.10. Producción nacional de oro (gr) en la minería artesanal, mediante lixiviación, entre 2010 y 2019, **94**

Figura 7.11. Jurisdicciones político-administrativas del Perú con presencia de minería ilegal e informal pintadas de color rojo, **95**

Figura 7.12. Evolución del precio del oro (US\$/oz), entre los años 2000 y 2021, **96**

Figura 7.13. Jerarquía de la normatividad en materia de minería y protección ambiental, relacionadas con el agua, **97**

Figura 7.14. Proceso de amalgamación, **100**

Figura 7.15. Sistema de lixiviación, **101**

Figura 8.1. Mapa de Guayana según Gerritsz, **106**

Figura 8.2. Minería artesanal, **107**

Figura 8.3. Minería con monitores hidráulicos, **108**

Figura 8.4. "Resumen": aplicación de calor para evaporar el mercurio y obtener el oro puro, **109**

Figura 8.5. Balsas mineras, **109**

Figura 8.6. Galerías Pequeñas, **110**

Figura 8.7. Galerías Industriales, **110**

Figura 8.8. Excavación Superficial Industrial, **111**

Figura 8.9. Incremento del uso minero en la Guayana Venezolana, **112**

Figura 8.10. Localización de las áreas de minería en la Guayana Venezolana. a) Sector Paragua. b) Sector Supamo. c) Las Claritas. d) Kukenán, **112**

Figura 8.11. Sectores de concentración de actividades mineras (color fucsia) en la Guayana Venezolana: a) La Paragua, b) Supamo, c) Las Claritas, d) Kukenán, **113**

Figura 8.12. Sectores de producción en el Arco Minero del Orinoco, **114**

Figura 8.13. "Retorta": tiene una tapa de rosca, la amalgama se coloca en la parte inferior, allí se aplica calor, los vapores de mercurio se condensan en el recipiente superior, **115**

Figura 8.14. Mapa de contaminación con mercurio (Hg), en la Guayana Venezolana. Se han resaltado (con colores) solamente las secciones de los ríos que reciben descargas directas de Hg, **117**

Figura 8.15. Descomposición natural del cianuro en lagunas de colas. Las cifras indican la concentración del cianuro en diferentes secciones de la laguna. a) Punto del vertido (primer cuarto de la distancia). b) Segundo cuarto de la distancia, desde el vertido. c) Tercer cuarto de la distancia. d) Lugar más lejano desde el vertido, **122**

Figura 8.16. Recuperación de la cobertura vegetal en lagunas de colas clausuradas. a) Estado inicial con gramíneas y arbolitos plantados. b) Bosque secundario avanzado, **122**

Figura 8.17. Recuperación de lugares deforestados con diversos fines (1, 2, 3 y 4) y de lagunas de colas (5) en la Mina Simón Bolívar (N: 6,8031°; E: -61,5810°), **123**

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Red de Monitoreo del río das Velhas, operada por el IGAM, en Minas Gerais, Brasil, **32**

Tabla 2.2. Estadística descriptiva del arsénico total y disuelto en el río das Velhas (canal) y las estaciones evaluadas, en el período de 2005 a 2021, **34**

Tabla 3.1. Normativa general asociada a la minería en Chile, **45**

Tabla 3.2. Normativa específica asociada a la minería y aguas en Chile, **46**

Tabla 3.3. Fuentes potencialmente generadoras de drenaje minero durante la operación y al cierre de una faena minera, **47**

Tabla 7.1. Posición del Perú en el ranking mundial de producción minera, **88**

Tabla 7.2. Posición del Perú en el ranking mundial de reservas mineras, **89**

Tabla 7.3. Principales normas relacionadas con la actividad minera formal, protección de los recursos hídricos y normas para reducir la minería informal y eliminar la minería ilegal, **98**

Tabla 7.4. Tipo de mena y proceso de extracción de oro en el Perú, **100**

Tabla 7.5. Alternativas para llevar a cabo la detoxificación, **102**

Tabla 7.6. Tecnologías para la destrucción de cianuro mediante proceso de oxidación, **102**

Tabla 8.1. Concentraciones de mercurio (Hg) encontradas en diferentes evaluaciones realizadas en la Guayana Venezolana, **116**

Tabla 8.2. Ríos contaminados con mercurio (Hg) en la Guayana Venezolana. Se consideran sólo las secciones de los cauces que reciben descargas directas de Hg, **118**

Prólogo

Henry Gustavo Polanco Cornejo¹

¹Vicerrector de Investigación. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. Arequipa, Perú.

Muchos países de América Latina dependen económicamente (en menor o mayor grado) de la industria minera, principalmente de cobre, oro y plata. Los procesos que utiliza la minería son variados y se ejecutan para producir metales de alta pureza, pasando por las etapas de exploración, explotación (por distintos métodos), concentración por flotación, procesos de concentración gravimétrica, lixiviación, purificación y refinación, entre muchos otros, los cuales generan de algún modo u otros residuos sólidos, líquidos y gaseosos que impactan el medio ambiente, afectando el suelo, el agua y el aire.

Uno de los metales más preciados por el hombre es el oro, motivo por el cual su extracción se desarrolla desde tiempos pre-colombinos. A inicios se explotaban minerales de alta ley mediante el “escogido” de oro nativo. Posteriormente, se comenzó a usar el mercurio como reactivo de amalgamación, cuya particularidad es la baja recuperación y alta toxicidad del metal. En el transcurso del tiempo, el mayor consumo de oro ha hecho que se comiencen a tratar minerales de menor ley, para lo que se implementó el proceso de lixiviación, adsorción y electrodeposición utilizando cianuro de sodio como reactivo disolvente del preciado elemento. En la actualidad se tienen en investigación varios métodos para extraer el oro en minerales de baja ley, con una alta recuperación (hasta 92%), permitiendo obtener oro metálico hasta 99% de pureza.

El creciente mercado por este preciado metal ha alcanzado niveles tales que el año 2021 se produjo en el mundo más de tres mil toneladas métricas (TM) de oro, de las cuales un 10% proviene de América Latina y el Caribe. Del total del oro producido mundialmente, el 46% se transforma en joyas; alrededor del 20% está en el sector privado como inversión; el 17% se encuentra en posesión de bancos centrales como reservas; y el restante 15% se destina a otros usos. El precio promedio del oro (año 2021) fue de US\$1.799,18 por onza troy, haciendo muy rentable la explotación de minerales de hasta 1g/TM en grandes operaciones que procesan miles de toneladas de material por día.

Como ya se mencionó, la lixiviación alcalina con cianuro de sodio sustituyó a la amalgamación con mercurio y mejoró la factibilidad de explotación de minerales de baja ley. Sin embargo, este nuevo método reemplazó la contaminación de mercurio por cianuro, sustancia contaminante mucho más peligrosa que, en concentraciones mayores a las permisibles, es de efecto inmediato y acumulable en complejos aparentemente estables.

El presente texto presenta el diagnóstico de la situación actual en importantes países latinoamericanos que producen grandes cantidades de oro, incluyendo sus actividades mineras, la normatividad para evitar la contaminación y el grado de control aplicado, todos muy importantes para diseñar medidas de reducción de la contaminación o eliminación de esta.

La Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa (UNSA), a través de su Instituto de Minería Sostenible, lidera esta tarea en el sur del Perú, zona de alta actividad aurífera, especialmente en la

pequeña minería y la minería artesanal, a lo que se suman las operaciones informales. Para hacer esta actividad económica una actividad amigable con la naturaleza y con la sociedad, la UNSA, en conjunto con la Colorado School of Mines (universidad líder en minería sostenible a nivel mundial), están ejecutando procesos de investigación, donde se incluye esta importante obra, con el fin de desarrollar un análisis transnacional que conlleve a nuevos conocimientos y permita cumplir con los objetivos de mantener el equilibrio de la actividad minera con las demás actividades económicas, asegurar el bienestar de la sociedad y la salud de los ecosistemas.

Resumen Ejecutivo

Francisco Alejo^{1,2}, Julia Zea^{1,2}, Carlos Zevallos^{1,2} y Pablo A. Garcia-Chevesich^{3,4}

¹Facultad de Ciencias Naturales y Formales. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa (UNSA). Arequipa, Perú.

²Centro para Minería Sostenible UNSA-Mines. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. Arequipa, Perú.

³Department of Civil and Environmental Engineering. Colorado School of Mines. Golden, CO, USA.

⁴Intergovernmental Hydrological Programme. United Nations Educational, Scientific, and Cultural Organization (UNESCO). Montevideo, Uruguay.

Introducción

El oro es un metal altamente valorado desde tiempos remotos. Según el World Gold Council (2019), globalmente se producen cerca de 3500 toneladas métricas de oro, promedio mantenido casi constante desde el año 2010, destacando entre los productores en primer lugar China con un 11% de la producción mundial, seguida por Rusia (9%), Australia (9%), Estados Unidos (6%), Canadá (5%), Perú (4%), Ghana (4%), Sudáfrica (3%), México (3%), Brasil (3%) y el resto de los países sumando el 43% restante, contribuyendo a la economía de diversas naciones y generando empleo para millones de personas. De acuerdo con la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) sobre la base de Mineral Commodity Summaries, las reservas mundiales de oro estimadas al 2020 son 54100 toneladas métricas (TM), concentrándose principalmente en Oceanía (20%), África (13%), Eurasia (12%), Asia (12%), Norte América (10%) y América Latina y el Caribe (LAC) (11%).

Sin embargo, la extracción de este metal tan importante ha traído consecuencias ambientales, entre las que destaca la contaminación las aguas, un hecho documentado por décadas (e.g. Hancock, 1973), y que ha ido en aumento a tal nivel que en la actualidad gran parte de las operaciones mineras se relacionan directa o indirectamente con algún nivel de contaminación del recurso (e.g. Wade, 2013). En este marco, la contaminación de ríos como consecuencia de la extracción de oro ha sido documentada en Asia (Cai et al., 2017; Myagkaya et al., 2022), Europa (Azzali et al., 2014), Oceanía (Clement et al., 2017), América del Norte (Alpers, 2017) y África (Niane et al., 2014). Al respecto, América Latina no es la excepción, existiendo incontables casos de contaminación de aguas superficiales debido a operaciones de distintas escalas destinadas a la extracción del metal amarillo. Diversos autores en la Región han documentado casos de contaminación de aguas (debido a la extracción de oro) en Colombia (Palacios-Torres et al., 2018), Ecuador (Carling et al., 2013), Brasil (Malm et al., 2017), Perú (Martinez et al., 2018) y Chile (Oyarzun et al., 2018), entre muchos otros. Como en cada continente, cada país en la Región ha estado avanzando independientemente en cómo solucionar este creciente y preocupante problema.

Esta importante obra se centra en lo que se ha avanzado en América Latina y el Caribe, en términos de contaminación de aguas y su tratamiento, relacionados con la explotación formal e informal de oro, con el fin de que distintos países informen sobre lo que se está haciendo a nivel nacional para enfrentar este desafío ambiental. El objetivo principal fue realizar un análisis regional y enfatizar las metodologías y prácticas que han dado buenos resultados, para que otros países sigan el ejemplo a nivel tanto político como técnico.

Métodos

El desarrollo de este libro fue liderado por investigadores de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa (Perú), Colorado School of Mines (Estados Unidos) y la Cátedra UNESCO de Hidrología Superficial. Se identificaron los países de LAC más relevantes en términos de la producción de oro. Para cada país, se identificó a autores que han publicado sobre el tema, a los cuales se envió una invitación formal para participar en el desarrollo de un capítulo que hable sobre el estado actual de la contaminación y tratamiento de aguas afectadas por la minería de oro en el país en cuestión. Lo autores invitados fueron además incentivados a involucrar a otros autores de su país. La invitación incluyó instrucciones de formato y temática, las cuales se detallan a continuación.

Estructura de los capítulos

- *Título:* Contaminación y tratamiento de aguas afectadas por la explotación de oro en (PAÍS)
- *Autor(es):* Nombres, afiliaciones y correos electrónicos.
- *Introducción:* breve descripción de los problemas de contaminación de agua de su país, como resultado de la explotación de oro, con énfasis en cianuro y mercurio. Incluir además un mapa que índice dónde se concentran geográficamente los principales yacimientos y operaciones de explotación de oro, dentro del territorio nacional.
- *Marco regulatorio:* breve descripción de las leyes y normas ambientales que actualmente existen para controlar la contaminación de aguas en operaciones formales e informales de extracción de oro, considerando además la eficiencia real de dichos instrumentos legales e identificando las brechas que existen para que éstas se lleven a cabo en forma efectiva.
- *Tratamiento:* breve descripción de las tecnologías de tratamiento de los residuos generados en la explotación formal e informal de oro, para evitar que estos contaminen las aguas.
- *Conclusiones y recomendaciones:* listado de las principales conclusiones, lecciones aprendidas y recomendaciones futuras, en base a las secciones anteriores.
- *Referencias:* listado de la literatura y sitios web consultados.

Además de lo anterior, se solicitó que los capítulos se enviaran a más tardar el 30 de abril de 2022, con un límite máximo de 10 páginas (sin considerar referencias). El formato requerido fue Times New Roman, tamaño 11, interlineado sencillo (1 pto), justificado, con títulos y subtítulos en negritas (tamaño Carta).

Finalmente, puesto que toda información incluida en el documento (e.g. texto, imágenes, etc.) debía contar con la respectiva autorización interna de los dueños intelectuales, los autores de cada capítulo asumieron total responsabilidad legal sobre el contenido del material enviado, así como el permiso para su uso en la publicación “Contaminación y tratamiento aguas afectadas por la explotación de oro en América Latina y el Caribe”.

Resultados y discusión

Lamentablemente, muchos países no siguieron el formato enviado, por lo que la realización de un análisis comparativo que involucre estadísticas internacionales no se realizó. Sin embargo, todas

las contribuciones (Argentina, Brasil, Chile, Colombia, Ecuador, Nicaragua, Venezuela y Perú) fueron del más alto nivel y se logró realizar un tedioso análisis regional en muchos aspectos, los que se detallan a continuación.

El sector aurífero representa una importante contribución a la economía tanto de los países (minería formal) como de miles de personas de escasos recursos (minería informal e ilegal). En Argentina, por ejemplo, la explotación de oro alcanza el 47% de la minería nacional y 65% de las exportaciones mineras, siendo un sector importante en el soporte económico del país. Por otra parte, el oro en Chile es el segundo recurso metálico explotado, con casi 34 TM en el año 2021, obtenido como subproducto en la minería del cobre y en yacimientos menores de oro. En Colombia, el 83% del oro que se produce proviene de yacimientos aluviales y el 17% de minería de socavón; en 2016, el 86% del metal colombiano provenía de la minería informal, reduciéndose hasta 69% en el 2019. En Ecuador, la minería del oro es imprescindible en la economía del país, mientras que en Perú el oro es el segundo recurso metálico más importante después del cobre, alcanzando una alta producción que proviene de la mediana y pequeña minería, y un buen porcentaje de la minería informal.

En general, la situación de la minería informal es un denominador común en los países involucrados, aunque las proporciones difieren entre naciones. Por ejemplo, la mayor actividad minera en Argentina proviene del rubro formal (gran, mediana y pequeña minería), aunque también existe minería informal, denominándose “pirquineros” a las personas que hacen explotación rudimentaria e ilegal, que luego transportan el mineral a plantas de lixiviación clandestinas. En Chile, por otro lado, se presenta una extracción de oro que se obtiene principalmente como subproductos de la gran, mediana y pequeña minería del cobre. A diferencia de lo anterior, en Colombia, Ecuador, Nicaragua, Perú y Venezuela reina el sector ilegal.

En cuanto a los métodos de extracción de oro utilizados en LAC, éstos son variados, siendo común la amalgamación por mercurio y la lixiviación por cianuro. En este marco, la extracción a tajo abierto, por filón o veta (subterránea), por aluvión (a cielo abierto), por socavones, por gravimetría y mediante el uso de conductores hidráulicos, balsas mineras y excavación industrial.

La contaminación provocada por la minería aurífera en LAC es un problema creciente, representada principalmente por la minería informal e ilegal, mientras que la minería formal por lo general contamina el medio ambiente sólo en eventos aislados y no planeados, pues esta debe seguir de cerca las estrictas regulaciones actuales que permiten el funcionamiento legal de sus operaciones, como se detalla más abajo. En este sentido, los relaves y pasivos ambientales representan una fracción importante de la contaminación provocada por la actividad aurífera en la región. Es por ello que el uso de mercurio y cianuro (y otros insumos químicos como peróxido de hidrógeno, hidróxido de sodio y ácido nítrico) han afectado fuertemente no solo el suelo y el aire de LAC, sino (en gran parte) los recursos hídricos, como consecuencia del drenaje ácido, el uso de metales pesados y lixiviación. Serios derrames tóxicos se han documentado en muchos países, aunque en la totalidad de los capítulos se reporta contaminación del recurso hídrico como resultado de operaciones mineras de distintas escalas (incluyendo relaves), llegando incluso a afectar ecosistemas marinos.

Pese a lo anterior, la minería del oro en LAC ha estado desarrollando esfuerzos por tratar sus aguas residuales. Por ejemplo, en Argentina el cianuro de los relaves (cianuro total y cianuro disociable en ácidos débiles) se trata mediante varios procesos de atenuación: (1) Naturales, i.e. volatilización natural, precipitación y complejación y ayuda de la luz para formar compuestos estables; (2) Oxidación química, i.e. proceso SO_2/aire , en donde se transforma el cianuro a $\text{Fe}(\text{CN})_6$, precipitándolo como lodo insoluble. Es un proceso costoso en base a ácido peroxomonosulfúrico, el cual convierte el cianuro en cianato y se hidroliza hasta amonio y carbonato, que es el más adecuado para relaves; y (3) Otros procesos aplicados, como la precipitación con complejantes de hierro y biodegradación. Colombia, por su parte, informa que la remoción de metales pesados usualmente se realiza por medio de la precipitación química, en la cual se forman hidróxidos de metal que precipitan a un pH determinado, un proceso recomendado para la minería de mediana y gran escala; también, se utilizan humedales construidos, en donde la reducción de los metales pesados se logra gracias a su absorción por plantas macrófitas, no reportándose humedales en base a microorganismos, que son mucho más efectivos que las plantas en la remoción de metales de aguas contaminadas. Mientras que en Ecuador prácticamente no se tratan las aguas residuales de la minería, en Nicaragua el manejo de los desechos mineros generados por la explotación artesanal ha sido a través de la implementación de pilas de sedimentación, las cuales retienen el material sólido presente en el efluente (colas) minero, evitando de esta forma que el mercurio no llegue a las corrientes de agua superficiales. Sin embargo, la fracción líquida de las colas mineras muchas veces retorna a las aguas superficiales en forma de escorrentía durante las tormentas. En el manejo de los desechos, el material sólido retenido en las pilas es removido y depositado en áreas específicas a la espera de su aprovechamiento (i.e. extraer al máximo las partículas de oro remanente). Así mismo, para el caso de Perú, la minería formal aplica el proceso de lixiviación mediante el riego de solución cianurada, solución que funciona en un ciclo de recirculación. En general, el tratamiento de aguas residuales en la región se desarrolla con métodos antiguos y se nota una clara ausencia de tecnologías emergentes para recuperar cianuro y mercurio.

Finalmente, la legislación relacionada con la explotación de oro en LAC parece ser robusta y bien articulada. Sin embargo, se evidencia un claro patrón entre países, representado por la existencia de un fuerte sistema regulatorio que solo se aplica a la minería formal, dejando el sector informal (más que nada ilegal) a la deriva en términos de exigencias que limiten la contaminación generada por las operaciones en el medio ambiente, incluyendo los recursos hídricos. Puesto que la contaminación del recurso hídrico se genera más que nada debido a la actividad informal, es indispensable la creación de instrumentos jurídicos que regulen y eliminen los vertimientos (más que nada de mercurio) a los cuerpos de agua superficiales y subterráneos. En este sentido, cabe destacar el ejemplo de Colombia, país que se planteó como meta erradicar el mercurio de su territorio o Brasil que también ha creado normas para controlar el uso de mercurio y cianuro. Sin embargo, la ilegalidad de la extracción de oro está en muchos casos ligada a situaciones bélicas que dificultan el acceso, monitoreo o control de las operaciones, impidiendo el avance en la descontaminación de las aguas.

Conclusiones y recomendaciones

La minería formal e informal del oro en LAC representa un pilar significativo en la economía de los países y la subsistencia de cientos de miles de personas de escasos recursos en la Región. Sin embargo, la contaminación de la industria es un problema creciente que debe resolverse con

urgencia, dada la cantidad de recursos hídricos superficiales y subterráneos afectados. Dicha contaminación se debe más que nada a la minería informal e ilegal, que está generando problemas ambientales y sociales de mayor envergadura. Al respecto, pese a que se aprecia un adecuado sistema legislativo en la mayoría de los países participantes, dicho sistema sólo aplica a la minería formal, por lo que la principal conclusión de este análisis continental es la necesidad de regular eficientemente el sector ilegal, para así dar paso a una protección eficiente de las aguas de la Región. Similarmente, nuevas y más eficientes tecnologías de tratamiento para eliminar tanto cianuro como mercurio (así como también otras sustancias químicas utilizadas en los procesos de extracción) son necesarias con urgencia, sobre todo en el sector de la minería ilegal.

Referencias

Alpers, CN (2017). Contaminación por arsénico y mercurio relacionada con la minería de oro histórica en Sierra Nevada, California. *Geoquímica: exploración, medio ambiente, análisis*, 17 (2), 92-100., doi:10.1144/geochem2016-018.

Azzali, E., Marescotti, P., Frau, F., Dinelli, E., Carbone, C., Capitani, G. y Lucchetti, G. (2014). Variaciones mineralógicas y químicas de precipitados ocreos de aguas sulfatadas ácidas (asw) en la mina de oro Roşia Montană (Rumanía). *Ciencias Ambientales de la Tierra*, 72, 3567-3584., doi:10.1007/s12665-014-3264-z.

Cai, Y., Zhang, H., Yuan, G. y Li, F. (2017). Fuentes, especiación y transformación de arsénico en la minería de oro impactaron el río Jiehe, China. *Geoquímica aplicada*, 84, 254-261. doi:10.1016/j.apgeochem.2017.07.001.

Carling, G. T., Diaz, X., Ponce, M., Perez, L., Nasimba, L., Pazmino, E., .& Johnson, W. P. (2013). Particulate and dissolved trace element concentrations in three southern Ecuador rivers impacted by artisanal gold mining. *Water, Air, & Soil Pollution*, 224, 1-16, doi:10.1007/s11270-012-1415.

Clement, AJ, Nováková, T., Hudson-Edwards, KA, Fuller, IC, Macklin, MG, Fox, EG y Zapico, I. (2017). Los impactos ambientales y geomorfológicos de la minería de oro histórica en las cuencas de los ríos Ohinemuri y Waihou, Coromandel, Nueva Zelanda. *Geomorfología*, 295, 159-175., doi:10.1016/j.geomorph.2017.06.011.

Hancock, FD (1973). Ecología de algas de un arroyo contaminado por la extracción de oro en Witwatersrand. *Hidrobiología*, 43, 189-229., doi:10.1007/BF00014267.

Malm, O., Pfeiffer, WC, Souza, CM y Reuther, R. (1990). Contaminación por mercurio debido a la extracción de oro en la cuenca del río Madeira, Brasil. *ambiente*, 19 (1), 11-15. .

Martinez, G., McCord, SA, Driscoll, CT, Todorova, S., Wu, S., Araújo, JF, ... & Fernandez, LE (2018). Contaminación por mercurio en sedimentos fluviales y peces asociados a la minería aurífera artesanal y de pequeña escala en Madre de Dios, Perú. *Revista internacional de investigación ambiental y salud pública*, 15 (8), 1584, doi:10.3390/ijerph15081584.

Myagkaya, IN, Gustaytis, MA, Saryg-ool, BY y Lazareva, EV (2022). Partición y comportamiento del mercurio en corrientes y áreas de origen afectadas por los relaves de sulfuro de oro de Novo-Ursk (Oeste de Siberia, Rusia). *Mine Water and the Environment*, 41(2), 437-457.

Niane, B., Moritz, R., Guédron, S., Ngom, PM, Pfeifer, HR, Mall, I. y Poté, J. (2014). Efecto de la reciente extracción artesanal de oro a pequeña escala sobre la contaminación de los sedimentos fluviales superficiales: caso del río Gambia, región de Kedougou, sudeste de Senegal. *Revista de exploración geoquímica*, 144, 517-527., doi:10.1016/j.gexplo.2014.03.028.

Oyarzún, R., Guevara, S., Oyarzún, J., Lillo, J., Maturana, H., & Higuera, P. (2006). La cuenca del río Elqui contaminada con As: una perspectiva de larga duración (1975-1995) que cubre el inicio y desarrollo de la minería Au-Cu-As en los Andes altos del norte de Chile. *Geoquímica ambiental y salud*, 28, 431-443.

Palacios-Torres, Y., Caballero-Gallardo, K., & Olivero-Verbel, J. (2018). Contaminación por mercurio por la minería de oro en un hotspot de biodiversidad global, la región biogeográfica del Chocó, Colombia. *Chemosphere*, 193, 421-430., doi:10.1016/j.chemosphere.2017.10.160.

Wade, L., (2013), *Gold's Dark Side: Science* (American Association for the Advancement of Science), v. 341, no. 6153, p. 1448–1449, doi:10.1126/science.341.6153.1448.

CAPÍTULO 1

Contaminación y tratamiento de aguas afectadas por la explotación de oro en Argentina

Battistella, Romina Alicia*¹, Luna, Adriana*², & Lanzetta, Maximo*³

¹Instituto Nacional del Agua, Centro Regional de Agua Subterránea, San Juan, Argentina

²Ministerio de Minería de la Provincia de San Juan, Argentina

³Instituto Nacional del Agua, Gerencia de Programas y Proyectos, Buenos Aires, Argentina

Introducción

Los primeros registros bibliográficos de minería aurífera en la Argentina datan de principios de la década de 1930. Particularmente, la mina Gualilán, ubicada en el centro de la Provincia de San Juan, se remonta más allá de la colonización española. Los aborígenes conocían los minerales auríferos de la región, ya que la palabra “Gualilán” significa “tierra de oro” en idioma huarpe (Angelelli, 1934).

La Argentina se caracteriza por presentar yacimientos metalíferos distribuidos en gran parte de su territorio. La zona cordillerana, la meseta patagónica y la Puna se destacan por la presencia de depósitos de diversos minerales metalíferos de importancia económica. A partir del análisis regional de la distribución de oro, se han identificado 21 fajas auríferas dentro del país (Cardó, *et al.* 2003). La actualidad de la minería metalífera en Argentina (Figura 1.1) está caracterizada por operaciones y proyectos en los que los principales productos son oro, plata, cobre, plomo y zinc. Están en funcionamiento 13 establecimientos, siendo el oro el principal metal, acompañado de plata; cuatro en donde el producto mayoritario es plata, siendo el co-producto el oro en tres de ellas y plomo y zinc en la otra; y un depósito con producción combinada de plomo, plata y zinc. Se están construyendo tres minas de oro de distinta escala que se sumarían a la producción en corto plazo (Secretaría de Minería 2020).

La minería aurífera se desarrolla principalmente en las provincias de Santa Cruz (34%), San Juan (22%) y Catamarca (18%); entre las tres provincias concentran más del 75% de la producción. En menor escala de producción se encuentran las provincias de Jujuy y Salta. En Chubut y Mendoza, a pesar del importante potencial geológico, su actividad se encuentra restringida por los marcos normativos fundamentados en la sostenibilidad ambiental. Mundialmente, Argentina ocupa el puesto 15° en producción primaria, siendo Veladero (San Juan) una de las diez minas de oro más grandes del mundo. El crecimiento de los últimos años se explica por el aumento de los volúmenes y, sobre todo, por el significativo incremento de los precios. El oro es el principal metal extraído, aportando el 47% del valor de la producción minera y el 65% de las exportaciones del sector (Ministerio de Hacienda, 2019).

Históricamente, la minería metalífera ha sido de tipo subterránea, es decir utilizando del método de explotación en vetas a través de galerías. Algunos ejemplos de minas con explotación por galerías subterráneas en la Argentina son Farallón Negro (Catamarca), Casposo (San Juan), mina Marta y San José de los Huevos Verdes (Santa Cruz), entre otras. Debido a la disposición diseminada del mineral en gran parte de los yacimientos argentinos y los menores costes de

operación, se ha producido un progresivo desplazamiento hacia la explotación de minas a cielo abierto, en comparación a la minería subterránea.

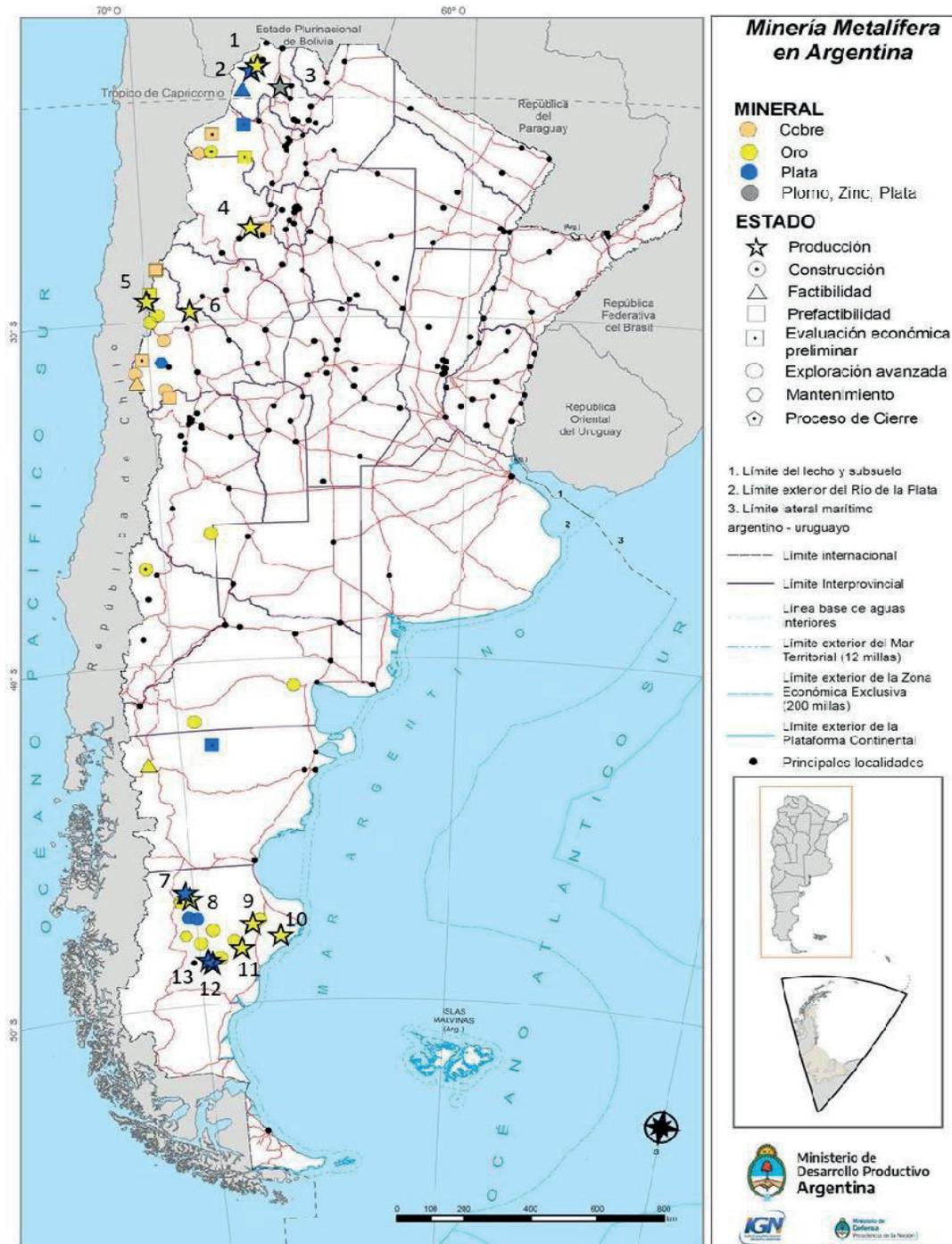


Figura 1.1. Ubicación de minería metalífera, operaciones y proyectos avanzados dentro del territorio argentino. (1) Ajedrez, (2) Puna Operations (Pirquitas-Chinchillas), (3) Aguilar, (4) Farallón Negro, (5) Veladero, (6) Gualcamayo, (7) San José, (8) Cerro Negro, (9) Don Nicolás, (10) Cerro Moro, (11) Cerro Vanguardia, (12) Manantial Espejo y (13) Mina Martha. Fuente: Secretaría de Minería (2020).

En contraposición a la tecnificación en el proceso, se requiere la utilización de cianuro, el cual permite recuperar más de un 97% del oro, frente al 60% que permitía la extracción con mercurio. Esto posibilitó que yacimientos prácticamente extinguidos y de bajo rendimiento pudiesen ser explotados a través del proceso de lixiviación con cianuro. Los registros oficiales de la industria minera que actualmente se desarrolla en la Argentina permiten realizar los análisis de situación como el presente. Sin embargo, se conoce la existencia de “pirquineros”, donde grupos de trabajadores realizan explotación rudimentaria, transportando el mineral a plantas clandestinas. Este tipo de labor es difícilmente regulado por la falta de registros de la actividad, por lo que cualquier aseveración en cuanto a su dimensión, es subjetiva. Según la Enciclopedia de Ciencia y Tecnología de la Argentina, el “*pirquineo*” es la minería artesanal, usualmente consistente en el cernido de arenas metalíferas, el aprovechamiento de relaves, las explotaciones de yacimientos superficiales de pequeña escala y/o las extracciones (en pequeña escala) de piedras preciosas y de residuos de minas abandonadas. Por sus características de recolección con escasa afectación del medio ambiente, el pirquineo es una forma válida de ganarse la vida que debería ser protegida y estimulada en las regiones cordilleranas.

En los años 1990s se produjo en Argentina (y varios países de América Latina) un proceso de regulación y fomento de las industrias extractivas como condición necesaria para atraer nuevas inversiones, principalmente extranjeras, que convirtieron el impulso de la industria minera en política de Estado. Para ello, se incorporaron ciertas transformaciones que proporcionaron un creciente flujo de inversiones. Sin embargo, el impacto sobre el medio ambiente genera un profundo debate asociado a su desarrollo.

Un aspecto que destacar es el comportamiento social frente al impacto de la actividad minera en un país con crecientes índices de pobreza. La cultura ambiental no ha sido una marcada política de Estado ni un estandarte en la sociedad argentina, sino hasta hoy. Cabe destacar que tanto la Ley N° 25675 (Ley general del Ambiente) como la Ley N° 25688 (Régimen de Gestión Ambiental de Aguas) se promulgaron durante el año 2002; con esto, la repercusión social exhibida a través de la conciencia ambiental viene retardada. Como se describe más adelante, la legislación ambiental ha evolucionado en función al crecimiento de la industria minera. Por otro lado, la visión política existente desde el año 2000 deposita en la minería el discurso sobre una accesible fuente de puestos de trabajo y de recursos para las provincias, a raíz de las regalías generadas por la actividad. No obstante, el crecimiento y la dinamización no necesariamente son una consecuencia directa de la minería.

El dilema de los recursos hídricos

El Ministerio de Ambiente de la Nación Argentina informó que este país posee un volumen de agua dulce per cápita de 20400 m³, por encima de la mayoría de los países de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE). Solo Chile, Noruega, Canadá, Nueva Zelanda e Islandia superan a la Argentina en cantidad de recursos hídricos per cápita. Sin embargo, el 76% del territorio está sujeto a condiciones de aridez o semiaridez, con precipitaciones promedio menores a 800 mm por año (TELAM, 2022). Las provincias argentinas donde se desarrolla la actividad minera se enfrentan a la problemática de disponibilidad del recurso hídrico.

Argentina tiene una superficie de 2795677 km² en el continente americano, la cual se extiende 1423 kilómetros de este a oeste y 3694 kilómetros de norte a sur, siendo la Cordillera de los Andes su insigne monumento geográfico. Los proyectos mineros están en regiones poco habitadas, y la geología del territorio posiciona a la mayoría de los yacimientos auríferos sobre la Cordillera de los Andes (Figuras 1.2 y 1.3). En muchos casos, las precipitaciones que allí ocurren (pluvial o nival) son la única fuente de recarga de los sistemas acuíferos locales y los ríos que nacen en las cabeceras de cuencas son responsables de la recarga de los acuíferos aguas abajo, incluso a varios kilómetros de distancia. Consecuentemente, cualquier episodio o contingencia supone ser de consecuencias graves aguas abajo.



Figura 1.2. Cordillera Frontal Calingasta, San Juan (gentileza de Gustavo Muñoz).

Los pronósticos climáticos indican ciertamente que los fenómenos extremos de lluvias serán más intensos y frecuentes en muchas regiones, pero también las olas de calor se sucederán con más frecuencia y serán más largas. Tal como lo señala un reciente informe de UNESCO (2020), “las primeras aumentarán el riesgo global de inundaciones (Hirabayashi *et al.*, 2013), mientras que las últimas harán que las sequías sean más intensas (Trenberth *et al.*, 2014)”. Este déficit hídrico, consecuencia del cambio climático global, amenazaría la sustentabilidad de todas las actividades productivas (agricultura, minería y otras industrias), como también al consumo en asentamientos humanos en las condiciones actuales de gestión y uso del agua. Esto supone una responsabilidad insoslayable sobre el uso del recurso hídrico, desde todos los sectores.

En un proyecto minero, independientemente del método de minado seleccionado (subterránea o a cielo abierto, con su impacto taxativo), los efectos en el recurso hídrico se vinculan con la metalurgia extractiva del mineral y con el consumo de agua para el proceso. En general, una apreciación que surge de la ocurrencia efectiva de problemas es la gestión del recurso más que la cuantificación precisa de la disponibilidad de agua en las cuencas del país. Los potenciales inconvenientes se relacionan con los procesos de producción de oro. Los minerales auríferos

pueden ser extraídos por un proceso de cianuración convencional o bien mediante la oxidación del mineral, como paso previo a la cianuración (Vardé, *et al* 2021). Existen tres tipos importantes de impactos sobre la calidad del recurso hídrico por la minería: (1) el drenaje ácido de minas (DAM), (2) los metales pesados y (3) lixiviación y contaminación por el uso de agentes químicos usados en el proceso de extracción del metal de interés.



Figura 1.3. Proyecto Minero Pachón, Calingasta, San Juan, Argentina (gentileza de Gustavo Muñoz).

El tipo de contaminación que podría originarse está relacionado con la naturaleza del mineral explotado y sus aniones asociados (sulfatos, carbonatos, etc.). El cianuro se utiliza en minería para extraer oro (y plata) del mineral. En casos donde los procesos como la trituración y la separación por gravedad no son tan efectivos, este método se utiliza generalmente en yacimientos donde el mineral es de baja ley. De esta manera, el cianuro no solo es utilizado para extraer el oro y la plata, sino que también se utiliza en concentraciones bajas como un reactivo de flotación para ayudar a recuperar metales base como plomo, cobre y zinc. La solución residual se envía a una instalación para su tratamiento, la cual eventualmente puede ser una fuente de contaminación del agua. El mayor accidente minero de la historia de Argentina ocurrió en septiembre de 2015, cuando más de un millón de litros de solución cianurada se fugaron de la mina Veladero, en la Provincia de San Juan. En 2016 y 2017 hubo nuevos derrames, aunque de menor volumen. No obstante, no es el único evento contaminante que ha sufrido este país en emprendimientos auríferos. En el año

2003, 612 m³ de compuestos cianurados fueron derramados en el yacimiento del Cerro Vanguardia, mientras que un evento de similares características ocurrió en 2012, en el complejo Manantial Espejo (Provincia de Santa Cruz). Por otro lado, el cobre fue por muchos años el mineral líder en exportaciones en la Argentina, hasta que comenzó a agotarse la única mina en la Provincia de Catamarca, denominada La Alumbra, la cual estuvo vinculada a graves problemas de contaminación ambiental y de alta repercusión social, tal como lo cita en su trabajo Murguía (2013), donde revela que los indicadores ambientales y económicos son los más polémicos y menos reportados. Los informes examinados no detallan los procedimientos seguidos para identificar e involucrar a las partes interesadas.

En muchos casos existe producción de mercurio líquido como producto secundario durante el proceso de extracción de oro. Es así que en el año 2021 la mina Veladero produjo la exportación de 100 toneladas de este material de desecho hacia Alemania, para ser enterrados en una mina de sal en el mencionado país. También en la mina Gualcamayo en San Juan, se obtienen pequeñas cantidades de mercurio, que son almacenadas en recipientes de seguridad para su disposición y destino final.

El tipo de efectos directos sobre los recursos hídricos está en función del uso de ciertas sustancias químicas durante el proceso de extracción del mineral y por el empleo de agua en procesos metalúrgicos (como lavado por flotación) e indirectamente por arrastre de partículas hacia áreas alejadas de la zona de explotación. Así, el tipo de contaminación del agua como producto de la minería puede ser sobre (1) *aguas superficiales*, pues si los residuos químicos no son debidamente tratados y almacenados, pueden filtrarse hasta los caudales de agua fresca, contaminándolos y disminuyendo la vida presente en los mismos; o (2) *acuíferos subterráneos*, pues en los procesos mineros que utilizan agua, no solo el impacto ocurre sobre la cantidad de recurso consumido sino sobre la calidad del agua. Los desechos contaminados suelen ser lavados por el agua de lluvia, la cual se filtra hacia el subsuelo, ocasionando la contaminación del agua subterránea.

Cabe destacar que los sistemas hídricos superficiales y subterráneos no son aislados y están en íntima relación, ya que los acuíferos son originados con aguas de cursos superficiales; en muchos casos esos acuíferos alimentan a ríos con aportes desde el subálveo. De esta manera, los mecanismos de control de contaminación deben ser minuciosamente diseñados para que los emprendimientos mineros puedan inspeccionar rigurosamente los riesgos. Además, los órganos de fiscalización jurisdiccionales son los responsables del cumplimiento estricto de los protocolos operativos y las normativas regulatorias.

Gobernanza de los recursos hídricos en Argentina

La República Argentina es un país con un sistema federal, cuyos estados miembros se denominan “provincias”. La última Reforma Constitucional de 1994 suma a la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (CABA) como un nivel político-administrativo particular que la asimila en muchos aspectos a las provincias. En dicha reforma, se introduce una cláusula ambiental (Art. 41) que consagra el derecho al ambiente sano y equilibrado junto con una serie de deberes, tales como el dictado de las normas de “Presupuestos Mínimos de Protección Ambiental”. Dichas normas fijan el contenido mínimo de protección ambiental en todo el territorio nacional, las que pueden ser complementadas por las provincias y la CABA. Otro aspecto vinculado a los procesos de gobernanza es la inserción

en materia procesal de los derechos de incidencia colectiva a través de la acción de amparo, la que puede ser interpuesta por el afectado, el Defensor del Pueblo y las ONGs (Organizaciones No Gubernamentales), cuyo objeto esté vinculado al tema del recurso (Art. 43). Este panorama se complementa con lo consagrado en el Artículo 124 *in fine* de la Carta Magna, que pone en cabeza de las provincias el dominio originario de los recursos naturales y, por lo tanto, su regulación. Finalmente, el Artículo 75 consagra la jerarquía constitucional de los Tratados Internacionales aprobados por el Congreso de la Nación (muchos de los cuales son de carácter ambiental y sobre derechos humanos); establece los derechos indígenas, entre ellos a la propiedad comunitaria de las tierras que ocupaban y a su participación en la gestión de los recursos naturales que los afecten.

Por último, también encomienda al Congreso Nacional la sanción de los Códigos Civil, de Comercio y de Minería (Gabay, 2018). Este panorama regulatorio significa en la práctica que más allá de ciertas regulaciones y principios que son fijados por las normas nacionales de presupuestos mínimos de protección ambiental (por ejemplo, Ley General del Ambiente, Ley de Gestión Ambiental de Aguas, Ley de Protección de Glaciares, Ley de Bosques Nativos), así como las establecidas por el Código de Minería y el Código Civil y Comercial de la Nación, cada provincia y la CABA establecen las normas procedimentales específicas y especialmente emiten los permisos ambientales en general y los de aguas en particular, pudiendo fiscalizar su cumplimiento. En materia de agua, cabe destacar que las provincias tienen jurisdicción incluso sobre los tramos provinciales de los cursos de aguas interjurisdiccionales.

En concreto, los permisos de uso del agua son generalmente otorgados por las autoridades hídricas provinciales; los permisos ambientales (declaración de impacto ambiental, residuos, etc.) por las autoridades ambientales provinciales; en tanto que los permisos mineros son expedidos por las autoridades mineras provinciales. Sin embargo, las Declaraciones de Impacto Ambiental (DIA) de las actividades mineras tiene una significativa variación respecto a la delegación provincial de esta competencia, que en muchos casos recae en las propias áreas de minería y en algunos casos en la autoridad ambiental, pudiendo encontrar sistemas mixtos en el procedimiento (Caso Provincia de Buenos Aires, Dictamen Técnico de Ambiente y Emisión de la DIA por Ministerio de Producción, Ciencia e Innovación Tecnológica – Subsecretaría de Minería); Caso San Juan, donde existe una comisión interinstitucional que emite dictámenes técnicos en el procedimiento de expedición de la DIA por parte de la autoridad minera.

Por lo reseñado, resultan relevantes las regulaciones mineras y ambientales provinciales. En tal sentido, se destaca lo ocurrido en la Provincia de Chubut, en donde se sancionó Ley 5001 (08/05/2003), resultando en que la Legislatura Provincial prohibió la técnica denominada “cielo abierto” y el uso del cianuro y otras sustancias tóxicas en los procesos de exploración y explotación de minerales en todo el territorio. Las provincias que adoptaron leyes similares a la de Chubut fueron Mendoza (Ley 7722, del 20/06/07); Tucumán (Ley 7879, del 20/04/07); La Pampa (Ley 2349, del 16/08/07); Tierra del Fuego (853, del 2012); Córdoba (Ley 9526, del 24/09/2008); San Luis (Ley 634 del 01/10/2008); Río Negro (Ley 3981, del 21/07/2005), Derogada por ley 4738 (año 2011); La Rioja (Ley 8137, año 2007), derogada por la Ley 8355 (año 2008), San Juan Ley Provincial 190, Código de Aguas para la Provincia de San Juan y la Ley 688 (19/11/2014) Código de Procedimientos Mineros.

A comienzos de 2019, Argentina se adhiere la Iniciativa para la Transparencia de las Industrias Extractivas (“EITI” por sus siglas en inglés), que es un estándar global que participan más de 55 países donde se proporciona un marco para que gobiernos y empresas desarrollen y cumplan los compromisos de relevar públicamente cierta información relativa a las actividades de extracción de hidrocarburos y la minería dentro de un proceso que incluye a las organizaciones civiles.

Finalmente, y por todo lo señalado, el Ordenamiento de Territorio es una facultad provincial y dicho instrumento regula y establece (a partir de la zonificación) la aceptación o no de los diferentes tipos de actividades mineras, ya sea en todo o en ciertas partes de su territorio. Este escenario de alta complejidad a nivel país hace que varios autores señalen que a partir de 1994 se abre especialmente en materia de gestión de recursos naturales un “federalismo de concertación” (Bibiloni 2008), tomando relevancia las figuras de gestión institucional federales, tales como el Consejo Federal del Medio Ambiente (COFEMA), el Consejo Hídrico Federal (COHIFE) y el Consejo Federal Minero (COFEMIN).

En 2003, las 23 provincias, CABA y el Gobierno Nacional firmaron un Acuerdo Federal del Agua que sentó las bases de una Política Nacional del Agua. A través de ese acuerdo, las partes adoptaron 49 Principios Rectores para la Política del Agua, en donde se reconoce el valor del agua como un recurso social y ambiental. Este proceso involucró a unos 3000 participantes a lo largo de múltiples talleres. Los principios respetan la importancia histórica de cada jurisdicción e intentan conciliar los intereses locales, provinciales y nacionales. Los principios exigen la protección del recurso en torno a los siguientes componentes básicos: ciclo del agua, agua y ambiente, agua y sociedad, gestión del agua, instituciones del agua, leyes del agua, economía del agua y herramientas de gestión del agua. Por ejemplo, algunos principios definen la cuenca del río como la escala adecuada para planificar y gestionar los recursos hídricos (Núm. 19) o exigen una planificación a largo plazo (Núm. 20) (COHIFE, 2003).

Dado que el movimiento de las aguas no reconoce fronteras político-administrativas, sino leyes físicas, las cuencas hidrográficas o los acuíferos constituyen la unidad territorial más apta para la planificación y gestión coordinada de los recursos hídricos. La consideración de la totalidad de las ofertas y demandas de agua en una región hidrográfica permite detectar las mejores oportunidades para su uso, logrando al mismo tiempo anticipar conflictos y minimizar impactos negativos a terceros o al ambiente.

Tratamiento de aguas afectadas por la minería

Durante el proceso extractivo del oro, una vez que se ha recuperado todo el metal, la solución queda desprovista de oro, pero sigue conteniendo cianuro. El cianuro generalmente se mide mediante análisis de cianuro total o análisis de cianuro DAD (disociable en ácidos débiles). El cianuro que queda en las colas de las plantas de oro es potencialmente peligroso. Por lo tanto, algunas operaciones procesan las corrientes de desechos que contienen cianuro en un paso de desintoxicación. Este paso reduce las concentraciones de estos compuestos de cianuro. El proceso que disminuye la concentración de cianuro en solución ya sea en el ambiente natural o en instalaciones creadas a tal fin, se denomina “atenuación”. Existen distintos mecanismos para atenuar este compuesto, los cuales se describen a continuación (Logsdon, 2001).

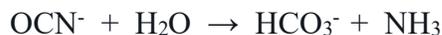
Degradación natural

El principal mecanismo de degradación natural es la volatilización con posteriores transformaciones atmosféricas a sustancias químicas menos tóxicas. La precipitación y los efectos de la luz solar también contribuyen a la degradación del cianuro. Schmidt et al. (1981) compila datos de los sistemas de degradación natural en diversas minas de oro que demuestran la capacidad natural para reducir las concentraciones de cianuro en las soluciones. Entre los factores que pueden promover la volatilización del cianuro se incluye el calor, disgregación del material en capas extensas y de baja profundidad, la aireación y el removido para mejorar la exposición. También ayudan en este proceso la foto descomposición y la biodegradación.

Oxidación química

Varias son las metodologías de oxidación química utilizadas para la atenuación del cianuro. Numerosas investigaciones comparan la eficacia de los procesos de separación y oxidación, encontrándose que eran dependientes de las especies de cianuro que estaban presentes; cianuro libre (CN^- y HCN), tiocianato (SCN^-), disociables de ácido débil (DAD), y los disociables de ácido fuerte (FAD); de esta manera pueden ser remediados por un proceso y no por otro (Young y Jordan, 1995). Entre los procesos más utilizados actualmente encontramos:

- El proceso con SO_2 /Aire (desarrollado por la compañía minera canadiense INCO), donde el cianuro libre y el cianuro DAD se oxidan y el cianuro de hierro se precipita como un sólido insoluble. El proceso puede aplicarse a soluciones o a lodos, siendo la reacción bastante rápida. Las posibles limitaciones son la necesidad de obtener una licencia para utilizar el proceso, el costo de construcción de una planta procesadora, la necesidad de realizar ensayos empíricos para optimizar el sistema y la incapacidad del proceso para oxidar subproductos intermedios del cianuro.
- Otra alternativa es el método Ácido Caro, en donde el ácido peroxomonosulfúrico (H_2SO_5) convierte cianuro a cianato, hidrolizando este último a iones de amonio y carbonato. Este método es capaz de alcanzar niveles de descarga de DAD por debajo de 50 mg/L, que generalmente es adecuado para descarga en relaves.
- El proceso con licencia INCO y el proceso Ácido de Caro oxidan el cianuro a cianato, que no es tan tóxico como el ion cianuro, y que luego puede reaccionar para formar carbonatos y amoníaco, en la expresión siguiente:



El proceso INCO típicamente puede reducir las concentraciones de cianuro a menos de 50 mg/L, mientras que el proceso ácido de Caro puede reducir los niveles de cianuro a entre 10 y 50 mg/L, con concentraciones más bajas alcanzables en corrientes de solución en lugar de pastas. Ambos métodos de oxidación química son capaces de producir concentraciones residuales de cianuro que pueden satisfacer exigentes normas de descarga.

Más de 90 minas en todo el mundo utilizan ahora un circuito de desintoxicación de este tipo.

- También existe el proceso de tratamiento con H₂O₂ (peróxido de hidrógeno), un potente oxidante que oxida el cianuro libre y el cianuro DAD y los convierte en amonio y carbonato, respectivamente. Los cianuros de hierro no se oxidan mediante el peróxido, pero precipitan como sólidos insolubles y estables. Algunas veces es necesario añadir sustancias químicas para controlar la concentración de cobre en las soluciones, con el fin de cumplir con las normas ambientales. El sistema con peróxido no se adapta bien al tratamiento de lodos debido a los irregulares requerimientos de peróxido de hidrógeno cuando hay sólidos presentes.
- El proceso de Cloración Alcalina es una alternativa de oxidación química más antigua y tal vez la práctica más común utilizada en la industria minera para la destrucción del cianuro (Zaidi y Whittle, 1987). No obstante, este método está siendo reemplazado por otros más efectivos y económicos, por lo que su utilización en las industrias mineras no es frecuente en la actualidad.

Precipitación

La precipitación de cianuros estables se puede obtener mediante el agregado de elementos complejantes tales como el hierro. Esto reduce la concentración de cianuro libre y controla la concentración de otros metales presentes. Los cianuros de hierro pueden reaccionar con otras sustancias químicas en solución y producir precipitados sólidos, que pueden arrastrar otras sales insolubles de cianuro, removiendo de esta manera el cianuro de la solución. Parte del cianuro de las soluciones de los procesos reacciona con otros componentes químicos que se encuentren dentro del sistema y formarán concentraciones mucho menos tóxicas de compuestos tales como el amoníaco, el nitrato y el dióxido de carbono.

Biodegradación

La biodegradación del cianuro es la base de los sistemas de tratamiento de los efluentes residuales industriales, como los utilizados por Homestake Mining Company en los Estados Unidos e ICI Bioproducts en el Reino Unido. Las condiciones aeróbicas son mucho más favorables para la degradación del cianuro que las condiciones anaeróbicas, aunque los organismos anaeróbicos pueden ser eficaces para tratar el cianuro en concentraciones de hasta varios miligramos por litro. Se han creado tanto sistemas activos como pasivos de tratamiento biológico; estos sistemas remueven el cianuro empleando microorganismos aeróbicos o anaeróbicos. Estos procesos biológicos son de simple diseño y control operativo, utilizando además reactivos de bajo costo. Una de las mayores ventajas es el tratamiento para la atenuación de todas las especies del cianuro y sus derivados. Una de las limitaciones de estos sistemas son el reducido rendimiento a bajas temperaturas y a altas concentraciones de cianuro.

Conclusiones y recomendaciones

La Argentina promete ser uno de los países con mayor desarrollo de minería metalífera en el mundo, mayormente gracias a la presencia de la Cordillera de Los Andes, la cual determina la

existencia de grandes volúmenes de minerales explotables. El desarrollo minero impulsado por el gobierno nacional y algunas provincias, especialmente a partir de la década de 1990, implicó, entre otras cosas, la emergencia de un sistema regulatorio fragmentado por provincias, con una institucionalidad emergente en las mismas, tanto en materia ambiental como minera. El crecimiento de las estructuras gubernamentales de gestión ha tenido un desarrollo dispar en el conjunto de las provincias, al tiempo que la generación de información técnica y ambiental de base en muchos casos resulta escasa. Asimismo, la puesta en funcionamiento de los mecanismos de comunicación pública de información ambiental también se encuentra en muchas provincias en etapa de desarrollo y consolidación. Otro aspecto que destacar es la tradición de la actividad en cada provincia y la percepción en ciertos casos de posible tensión por el uso del agua frente a otras actividades que la demandan. Este escenario, sin pretender ser exhaustivo, es indicativo de los aspectos dilemáticos que en ciertas provincias o regiones de estas se expresan como conflictos sociales que en algunos casos conlleva al rechazo de la actividad. Esta diversidad de situaciones que giran en torno a la aceptabilidad social del riesgo de la actividad minera se expresa en parte en las normas provinciales, algunas de ellas apoyando la actividad, otras restringiendo o directamente prohibiendo la misma.

En 2015, todos los Estados Miembros de las Naciones Unidas aprobaron 17 Objetivos como parte de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, en la cual se establece un plan para alcanzar dichas metas en 15 años. Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) no son jurídicamente obligatorios, pero se prevé que los países los adopten como propios y establezcan marcos nacionales para el logro de estos. Los países tienen la responsabilidad primordial del seguimiento y examen a nivel nacional, regional y mundial de los progresos conseguidos en el cumplimiento de los objetivos y las metas para 2030. En Argentina existe un Consejo Nacional, dependiente de Presidencia de la Nación (<https://www.argentina.gob.ar/politicassociales/ods>), que los coordina. Las medidas adoptadas a nivel nacional para observar los progresos requieren la recopilación de datos de calidad accesibles y oportunos y el seguimiento y examen a nivel regional. Casi todas las provincias ya han firmado convenios con el Estado Nacional para vincular sus políticas y planes de desarrollo a los ODS.

Uno de los aspectos que más frecuentemente se percibe a raíz de la explotación minera es la desinformación de la población en relación con las actividades que se llevan a cabo. Los relevamientos de los recursos, uso de sustancias químicas, mediciones de parámetros físico-químicos, etc., están solo en manos de las empresas y de los órganos provinciales de control. En muchos casos, a los actores de la sociedad civil les resulta difícil tomar posturas fundadas en evidencia, porque no hay o es escaso el conocimiento de los impactos de las actividades en el ambiente físico, natural y cultural. Este hecho podría verse minimizado si todos los habitantes tuviesen acceso a la información sobre los procedimientos aplicados por las empresas y fiscalizados por los gobiernos. En general, existen instituciones del Estado Argentino donde científicos y técnicos generan información sobre los recursos naturales, los servicios ecosistémicos que brindan y los impactos a los que son sometidos. Estos organismos no tienen injerencia en el control de la actividad minera, por las razones explicadas anteriormente. Sin embargo, en muchos casos los habitantes depositan su confianza en estas instituciones, que son transversales a las estructuras políticas que gobiernan. En tal sentido, la conformación de espacios institucionales de participación de sectores de la academia, la investigación y la sociedad civil como observadores en las diferentes etapas de los proyectos mineros, pueden funcionar como dispositivos que

interactúen y complementen la relación empresa-Estado, enmarcada en las regulaciones y controles ya reseñados, dotando de mayor transparencia a estos procesos. Este hecho puede ser concebido como un beneficio para los habitantes, los gobiernos y las empresas.

Lewinsohn (2020) nos advierte que el uso del agua genera potencialmente diversos impactos sociales, tanto por la escasez de su disponibilidad como por el riesgo de inundaciones, además de “posibles infiltraciones de relaves antiguos y/o abandonados; asimismo, la calidad del agua de los efluentes de operaciones mineras son los múltiples desafíos asociados con la gestión del agua en la minería”. El autor también señala que “a nivel mundial, las organizaciones no gubernamentales, los representantes de los accionistas y las instituciones financieras están alentando el desarrollo de estándares para reconocer que el agua tiene una naturaleza de recurso compartido con alto valor social, cultural, ambiental y económico, lo que incluye una mayor divulgación y transparencia por parte de las empresas sobre los riesgos operativos, de captación y de la cadena de suministro del agua”. Una institucionalidad que asegure el diálogo entre actores y el acceso a la información parece clave para asegurar una buena gobernanza del agua en los emprendimientos mineros de la Argentina.

Referencias

Angelelli, V. (1934). Las Minas de Oro de Gualilán. San Juan. 37 p. Dirección de Minas y Geología. Buenos Aires.

Bibiloni, H. (2008). Ambiente y política. Una visión integradora para gestiones viables. Ediciones RAP, Buenos Aires.

Consejo Hídrico Federal (COHIFE) (2003). Principios Rectores de Política Hídrica de la República Argentina. Fundamentos del Acuerdo Federal del Agua. Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina. URL: hidraulica.gob.ar/legales/principios_rectores_de_politica_hidrica.pdf

Cardó, R., Segal, S.J., Zubía, M.A. & Ferpozzi, F.J. (2003) Metalogenia del Oro de la República Argentina. Anales XXXVIII. Buenos Aires, Servicio Geológico Minero Argentino. Instituto de Geología y Recursos Minerales. Dirección de Recursos Geológico Mineros, Argentina.

Gabay, M. (2018). Apuntes sobre el sistema normativo ambiental argentino. En Gutiérrez, R. A. (Comp.), Construir el ambiente: Sociedad, Estado y políticas ambientales en Argentina Buenos Aires: Teseo. Pp. 57-101.

Lewinsohn, J. L. (2020). “Estado del arte de las estadísticas mineras del uso de agua y energía en los países andinos: intercambio metodológico entre Chile y el Perú en el marco de la cooperación Sur-Sur”, Documentos de Proyectos (LC/TS.2020/186), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).

Logsdon, M. J.; Hagelstein, K. y Mudder, T. I. (2001). El Manejo del Cianuro en la Extracción de Oro. Traducido de la publicación en inglés titulada The Management of Cyanide in Gold Extraction. Traducción al español: Ana María Paonessa Primera impresión de la publicación en español, ISBN 1-895720-35-4.

Ministerio de Hacienda (2019). Informes de Cadena de Valor. Minerales Metalíferos: Oro-marzo 2019. Ministerio de Hacienda de la República Argentina, Buenos Aires.

Murguía, D. I & Bohling, K. (2013) Sustainability reporting on large-scale mining conflicts: the case of Bajo de la Alumbrera, Argentina. *Journal of Cleaner Production*. Elsevier SCI LTD. Amsterdam vol.41 p 202 - 209. ISSN:0959-6526.

Schmidt, J. W., L. Simovic y E. Shannon, (1981). Development Studies for Suitable Technologies for the Removal of Cyanide and Heavy Metals from Gold Milling Effluents. *Actas de la 36a Conferencia sobre Residuos Industriales*, Purdue University, Lafayette, Indiana, EE.UU., pp. 831–849.

Secretaría de Minería (2020). Minería Argentina 2020 1er Semestre. Ministerio de Desarrollo Productivo de la Nación, Argentina. URL: argentina.gob.ar/sites/default/files/mineria_argentina_primer_semestre_2020.pdf

TELAM (22-03-2022). *Argentina, en el sexto lugar en cantidad de recursos hídricos de agua dulce per cápita*. Telam Digital. <https://www.telam.com.ar/notas/202203/587068-argentina-agua-dulce-per-capita-dia-mundial-recursos-hidricos.html> 22-3-22.

UNESCO (2020). Agua y Cambio Climático. Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2020. Programa Mundial de la UNESCO de Evaluación de los Recursos Hídricos. Colombella, Perugia, Italia.

Vardé, O. et al (2021). La minería en la Argentina: contribuciones de la ingeniería para su desarrollo sostenible. 1ra edición especial: Centro Argentino de Ingenieros; Academia Nacional de Ingeniería. PROSA AMERIAN Editores. Ciudad Autónoma de Buenos Aires.

Young, C.A. y T.S. Jordan, (1995). Cyanide Remediation: Current and Past Technologies Proceedings of the 10th Annual Conference on Hazardous Waste Research. Department of Metallurgical Engineering, Montana Tech, Butte, MT 59701.

Zaidi, A. and Whittle, L. (1987). Evaluation on the full-scale alkaline chlorination treatment plant at Giant Yellowknife Mines Ltd. Report of wastewater technology center. Canada.

CAPÍTULO 2

Estudio de caso en Brasil sobre la presencia de arsénico en el río Das Velhas: ¿Origen natural o pasivo ambiental de la exploración de oro?

Marília Carvalho de Melo^{1,2} (prof.marilia.melo@unincor.edu.br), Katiane Cristina de Almeida³, Vitor Faria de Carvalho Oliveira³, Vanessa Kelly Saraiva³, Elisa Dias de Melo y Ana Silvia Pereira Santos⁴

¹Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável de Minas Gerais ²Universidade Vale do Rio Verde

³Instituto Mineiro de Gestão das Águas/Minas Gerais

⁴Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Introducción

En el Estado de Minas Gerais, situado en la región sureste de Brasil, el Programa Aguas de Minas dirigido por el Instituto Mineiro de Gestión de las Aguas (IGAM), es el responsable por monitorear la calidad de las aguas superficiales y subterráneas. Desde 1997, el programa pone a disposición una serie histórica de la calidad del agua en el Estado y proporciona datos esenciales para la gestión de los recursos hídricos y del medio ambiente. Los resultados, almacenados en una base de datos, con información actual e histórica, permiten observar la evolución de la calidad del agua en las últimas dos décadas. Estos son evaluados por el equipo técnico del IGAM, que elabora mapas e informes, informando al público sobre la situación de la calidad del agua, pudiendo acceder a ellos a través de internet.

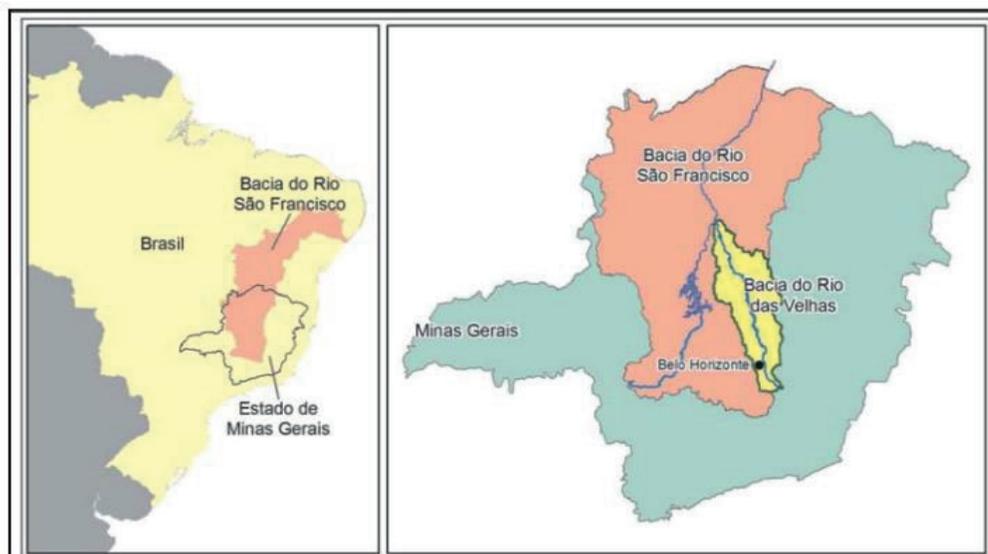


Figura 2.1. Ubicación de la cuenca del río das Velhas/MG, Brasil. Fuente: MACEDO; MAGALHÃES, 2008.

Ubicada en la región central de Minas Gerais, la cuenca del río das Velhas (río de las Viejas) comprende un área de 27867,2 km² (Figura 2.1). Su territorio abarca 51 municipios, de los cuales 14 están parcialmente contenidos en la cuenca y 15 están ubicados en la Región Metropolitana de

Belo Horizonte (RMBH). El río das Velhas es uno de los principales afluentes del río São Francisco, considerado el río de la integración nacional en Brasil. Este curso de agua junto con el sistema Paraopeba, aportan aproximadamente el 92% del agua para el abastecimiento de la RMBH (PMSB-BH, 2015).

El curso alto de la cuenca del río das Velhas comprende toda la región denominada Cuadrilátero de Hierro (el 60% de toda la producción nacional de hierro proviene de esta región) y presenta el mayor contingente de población, con una expresiva actividad económica, concentrada en la RMBH, donde se concentran las principales fuentes de contaminación de toda la cuenca. Los principales agentes contaminantes son los residuos industriales y domésticos, y los efluentes generados por las actividades industriales y mineras.

El marco del río das Velhas está definido por la Deliberación Normativa del Consejo Estatal de Política Ambiental (COPAM) nº 10/1986. A lo largo del tramo monitoreado, es posible observar marcos que varían desde especial (más restrictivo) cerca de su nacimiento, hasta la clase 3 (menos restrictiva) en la RMBH. Así, los valores referentes al monitoreo de la calidad del agua se confrontan con los límites establecidos para las clases 1, 2 y 3 de la Deliberación Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG nº 01/2008, que prevé la clasificación de los cuerpos de agua y da las directrices ambientales para su encuadre en el Estado de Minas Gerais.

Entre los diversos contaminantes presentes en la cuenca del río das Velhas, se destaca la presencia de arsénico en concentraciones superiores a los estándares ambientales en aguas superficiales (IGAM, 2020). Según la Compañía Ambiental del Estado de São Paulo (CETESB, 2018), el arsénico se introduce en el agua por disolución de rocas y minerales, efluentes industriales (incluyendo los residuos mineros) y por deposición atmosférica. Además, el arsénico es un elemento con implicaciones para el medio ambiente y la salud humana por su toxicidad, siendo considerado un elemento cancerígeno (NEWMAN; UNGER, 2002).

Deschamps et al. (2007) realizaron un estudio de investigación de arsénico en la región del Cuadrilátero de Hierro y reportaron que el río das Velhas tiene como importante afluente el arroyo Cardoso en la ciudad de Nova Lima/MG, que pasó a llamarse arroyo Água Suja (Agua Sucia), en cuyo valle se implantaron depósitos de residuos mineros auríferos (entre 1930 y 1940) que contenían niveles significativos de arsénico. También en Nova Lima, frente a uno de los depósitos de desechos mineros, comenzó a construirse en 1910 una fábrica de trióxido de arsénico, que funcionó desde principios de la década de 1940 hasta 1975. La materia prima era el mineral de la Mina Morro Velho (Morro Viejo), que tenía un alto contenido de arsenopirita, la cual se transformaba en trióxido de arsénico, que a su vez se recuperaba y comercializaba. Según Deschamps et al. (2007), esto se debió principalmente a la minimización de costos, a la facilidad de transportar los desechos a estas áreas y a la posibilidad de distribuirlos a lo largo de los drenajes afluentes.

Como resultado de un acuerdo de ajuste de conducta firmado entre la fiscalía y la actual empresa minera de oro en Nova Lima, con la intervención de la Fundación Ambiental del Estado de Minas Gerais, en 2003 se inició la recuperación de 6 antiguos depósitos de desechos de la minería de oro. Las intervenciones consistieron en encerrar y sellar los desechos y construir un sistema de drenaje (DESCHAMPS et al., 2007). Por lo anterior, en este capítulo se analizará la información sobre la presencia de arsénico total (AST) y disuelto (ASD) en las aguas superficiales del río das Velhas,

considerando la serie histórica de datos de monitoreo del IGAM durante el período de 2005 a 2021.

Análisis de información

Entre 2008 y 2016, se monitorearon mensualmente alrededor de 19 puntos a lo largo del canal del río das Velhas. Actualmente, 10 puntos de recolección son monitoreados mensualmente en el canal del río das Velhas (Tabla 2.1). La recolección y análisis de laboratorio de las muestras de agua fueron realizados por un laboratorio contratado, debidamente acreditado en los términos de la ABNT NBR ISO/IEC 17025/2005 ante el Instituto Nacional de Metrología, Normalización y Calidad Industrial (INMETRO).

Tabla 2.1. Red de Monitoreo del río das Velhas, operada por el IGAM, en Minas Gerais, Brasil. Fuente: IGAM, 2022.

Código	Clase de encuadre	Ubicación
BV001	Clase Especial	Río das Velhas próximo a su nacimiento
AV010	Clase 1	Río das Velhas aguas abajo del arroyo do Funil
BV013	Clase 2	Río das Velhas aguas arriba de la desembocadura del río Itabirito
BV037	Clase 2	Río das Velhas aguas abajo de la desembocadura del río Itabirito
AV210	Clase 2	Río das Velhas en la ciudad de Rio Acima
BV139*	Clase 2	Río das Velhas aguas arriba de la ETA/COPASA, en Bela Fama
BV063	Clase 2	Río das Velhas aguas abajo del arroyo Água Suja, en Nova Lima
BV067	Clase 2	Río das Velhas aguas arriba del arroyo Sabará
BV080	Clase 3	Río das Velhas aguas abajo del arroyo Sabará
BV083	Clase 3	Río das Velhas aguas abajo del arroyo Arrudas
BV105*	Clase 3	Río das Velhas aguas abajo del arroyo de la Onça
BV153	Clase 3	Río das Velhas aguas abajo del arroyo de la Mata
SC16	Clase 3	Río das Velhas aguas abajo del vertedero de Santa Luzia
BV137	Clase 3	Río das Velhas en el puente Raul Soares, en Lagoa Santa
BV138	Clase 3	Río das Velhas en el Parque del Sumidouro em Lagoa Santa
BV156*	Clase 2	Río das Velhas aguas abajo del río Jabuticatubas en Baldim
BV141*	Clase 2	Río das Velhas en la ciudad de Santana do Pirapama
BV142	Clase 2	Río das Velhas aguas abajo del arroyo Santo Antônio en Presidente Juscelino
BV150*	Clase 2	Río das Velhas aguas abajo del río Paraúna, en la localidad de Senhora da Glória
BV152*	Clase 2	Río das Velhas entre los ríos Paraúna y Pardo Grande
BV146*	Clase 2	Río das Velhas aguas abajo del río Pardo Grande
BV151*	Clase 2	Río das Velhas aguas abajo del arroyo del Vinho en Lassance
BV148*	Clase 2	Río das Velhas en la ciudad de Várzea de la Palma
BV149*	Clase 2	Río das Velhas aguas arriba de su desembocadura en el río São Francisco en Guaicuí

*Puntos de seguimiento mensual

Para ayudar en la evaluación del comportamiento del arsénico en el río das Velhas, los resultados se analizaron por año, por estación y también por período climático (temporada de lluvias y estación seca), considerando las fracciones de arsénico total y disuelto, mediante el uso de gráficos box-plot, en donde se pueden apreciar las concentraciones medianas, el primer y tercer percentil y los valores atípicos medidos en cada estación de monitoreo. Las Figuras 2.2 y 2.3 muestran los gráficos box-plot de las variables de arsénico total y disuelto, permitiendo verificar la evolución espacial de estas variables a lo largo de las estaciones del río das Velhas, en el sentido aguas arriba-aguas abajo (o nacimiento-desembocadura).

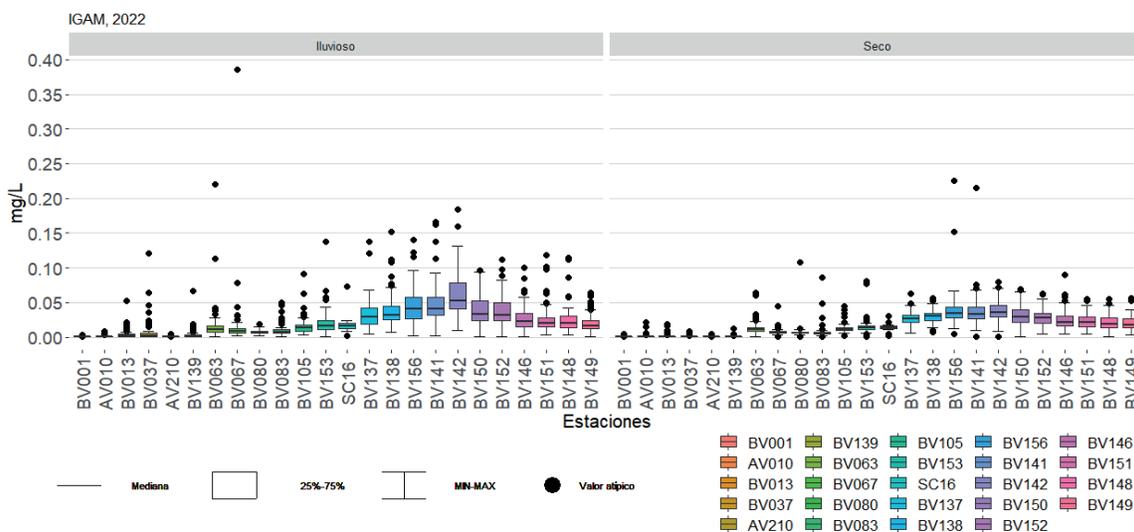


Figura 2.2. Box-plot de las concentraciones de arsénico total en las estaciones monitoreadas por el IGAM en el río das Velhas, entre 2005 y 2021, en las estaciones lluviosa y seca. Fuente: Propios autores, 2022.

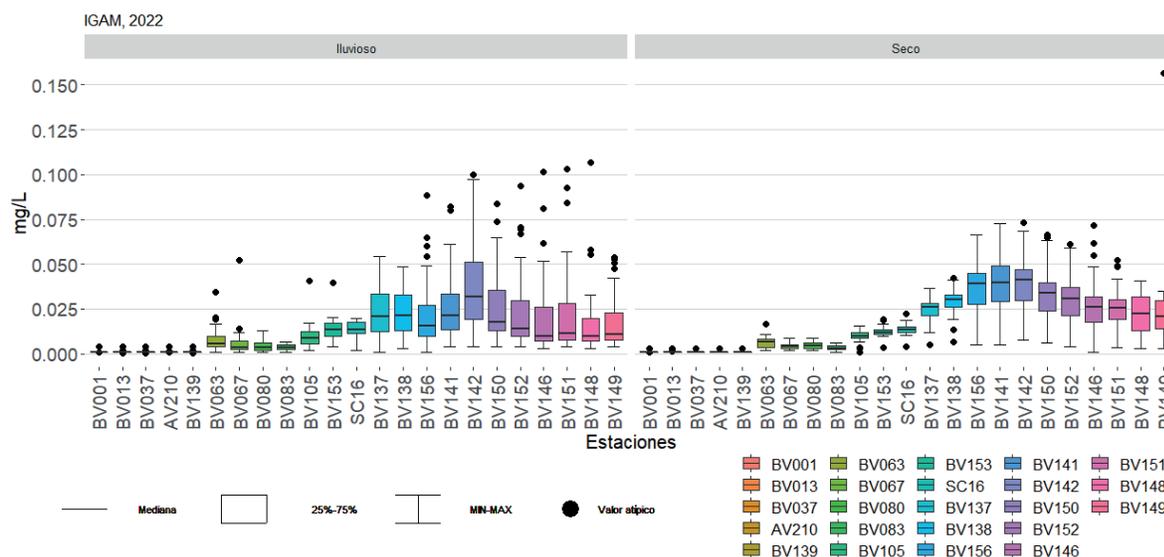


Figura 2.3. Box-plot de las concentraciones de arsénico disuelto en las estaciones monitoreadas por el IGAM en el río das Velhas, entre 2005 y 2021, en las estaciones lluviosa y seca. Fuente: Propios autores, 2022.

En relación con la comparación de las normas que establecen los límites de presencia de arsénico en aguas superficiales, sólo la fracción total presenta valores máximos permitidos, según la

deliberación COPAM/CERH-MG n°01/2008, siendo 0,01 mg/L para las clases 1 y 2, y 0,033 mg/L para la clase 3. Se destaca que la ordenanza sobre la potabilidad del Ministerio de Salud de Brasil (Ordenanza GM/MS n° 888 de 2021) y la Organización Mundial de la Salud, también establecen el límite de 0,01 mg/L (10 µg/L) para el agua potable. La Tabla 2.2 se refiere a la estadística descriptiva de los datos seleccionados para el arsénico total y disuelto en el río das Velhas.

Tabla 2.2. Estadística descriptiva del arsénico total y disuelto en el río das Velhas (canal) y las estaciones evaluadas, en el periodo de 2005 a 2021. Fuente: Propios autores, 2022.

As (mg/L)	Estación	N	máx	mín	media	P50	P25	P75	% > LQ	% outlier
ASD	Todos los puntos del Canal	1580	0,157	0,000	0,017	0,011	0,003	0,026	20,3	2,7
AST	Todos los puntos del Canal	3116	0,386	0,000	0,022	0,016	0,006	0,031	13,4	3,6
ASD	BV001	55	0,004	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	96,4	7,3
ASD	BV013	55	0,004	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	89,1	16,4
ASD	BV037	55	0,004	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	94,5	10,9
ASD	AV210	41	0,004	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	95,1	9,8
ASD	BV139	91	0,004	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	97,8	8,8
ASD	BV063	53	0,034	0,001	0,007	0,006	0,004	0,009	5,7	9,4
ASD	BV067	55	0,052	0,001	0,005	0,004	0,002	0,006	5,5	5,5
ASD	BV080	55	0,013	0,001	0,004	0,004	0,003	0,006	9,1	1,8
ASD	BV083	55	0,007	0,001	0,003	0,003	0,002	0,005	7,3	0,0
ASD	BV105	91	0,041	0,001	0,010	0,009	0,007	0,012	3,3	1,1
ASD	BV153	47	0,039	0,003	0,013	0,012	0,010	0,015	2,1	4,3
ASD	SC16	38	0,022	0,002	0,013	0,014	0,012	0,016	2,6	7,9
ASD	BV137	55	0,054	0,001	0,023	0,025	0,014	0,030	3,6	1,8
ASD	BV138	54	0,048	0,003	0,026	0,027	0,015	0,033	1,9	0,0
ASD	BV156	90	0,088	0,001	0,029	0,026	0,014	0,041	2,2	1,1
ASD	BV141	90	0,082	0,004	0,033	0,031	0,019	0,045	1,1	0,0
ASD	BV142	55	0,100	0,004	0,040	0,038	0,021	0,050	1,8	3,6
ASD	BV150	90	0,084	0,004	0,029	0,025	0,016	0,039	1,1	1,1
ASD	BV152	91	0,093	0,004	0,026	0,025	0,012	0,035	1,1	3,3
ASD	BV146	91	0,102	0,001	0,023	0,019	0,009	0,031	3,3	3,3
ASD	BV151	91	0,103	0,004	0,023	0,020	0,010	0,030	1,1	3,3
ASD	BV148	91	0,107	0,003	0,019	0,015	0,008	0,026	3,3	3,3
ASD	BV149	91	0,157	0,003	0,020	0,016	0,009	0,027	2,2	2,2
AST	BV001	63	0,005	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	79,4	34,9
AST	AV010	60	0,021	0,000	0,002	0,001	0,000	0,001	71,7	15,0
AST	BV013	128	0,052	0,000	0,003	0,001	0,000	0,003	46,9	11,7
AST	BV037	132	0,121	0,000	0,004	0,001	0,000	0,002	59,1	13,6
AST	AV210	62	0,005	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	72,6	45,2
AST	BV139	168	0,067	0,000	0,002	0,001	0,000	0,002	63,7	12,5
AST	BV063	140	0,220	0,000	0,015	0,011	0,008	0,016	1,4	7,9
AST	BV067	132	0,386	0,001	0,012	0,007	0,006	0,010	0,8	9,8

AST	BV080	68	0,108	0,000	0,009	0,006	0,005	0,008	2,9	10,3
AST	BV083	127	0,086	0,000	0,009	0,006	0,005	0,008	2,4	11,8
AST	BV105	163	0,091	0,002	0,014	0,012	0,010	0,015	1,2	9,8
AST	BV153	124	0,137	0,001	0,019	0,014	0,012	0,019	0,8	8,1
AST	SC16	55	0,073	0,001	0,016	0,014	0,013	0,017	0,0	9,1
AST	BV137	132	0,138	0,005	0,031	0,028	0,020	0,035	0,0	7,6
AST	BV138	116	0,152	0,007	0,035	0,031	0,025	0,039	0,0	6,9
AST	BV156	168	0,226	0,002	0,042	0,037	0,028	0,050	0,0	5,4
AST	BV141	167	0,215	0,000	0,043	0,037	0,029	0,051	0,6	4,8
AST	BV142	132	0,184	0,001	0,049	0,044	0,032	0,058	0,8	5,3
AST	BV150	153	0,096	0,001	0,036	0,031	0,023	0,043	1,3	5,9
AST	BV152	168	0,112	0,000	0,033	0,029	0,021	0,041	1,2	6,5
AST	BV146	168	0,100	0,000	0,027	0,022	0,015	0,031	1,2	7,1
AST	BV151	154	0,118	0,003	0,024	0,020	0,015	0,029	0,6	4,5
AST	BV148	168	0,115	0,000	0,023	0,019	0,014	0,027	0,6	4,8
AST	BV149	168	0,063	0,000	0,020	0,017	0,012	0,025	1,2	6,0

Es posible verificar que, durante el período estudiado, en las condiciones estacionales y espaciales, las concentraciones de arsénico fueron altas en el río das Velhas, presentando un alto porcentaje de violaciones de la norma legal para aguas superficiales.

Los valores de arsénico total y disuelto en el río das Velhas se acentúan significativamente después de la región de Nova Lima (BV063), donde es posible observar que en casi todas las mediciones los resultados de las concentraciones de arsénico total y disuelto presentan valores de mediana por encima de 0,01 mg/L a partir de este tramo (Figuras 2.3 y 2.4), extendiéndose a lo largo de todo el río hasta su desembocadura en el río São Francisco. Los resultados en este tramo del río pueden estar asociados a la presencia y enriquecimiento por arsénico, probablemente asociado a prácticas antiguas de exploración de oro.

En el curso superior del río das Velhas, a partir del tramo donde el porcentaje de violaciones de la norma ambiental se vuelve más expresivo, entre las estaciones BV063 (Nova Lima) y SC16 (Santa Luzia), los valores de la mediana variaron entre 0,006 mg/L y 0,014 mg/L AST. Sin embargo, entre las estaciones BV137 (Lagoa Santa) y BV149 (Barra do Guaicuí) los valores de la mediana variaron entre 0,017 y 0,044 mg/L AST, es decir, el hecho de que los dos intervalos no se crucen, indica una diferencia considerable en los valores de las medianas entre los tramos descritos.

En cuanto a la variación estacional, se observa que el arsénico disuelto tiene valores de mediana más altos en la época seca ($P50 = 0,014$ mg/L ASD), en comparación con la época de lluvias ($P50 = 0,009$ mg/L ASD). La prueba estadística de Mann Whitney, para comparar dos muestras, confirmó la diferencia entre los resultados obtenidos para las estaciones, en el período seco y lluvioso, a un nivel de significancia del 5%, sugiriendo que existe diferencia en la liberación del elemento en los períodos climáticos, para aguas superficiales.

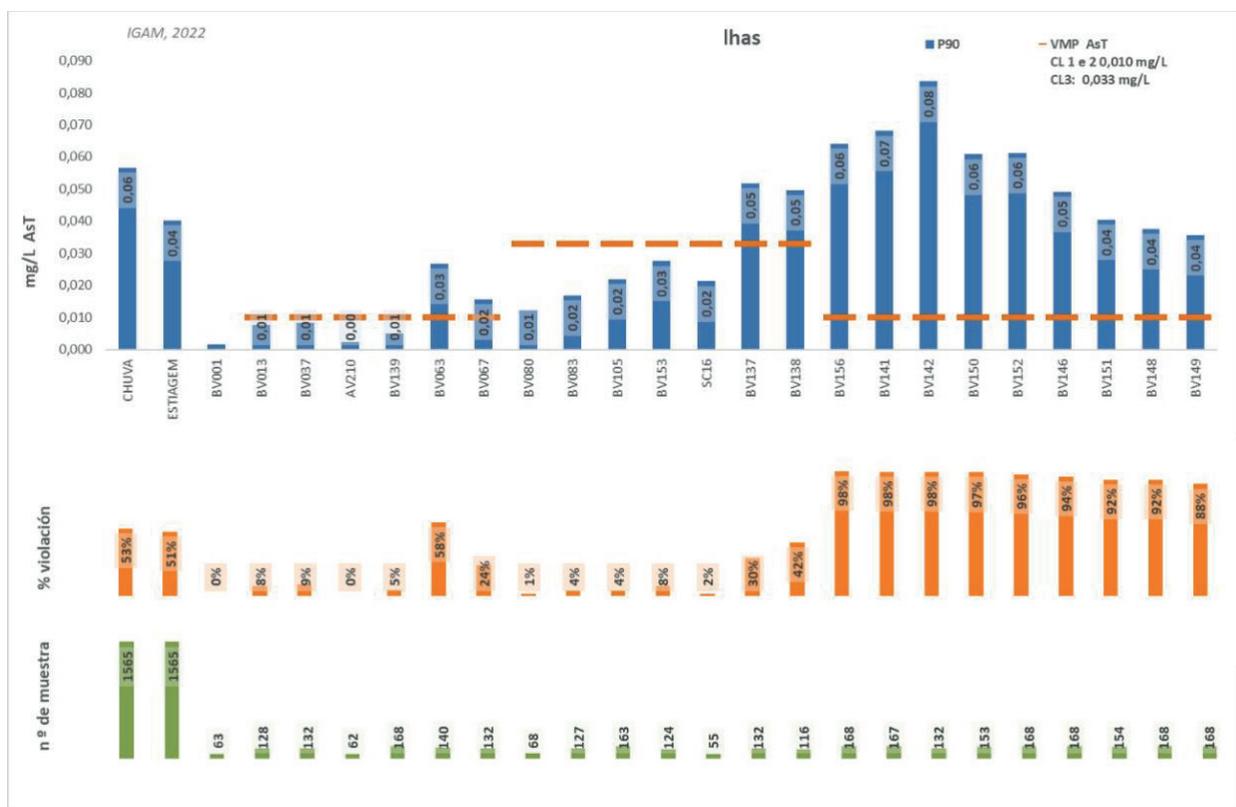


Figura 2.4. Resultados del percentil 90, número de violaciones de las normas legales para el arsénico total en las estaciones monitoreadas por el IGAM en el río das Velhas de 2005 a 2021. Fuente: Propios autores, 2022.

Los resultados del percentil 90 y los porcentajes de violación a los límites legales de los parámetros analizados en las estaciones del río das Velhas indicaron un aumento en los valores de concentración, tanto para la fracción total como disuelta (Figura 2.4) desde la región de Baldim (BV137), con resultados que superan en casi diez veces el límite establecido en la legislación. Entre los municipios de Baldim y Várzea da Palma los resultados obtenidos para el arsénico total estuvieron por encima de los límites legales en más del 90% de las mediciones realizadas, como se ilustra en la Figura 2.4. Este hecho merece atención, ya que las fuentes antropogénicas y naturales de arsénico se concentran en los tramos altos de la cuenca, en la región de Nova Lima. Los municipios de Baldim y Várzea da Palma están ubicados aproximadamente a 120 y 350 km, respectivamente, después de la región de Nova Lima. Vale la pena señalar que el municipio de Várzea da Palma también es abastecido por las aguas del río das Velhas, además de varios usos de los recursos hídricos a lo largo de su cauce.

Según la Cetesb (2018), el arsénico puede liberarse de la fase sólida en condiciones reductoras, lo que da como resultado formas de arsénico con movilidad que pueden filtrarse hacia aguas subterráneas o fluir hacia aguas superficiales. De acuerdo con la agencia, un aumento del pH puede elevar la concentración de arsénico disuelto en el agua. Esta es una de las hipótesis que pueden contribuir al aumento de las concentraciones de arsénico total y disuelto, a partir de la estación BV156 en Baldim, en particular en Santana do Pirapama (BV141), donde los resultados de pH tienden a mostrar un aumento, como se ilustra en la Figura 2.5.

En la Figura 2.6 es posible verificar que los resultados de P90 y los porcentajes de violación de los límites legales del pH en las estaciones del cauce del río das Velhas, tienden a aumentar a partir

de la estación BV141, presentando además un mayor porcentaje de resultados, incumpliendo la norma legal.

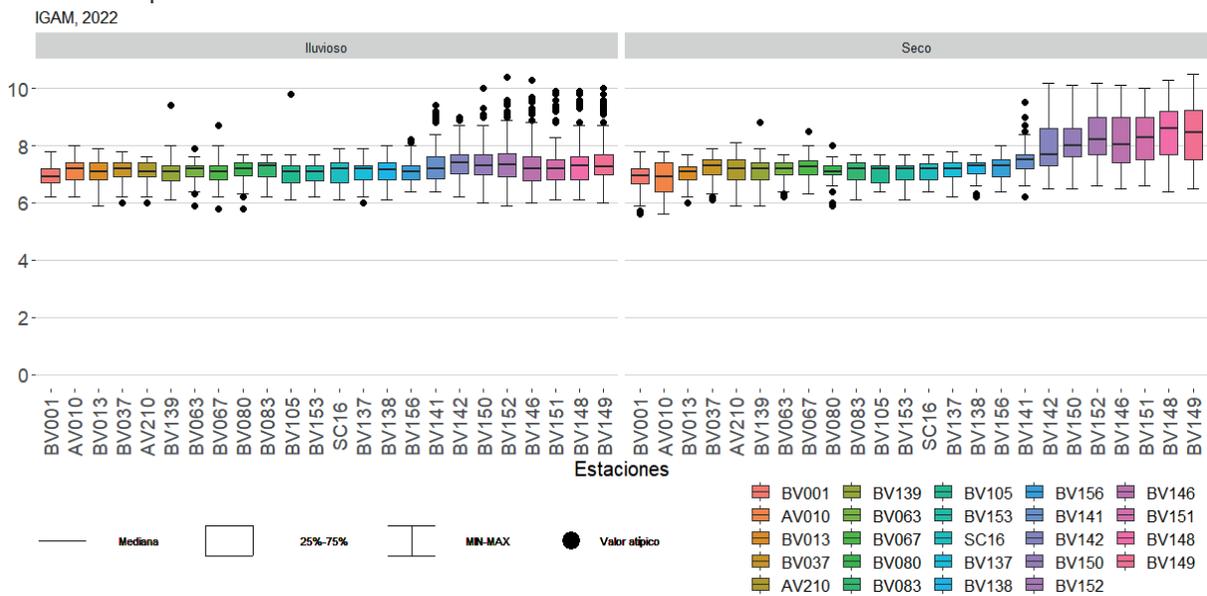


Figura 2.5. Box-plot de los valores del pH en las estaciones monitoreadas por el IGAM en el río das Velhas de 2005 a 2021. Fuente: Propios autores, 2022.

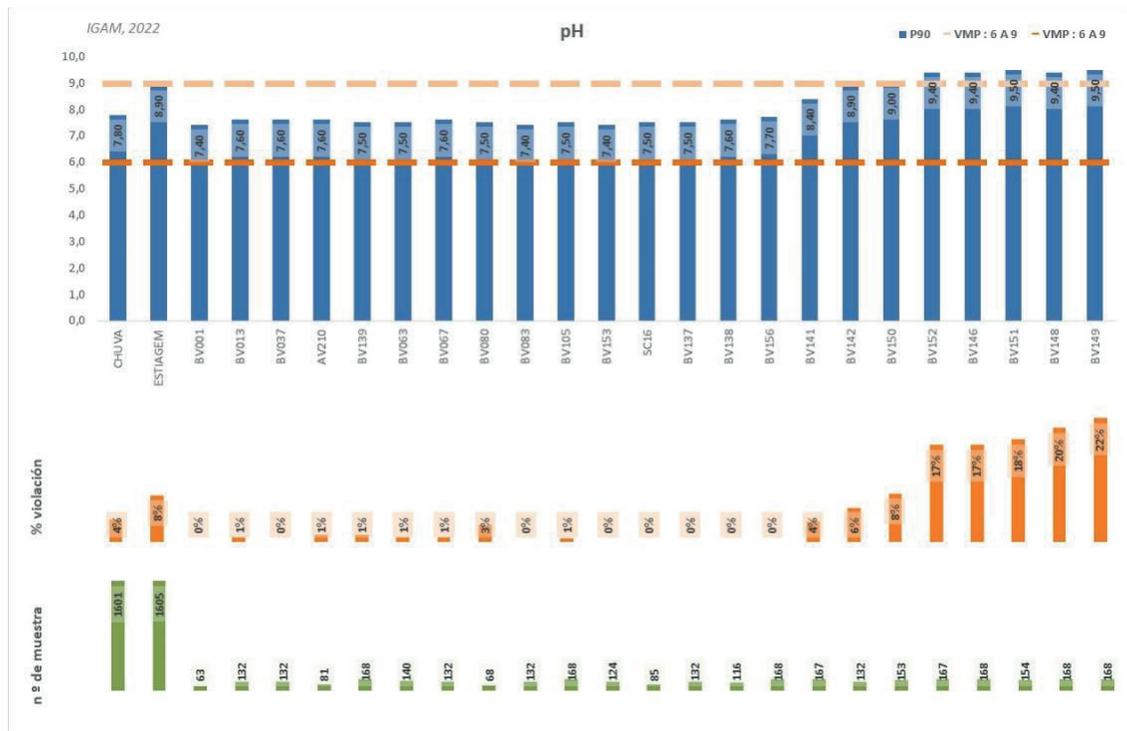


Figura 2.6. Resultados del percentil 90, número de violaciones de las normas legales del pH en las estaciones monitoreadas por el IGAM en el río das Velhas de 2005 a 2021. Fuente: Propios autores, 2022.

Además, los datos del mapeo geoquímico de la cuenca del río das Velhas (VIGLIO; CUNHA, 2010; VIGLIO; CUNHA, 2018) indican que los suelos de la región cercana al municipio de

Baldirim tienen niveles atípicos de arsénico (Figura 2.7), lo que puede explicar los altos valores de las medianas de arsénico en este tramo del río.

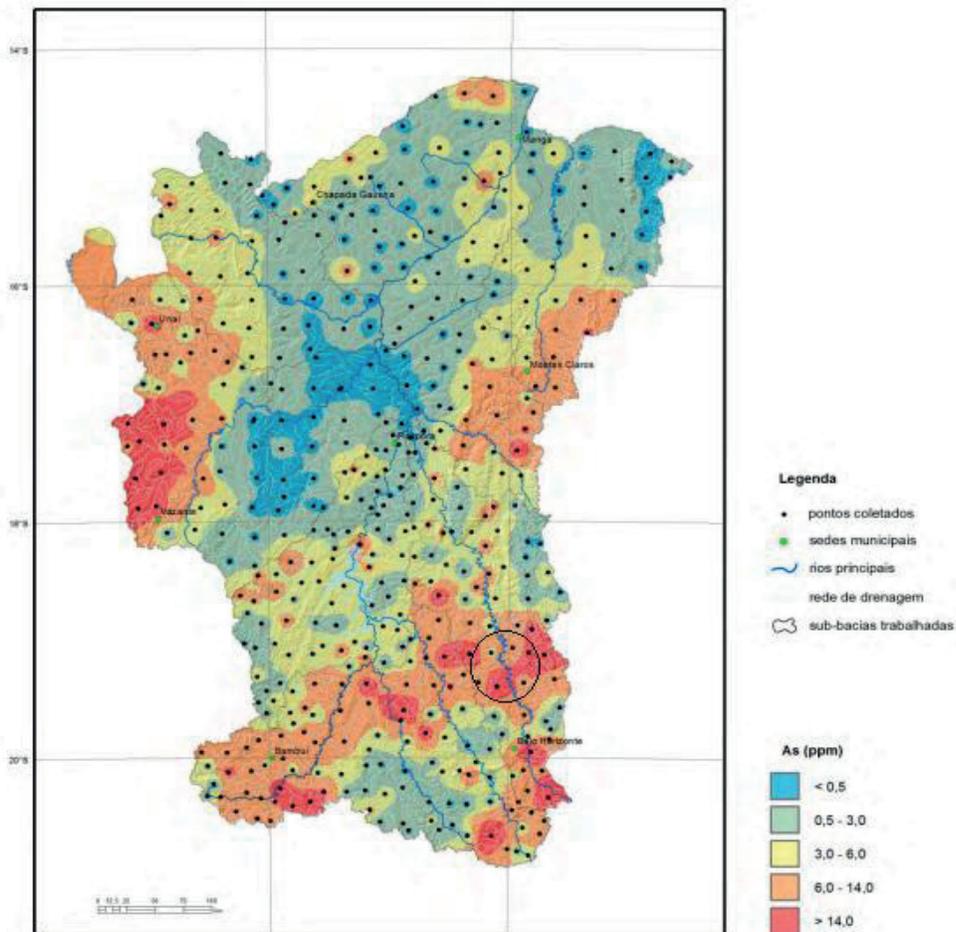


Figura 2.7. Mapa de presencia de arsénico en los suelos de la cuenca del río São Francisco. Destacada (en círculo) la cuenca del río das Velhas, en el municipio de Baldirim. Fuente: Viglio; Cunha, 2018 (CPRM), 2018

La evolución temporal del arsénico total y disuelto en el río das Velhas se puede visualizar en las Figuras 2.8 y 2.9. En el caso del arsénico disuelto, pueden encontrarse datos a partir del 2013, cuando dicho parámetro comenzó a ser monitoreado mensualmente. En el caso del arsénico total, a lo largo de los años las concentraciones medianas fluctuaron entre 0,008 y 0,027 mg/L AST en la época de lluvias y entre 0,005 y 0,026 mg/L AST en la época seca. Sin embargo, es posible notar que a lo largo de los años los resultados de arsénico total no presentaron grandes variaciones, manteniéndose con valores casi siempre por encima de los límites legales. Trindade (2013) a través del estudio de series temporales de los parámetros monitoreados trimestralmente en el período de 2008 a 2011 por el IGAM, observó una tendencia de aumento en la concentración de arsénico total en las estaciones ubicadas en Nova Lima (BV063), Santa Luzia (BV153) y Santo Hipólito (BV152), habiendo asociado dichos resultados a la distribución del arsénico en el contexto geológico de la cuenca y a los diferentes procesos de disponibilidad de este elemento en el agua.

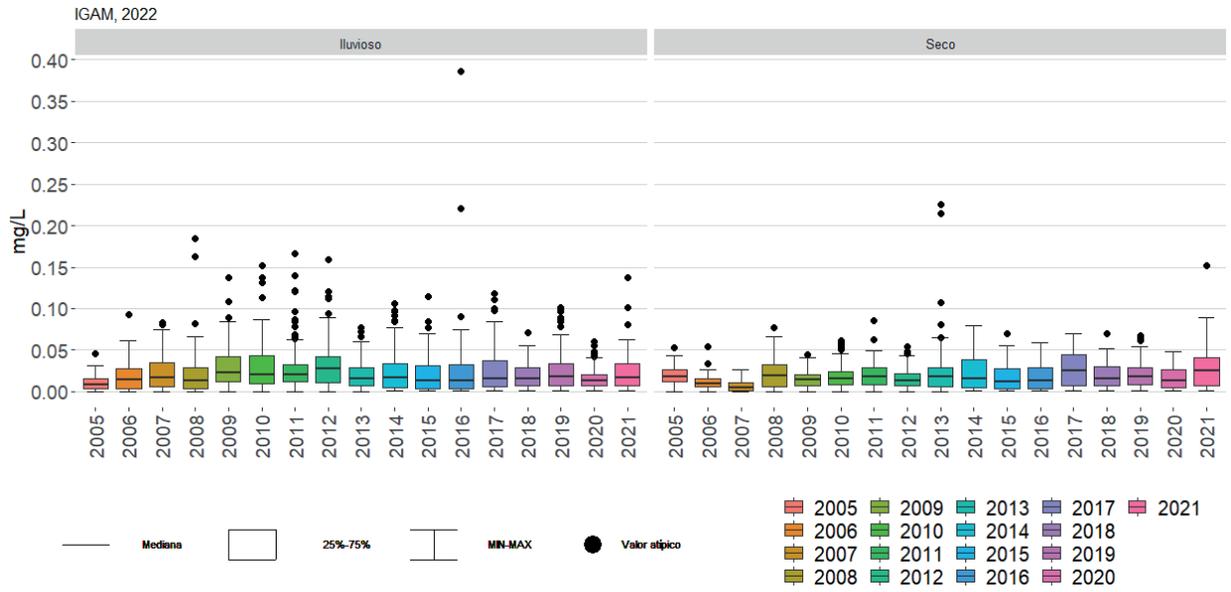


Figura 2.8. Box-plot de la evolución temporal de los valores de arsénico total en el río das Velhas de 2005 a 2021. Fuente: Propios autores, 2022.



Figura 2.9. Box-plot de la evolución temporal de los valores de arsénico disuelto en el río das Velhas de 2005 a 2021. Fuente: Propios autores, 2022.

De igual forma, el arsénico disuelto se viene presentando a lo largo de los años con valores superiores a 0,01 mg/L, lo que corresponde al límite definido para aguas clasificadas como clase 2 para el arsénico total (Figura 2.9). En este caso, se nota que las concentraciones medianas son mayores en la época seca y también que hay un incremento en los valores de las medianas a partir del año 2017, con excepción únicamente del año 2020.

Conclusiones

Es posible verificar que durante el período estudiado, en las condiciones estacionales y espaciales, las concentraciones de arsénico total fueron altas en el río das Velhas, presentando alto porcentaje de violaciones a la norma legal para aguas superficiales según la normativa brasileña, lo cual indica un riesgo potencial al usar los recursos hídricos, considerando las implicaciones que el arsénico puede tener en la calidad del medio ambiente y los riesgos a la salud humana según su forma disponible en el medio ambiente. La alta prevalencia de resultados de la fracción disuelta por encima de 0,01 mg/L refuerza los posibles riesgos informados anteriormente.

Los resultados de arsénico en general tendieron a un comportamiento diferente según el período climático, sugiriendo que existe una liberación heterogénea de este elemento a lo largo del año hacia las aguas superficiales, en las dos fracciones evaluadas (total y disuelta).

Los valores de arsénico total y disuelto en el río das Velhas se acentúan significativamente después de la región de Nova Lima (BV063), región históricamente conocida por la actividad de exploración y procesamiento de oro. Incluso tras las acciones ambientales implementadas en 2003 para la explotación en Nova Lima, los efectos de la contaminación ambiental por arsénico en el río das Velhas aún se perciben, incluso después de décadas, como lo muestran los resultados del monitoreo realizado por el IGAM.

Los resultados del monitoreo también mostraron valores anómalos de arsénico en regiones de aguas abajo del río das Velhas, lejos de Nova Lima, con concentraciones aún mayores en su curso medio, lo cual puede estar asociado a las características geoquímicas de los suelos de la región, según el mapeo de la cuenca del río das Velhas realizado por la Compañía de Investigación de Recursos Minerales de Brasil.

Por lo tanto, es importante continuar el monitoreo de la calidad ambiental, con el fin de apoyar las acciones y lineamientos de las gestiones gubernamentales, que permitan la práctica sostenible de la actividad económica, protegiendo al medio ambiente y a la salud humana.

Referencias

BELO HORIZONTE. Plano Municipal de Saneamento. Prefeitura Municipal de Belo Horizonte 2012-2015, 2014. Disponible en: < https://prefeitura.pbh.gov.br/sites/default/files/estrutura-de-governo/obras-e-infraestrutura/2018/documentos/texto_2014.pdf>. Fecha de consulta: 23/04/2021

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAL – CPRM. Projeto Geoquímica MultiUsos no Estado de Minas Gerais: Altas Geoquímico da Bacia do Rio das Velhas. / Eduardo Paim Viglio, Fernanda Gonçalves da Cunha. – Belo Horizonte: CPRM – BH, (2010). 196 pag. 2010.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. (2018). FIT - Ficha de Informação Toxicológica. Disponible en: <https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wp-content/uploads/sites/24/2013/11/Arsenio.pdf>. Fecha de consulta: 23 de abril de 2022.

CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL; CONSELHO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS DE MINAS GERAIS. Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG n. 01, de 05 de maio de 2008. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento e estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Belo Horizonte: COPAM, 2008.

DESCHAMPS, E.; MATSCHULLAT, J. Arsênio antropogênico e natural - Um estudo em regiões do Quadrilátero Ferrífero. 1 ed. Belo Horizonte: Gráfica e Editora Sigma Ltda, (2007), 330p. 3.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS - IGAM. INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. Avaliação da qualidade das águas superficiais de Minas Gerais em (2019): Resumo Executivo Anual. Belo Horizonte: IGAM, 2021. 211 p.: il.. Acesso em: 24 de abril de 2022.

MACEDO, D.; MAGALHÃES, S. (2008). Utilização de sistemas informativos geográficos no apoio às ações de mobilização social e pesquisa no Projeto Manuelzão. 150-164. 10.5281/zenodo.2575693.

MAGALHÃES, M. N.; DE LIMA, A. C. P. Noções de probabilidade e estatística. Editora da Universidade de São Paulo, 2002.

NEWMAN, M. C.; UNGER, M. A. Fundamentals of ecotoxicology. 2. ed. Boca Raton: CRC, 2002.

R CORE TEAM. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2021b. URL <https://www.R-project.org/>.

VIGLIO, E. P.; CUNHA, F. G. Atlas geoquímico da bacia do rio das Velhas. Belo Horizonte: CPRM, 2010. 181 p. il. color. Programa Geologia do Brasil - PGB. Projeto Geoquímica Multiusos no Estado de Minas Gerais. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/14816>. Fecha de consulta: 24 de abril de 2022.

VIGLIO, E. P.; CUNHA, F. G. Atlas geoquímico da bacia do Rio São Francisco: Minas Gerais. Belo Horizonte: CPRM, 2018. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/20939>. Fecha de consulta: 24 de abril de 2022.

CAPÍTULO 3

Contaminación y tratamiento de aguas contaminadas por la explotación de oro en Chile

Romina Cayumil¹ (Romina.cayumil@unab.cl), Sofía Guajardo² y José Delgado Vega³

¹Universidad Andrés Bello, Facultad de Ingeniería & Centro de Investigación para la Sustentabilidad. Antonio Varas 880, Providencia, Santiago 7500000, Chile.

²Universidad Andrés Bello, Facultad de Ingeniería. Antonio Varas 880, Providencia, Santiago 7500000, Chile.

³Universidad de Antofagasta, Departamento Mina. Facultad de Ingeniería. Avenida Universidad de Antofagasta 02800. Campus Coloso. Antofagasta 1240000 Chile

Introducción

Chile tiene una amplia variedad de recursos; sin embargo, los recursos minerales son los más relevantes en términos económicos, debido a que la economía nacional está impulsada por el sector minero. El consumo de agua por sectores ha sido estudiado por COCHILCO, en donde se indica que el 4% del agua total consumida en el país, lo hace el sector minero (COCHILCO, 2021). La Figura 3.1 presenta el consumo de agua en el país, distribuido por sectores productivos.

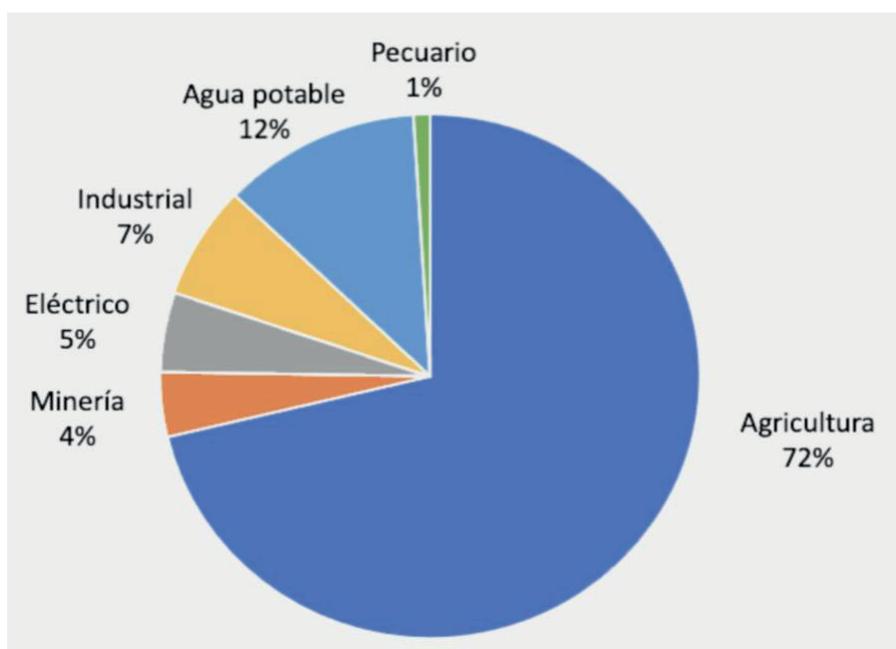


Figura 3.1. Consumo de agua por sectores productivos en Chile. Fuente: (COCHILCO, 2021).

La industria del cobre lidera la producción en Chile, con 5,6 millones de TM, mientras que 33,57 TM de oro fueron obtenidas en 2021 (Consejo Minero, 2022). Respecto de la producción de oro, este metal se obtiene tanto como subproducto del procesamiento del cobre, como desde la mediana y pequeña minería; además, se ha reportado su obtención con métodos informales de tratamiento (Donoso & Cantallopts, 2021).

La zona norte del país se caracteriza por contener depósitos minerales ricos en cobre, oro y otros metales. El proceso de recuperación de oro se realiza mayormente con cianuro y mercurio. En la Figura 3.2 se ilustra el promedio de cianuro y de mercurio presente a lo largo del país. Se observa que las ubicaciones en que se concentra mayormente son Arica, Iquique y La Serena. El mayor residuo obtenido mediante el procesamiento de minerales para la obtención de oro son los relaves; se estima que la contaminación de aguas puede ocurrir mayormente por los depósitos de relaves, en donde se puede encontrar cianuro y mercurio (Moreno et al., 2020). Los datos reportados por el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) presentan niveles de hasta 97,25 g/t de Hg en tranques de relaves activos en la región de Atacama. Por otro lado, el CN⁻ no se encuentra presente en los estudios (SERNAGEOMIN, 2020b).

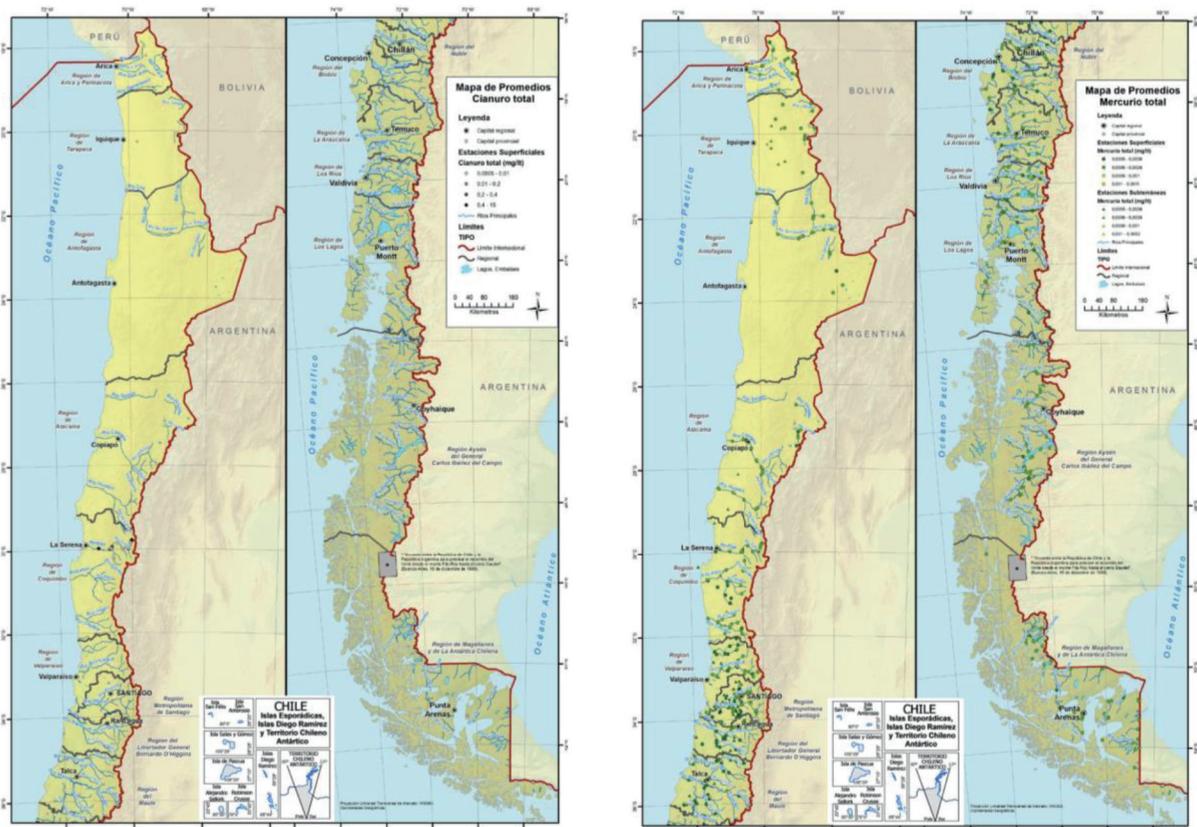


Figura 3.2. Mapa de promedios de Cianuro (izquierda) y Mercurio (derecha) en Chile. Fuente: Moreno 2020.

Un relave es un residuo sólido generado posterior al proceso de concentración mediante flotación, el cual está completamente molido y en un tamaño de partícula fino. Existen diversos tipos de relaves y se clasifican según el lugar en donde se depositen y sus características físicas. La problemática de los relaves está en que el contenido de especies de interés es bajo, por lo que es necesario procesar una gran cantidad de roca. El catastro más reciente calculó volúmenes de relave de $\sim 7900\text{Mm}^3$ y en tonelaje una masa total de $\sim 10600\text{Mt}$, lo cual se registró en un catastro a 740 depósitos existentes en Chile (SERNAGEOMIN, 2020a).

Las empresas que realizan la obtención de oro a mediana y pequeña escala, tienen ciertas limitantes para definir planificaciones sustentables en la gestión de relaves y aguas asociadas. Existen

factores que intensifican dicha falta, como políticas débiles referentes al tema, investigación y desarrollo, cambio climático, escasez hídrica, entre otros (Meller & Meller, 2021).

La Figura 3.3 presenta los riesgos asociados a los relaves. Tal como se observa en la imagen, se puede generar drenaje ácido al entrar en contacto con lluvia y, por lo tanto, los elementos presentes en los relaves pueden percolar y contaminar tanto el suelo como las napas subterráneas. Otros problemas están asociados a la estabilidad del muro del tranque de relave, el cual puede colapsar y la masa puede avanzar a zonas aledañas, lo que conllevaría a posible contaminación afectando tanto a la salud humana como al medio ambiente (Claussen et al., 2019).

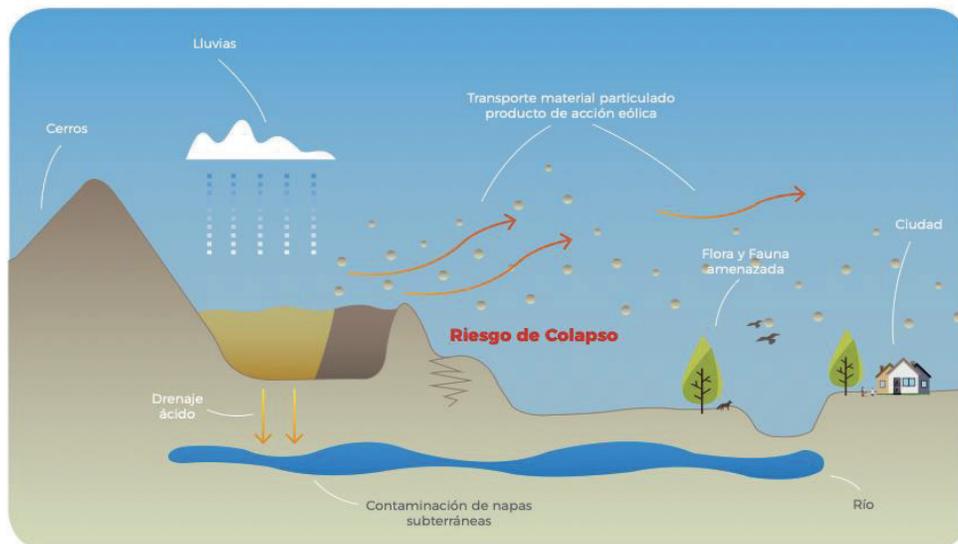


Figura 3.3. Riesgos asociados a depósitos de relaves mineros. Fuente: Claussen, 2019.

Marco regulatorio

Hasta el año 2021, Chile se regía bajo el Decreto 90, el cual presenta bajos estándares para los contaminantes permitidos a las industrias. Este decreto fue instaurado en el año 2000 y no había sufrido modificaciones, encontrándose desactualizado frente a los nuevos desafíos del siglo XX, globalización, tecnologías y población (Barra et al., 2021).

El año 2011 se creó la Ley 20.551 de cierre de faenas e instalaciones mineras (Ley Chile, 2011), en la cual se determina que la empresa debe presentar un proyecto de ingeniería enfocado en mitigar los efectos nocivos que provienen desde esta actividad industrial; específicamente, se debe garantizar la estabilidad física y química de las instalaciones según dicta la normativa ambiental. En consecuencia, la explotación formal tiene establecida una normativa para asegurar las zonas del desarrollo minero, establece garantías de un cierre efectivo y crea fondos para monitoreo de faenas cerradas (SERNAGEOMIN, n.d.). Por otro lado, la Ley 21.435 de Reformas del Código de Aguas explicita que la pequeña y mediana minería deben informar el uso de aguas concesionadas y que ello no pondrá en riesgo la sustentabilidad de los acuíferos, incluyendo permisos ambientales que respalden el caso (Ley Chile, 2022). La Tabla 3.1 y la Tabla 3.2 presentan otras leyes y decretos que complementan lo indicado. La Tabla 3.1 presenta normativas generales, mientras que la tabla 3.2 indica normativas específicas (Claussen et al., 2019).

Tabla 3.1. Normativa general asociada a la minería en Chile.

NORMA	NORMATIVA GENERAL	FECHA	DESCRIPCIÓN
DFL N° 1.122	Código de aguas.	1981	Actualizado en el 2021, Ley 21.435, la pequeña y mediana minería debe informar el uso de aguas concesionadas y que ello no pondrá en riesgo la sustentabilidad de los acuíferos (Ley Chile, 2022).
LEY N° 18.097	Ley Orgánica Constitucional sobre Concesiones Mineras.	1982	Define derecho y deberes de concesiones mineras. Y define que “Las sustancias minerales concesibles contenidas en desmontes, escorias o relaves, abandonadas por su dueño, son susceptibles de concesión minera junto con las demás sustancias minerales concesibles que pudieren existir en la extensión territorial respectiva” (Ley Chile, 1983).
LEY N° 18.248	Código de Minería.	1983	“El titular de concesión minera tiene, por el solo ministerio de la ley, el derecho de aprovechamiento de las aguas halladas en las labores de su concesión, en la medida en que tales aguas sean necesarias para los trabajos de exploración, de explotación y de beneficio que pueda realizar, según la especie de concesión de que se trate. Estos derechos son inseparables de la concesión minera y se extinguirán con ésta.”
DECRETO N° 1	Reglamento del Código de Minería.	1987	
LEY N° 19.300	Ley Sobre Bases Generales del Medio Ambiente.	1994	Los proyectos mineros se ven sometidos a realizar predicciones y evaluar los impactos ambientales, siempre y cuando la extracción sea sobre 5000 ton mensuales. Esta obligatoriedad aplica para embalses con muros de altura superiores a 5 metros o una capacidad sobre 50 m ³ .
D.S. N° 40	Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental.	2012	
DECRETO N° 132	Reglamento de Seguridad Minera.	2004	Tiene como finalidad proteger la salud e integridad física del personal en la industria minera.
LEY N° 20.551	Ley que Regula el Cierre e Instalaciones Mineras.	2011	Debe únicamente resguardar la estabilidad física y química de las instalaciones remanente.
D.S. N° 41	Reglamento de la Ley de Cierre de Faenas e Instalaciones Mineras.	2012	<ol style="list-style-type: none"> 1. “La necesidad de proteger la vida, la salud y seguridad de las personas y la protección del medio ambiente. 2. La importancia de mitigar los efectos que se derivan del desarrollo de la Industria Extractiva Minera, en los lugares en que ésta se realiza, procurando asegurar la Estabilidad Física y Química de los mismos, en conformidad a la normativa ambiental vigente. 3. La relevancia de identificar y cuantificar económicamente las medidas de acción que deban ser desarrolladas durante la vida útil de la misma, a fin de mitigar los efectos antes señalados. 4. La necesidad de precisar las exigencias técnicas necesarias que deben observarse para el cierre de faenas e instalaciones mineras.” (Ley Chile, 2012)

Si bien existen normativas para concesiones, instalación y cierre de faenas mineras, para la construcción de depósitos de relaves, para la regulación de contaminantes, emisión de residuos líquidos, entre otros, la minería del oro está considerada dentro de la pequeña y mediana minería, donde la ley y el reglamento de cierre de faenas e instalaciones mineras tienen un procedimiento simplificado, en el cual no tienen que garantizar ni entregar un fondo post cierre, basándose en su bajo acceso a créditos a largo plazo, poco equipamiento y baja cantidad de residuos, los cuales no serían significativamente riesgosos a la población. También es importante considerar que la Ley 20.551 entró en vigencia en el año 2012 (Meller & Meller, 2021), cuando muchas empresas del sector ya se encontraban en funcionamiento sin un plan de cierre (como se solicita en la ley actual) y se estipuló un plazo de 2 años para actualizar los proyectos ante el SERNAGEOMIN. En ese

proceso podían acogerse a un régimen transitorio, lo que significa que no estaban en pleno cumplimiento de la ley. Existe el caso de faenas que con cese de producción antes de la obligatoriedad de realizar un plan de cierre y todo lo que ello conlleva, reportándose relaves inactivos o abandonados, en donde el SERNAGEOMIN no cuenta con respaldo legal para poder realizar demandas por daños efectivos ambientalmente (Morales, 2020).

Tabla 3.2. Normativa específica asociada a la minería y aguas en Chile.

NORMA	NORMATIVA ESPECÍFICA	FECHA	DESCRIPCIÓN
DECRETO N° 248	Reglamento para la Aprobación de Proyectos de Diseño, Construcción, Operación y Cierre de los Depósitos de Relaves.	2007	No están afectos proyectos mineros con una proyección menos a 5.000 ton (5000 ton) mensuales y teniendo embalses con muros inferiores a 5 metros o menos de 50 m ³ .
DECRETO N° 50	Reglamento a que se refiere el artículo 295 inciso 2o, del Código de Aguas (Obras Mayores).	2015	Determina las bases técnicas a cumplirse para el SEIA (Sistema Evaluación Impacto Ambiental).
D.S. N° 609	Norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos industriales líquidos a sistemas de alcantarillado.	1998	Define límites máximos permitidos para descargas de efluentes que se efectuar a redes de alcantarillado que cuenten o no con planta de tratamiento de aguas servidas, el mercurio en ambos casos está restringido hasta 0,02 mg/L y el cianuro tiene límites que fluctúan entre 0,5 a 1 mg/L (Norma de Emisión Para La Regulación de Contaminantes Asociados a Las Descargas de Residuos Industriales Líquidos a Sistemas de Alcantarillado, 1998)
D.S. N° 90	Norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales	2000	Define Cuerpos de agua receptor o cuerpo receptor como curso o volumen de agua natural o artificial, marino o continental superficial, que recibe la descarga de residuos líquidos. No se comprenden en esta definición los cuerpos de agua artificiales que contengan, almacenen o traten relaves y/o aguas lluvias o desechos líquidos provenientes de un proceso industrial o minero (Norma de Emisión Para La Regulación de Contaminantes Asociados a Las Descargas de Residuos Líquidos a Aguas Marinas y Continentales Superficiales, 2001).
D.S. N° 46	Establece norma de emisión de residuos líquidos a aguas subterráneas	2002	Establece valores máximos permitido a fuentes emisoras para descargas de residuos líquidos a aguas subterráneas, teniendo en consideración al cianuro con una concentración de 0,2 mg/L y al mercurio con 0,001 mg/L (Norma de Emisión de Residuos Líquidos a Aguas Subterráneas, 2003).

Tratamiento

Una de las rutas de extracción del oro es la concentración gravimétrica, molienda y amalgamación. Esta última es una práctica muy frecuente en faenas informales. A temperatura ambiente, el oro al ponerse en contacto con el mercurio forma una amalgama, la que se descompone a altas temperaturas emitiendo mercurio gaseoso y oro poroso sólido. Si el mineral de oro está presente en partículas finas, es recuperado mediante cianuración, donde reacciona y el oro se disuelve.

Por otra parte, el proceso de flotación se utiliza cuando existen impurezas que se deben eliminar. Esta etapa se realiza mediante separación gravitacional. El oro puede flotar con la ayuda de xantatos y aceite de pino a pH 8-9, para posteriormente ser amalgamado o cianurado. Según la Figura 3.4, se obtienen colas de relaves desde la flotación (cianuración), las que tienen concentraciones de cianuro que pueden causar impactos ambientales importantes si no es neutralizado correctamente. De todas formas, el material expuesto a la atmósfera se convierte en

cianato no tóxico y luego en carbonato con desprendimiento de nitrógeno por efecto del oxígeno y la radiación del sol (Courdurier & Wilkomirsky, 1971).

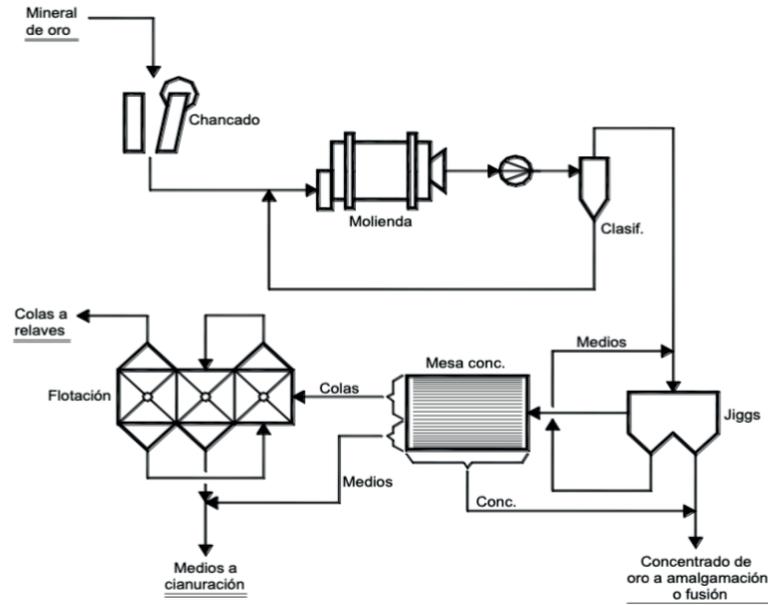


Figura 3.4. Diagrama de procesos para concentración gravitacional – flotación de minerales de oro. Fuente: Courdurier & Wilkomirsky, 1971.

Las instalaciones y faenas mineras cuentan con estabilidad química (EQ) cuando en su interacción con los factores ambientales no generan impactos importantes para la salud de las comunidades y trabajadores, como también para el medio ambiente, define el SERNAGEOMIN (SERNAGEOMIN & Fundación Chile, 2015). Otro elemento a considerar es el drenaje minero (DM), el cual es un efluente generado por las interacciones entre las fuentes potenciales, definidas como las instalaciones constituidas por materiales que tras un proceso físico y/o químico quedan expuestos a los factores ambientales. SERNAGEOMIN menciona las fuentes presentadas en la Tabla 3.3. Algunos ejemplos en Chile están representados por tranques de relaves (Figura 3.5), relave en pasta (Figura 3.6) y pilas de cianuración (Figura 3.7 y Figura 3.8).

Tabla 3.3. Fuentes potencialmente generadoras de drenaje minero durante la operación y al cierre de una faena minera. Fuente: SERNAGEOMIN & Fundación Chile, 2015.

Botaderos	Depósitos de Relaves (ds 248/06)	Depósitos de Lixiviación
Estériles	Embalses de relaves	Ripios de lixiviación
Baja ley	Tranques de relaves	Pilas permanentes
Marinas y desmontes	Relaves filtrados	Pilas dinámicas
Escorias	Relaves en pasta	Pilas ROM
	Relaves espesados	



Figura 3.5. Tranque de relaves. Fuente: Terram, 2018.



Figura 3.6. Relave en Pasta. Fuente: Valenzuela, 2016.



Figura 3.7. Cianuración en pila en las instalaciones de la mina El Soldado (V Región). Fuente: Oyarzún, n.d.

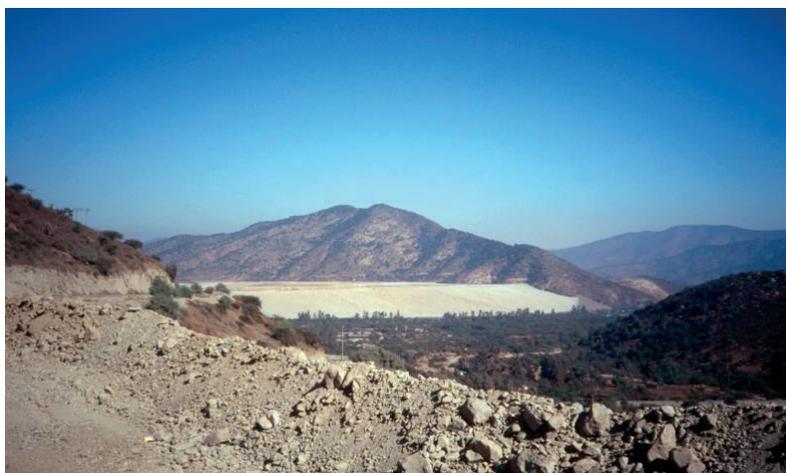


Figura 3.8. Pila de cianuración abandonada en las instalaciones de Punitaqui (IV Región). Fuente: Oyarzún, n.d.

Existen agentes ambientales que facilitan el DM: condiciones fisicoquímicas, mecanismos de atenuación, factores físicos, mecanismos de transporte de oxígeno, factores biológicos y condiciones de descarga del efluente, tal como lo presenta la Figura 3.9.

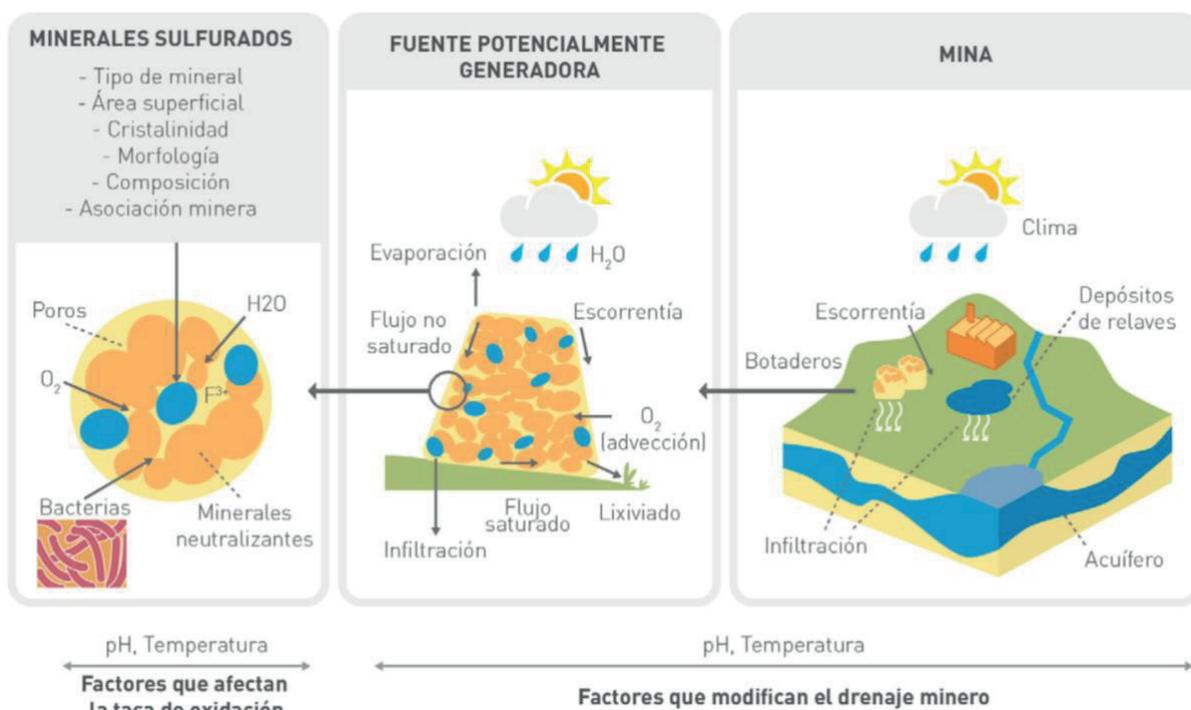


Figura 3.9. Agentes ambientales que facilitan el drenaje mineral. Fuente: SERNAGEOMIN Fundación Chile, 2015.

El servicio nacional de geología y minería cuenta con un catastro de pasivos ambientales de la industria minera y en ello se define su estado actual: activo, inactivo, abandonado y en construcción. En su actualización del 2019, se definió que el 63% de los relaves se encontraban inactivos y un 23% abandonados, quedando un 14% activo (Claussen et al., 2019). La extracción del oro es parte de la pequeña y mediana minería, teniendo únicamente el 0,7% del volumen total

de los relaves. De todas maneras, los minerales insertos en ellos pueden generar un alto impacto en aguas de contacto, percolaciones a napas subterráneas y/o inestabilidad física; todos ellos están comprometidos entre sí y son bien denominados riesgosos. Estos riesgos aumentan frente a la extracción informal del oro, donde el personal, limitado de conocimiento y/o tecnología, no cumple con los estándares mínimos de seguridad ambiental y expone a la zona y sus aguas a un severo impacto. Lamentablemente, no existen fuentes donde se mencione datos de operaciones irregulares, pero hablamos desde el punto de vista formal que establece datos concretos para el tratamiento de tranques de relave.

Los relaves y sus aguas son ricas en sulfatos y metales pesados. Su composición puede variar según la zona, pero su tratamiento se basa en los mismos pretratamientos: ultrafiltración, osmosis inversa, evaporadores y cristalizadores. Se puede aplicar desde tecnologías desalinizadoras de membranas hasta tecnologías térmicas de privados que ofrecen estos servicios (Cabello, 2021).

Algunas soluciones respecto de los tipos de relaves tienen relación con su construcción y su porcentaje de sólidos y agua, evitando la percolación de metales y movilización de masa. Por ejemplo, el tranque de relaves está constituido por dos estructuras principales: muro y lama. El muro, que sirve de soporte a la estructura, corresponde a la sección más gruesa del material en proporción. La parte conformada por la sección fina, ubicada en la cubeta del tranque, se denomina Lama. Esto es posible gracias a que el material desechado de flotación es preparado previamente en un hidrociclón, que separa efectivamente las partículas gruesas de las finas utilizando el flujo de agua por medio de impulsión. Por otro lado, el embalse de relave es construido sobre un muro de contención, el cual cuenta con una impermeabilización en la zona del talud interno y en el coronamiento en la zona superior (Urbano & Falcón, 2016).

El relave espesado impide el flujo de material particulado a zonas externas del entorno en donde es depositado. El porcentaje de sólidos de este tipo de relaves tiene valores entre 65-75%; el porcentaje de agua restante se elimina por evaporación, lo cual le da estabilidad sísmica (Urbano & Falcón, 2016). El relave filtrado tiene un proceso de selección adicional en comparación al relave espesado, teniendo un porcentaje de agua bajo el 20%. Finalmente, el relave en pasta tiene un menor porcentaje de humedad, utiliza menor volumen y debe ser transportados por medio de bombas, dada su alta viscosidad.

Conclusiones y recomendaciones

En Chile, la contaminación de agua asociada a la explotación de oro se relaciona directamente con la generación de relaves desde el proceso de concentración por flotación. En el país existen 740 relaves contabilizados a la fecha, los cuales son tanto activos, como inactivos y abandonados. Si bien solamente el 0,7% del volumen total de relaves del país provienen de la minería del oro, la presencia de cianuro y mercurio constituyen una amenaza medioambiental. Los depósitos de relaves tienen riesgos como la generación de drenaje ácido, en el cual pueden percolar elementos tóxicos a las napas subterráneas, lo que constituye una problemática en aquellos depósitos que no han sido construidos bajo los estándares requeridos. La prevención de estos desastres es a través de procesos de mejora tanto de normativas, del manejo y tratamiento de relaves, como de la construcción de sus depósitos. En la actualidad, Chile cuenta con diversos mecanismos para asegurar la estabilidad de los depósitos de relaves. Una variedad de programas se ha implementado

en los últimos años para encontrar formas de tratar estos residuos mineros, dado el gran volumen que se ha acumulado a través de los años. Si bien hay grandes avances en esta materia, aún se requieren esfuerzos para asegurar la minimización de contaminación relacionada a este residuo.

Referencias

Barra, R., Nieto, P., Valdovinos, C., & Vidal, G. (2021). *El problema no solo es la escasez de agua, sino su contaminación*.

Cabello, M. (2021). *La importancia del tratamiento de aguas industriales en la minería*.
Claussen, P., Zúniga, E., Díaz, B., & Fernández, B. (2019). *Plan Nacional de Depósitos de Relaves para una Minería Sostenible*.

Cochilco. (2021). *Extracciones de agua de empresas asociadas al Consejo Minero*.
Consejo Minero. (2022). *Cifras actualizadas de la minería*.

Courdurier, L., & Wilkomirsky, I. (1971). *Fundamentos de los Procesos Metalúrgicos* (Universidad de Concepción, Ed.; 1era ed.). Universidad de Concepción.

Donoso, F., & Cantallopts, J. (2021). *Informe del mercado del oro*.

Ley Chile. (1983, September 26). *Ley 18248: Código de Minería*.

Ley Chile. (2011, October 28). *Ley 20551: Regula el Cierre de Faenas e Instalaciones Mineras*.
<https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1032158>

Ley Chile. (2012, September 4). *Decreto 41: Reglamento de la Ley de Cierre de Faenas e Instalaciones Mineras*.

Ley Chile. (2022, April 6). *Ley 21345: Reforma el Código de Agua*.

Meller, P., & Meller, A. (2021). *La Empresa Nacional de Minería de Chile: Modelos y buenas prácticas para promover la sostenibilidad de la minería pequeña y artesanal en la región andina*.

Norma de Emisión para la Regulación de Contaminantes Asociados a las Descargas de Residuos Industriales Líquidos a Sistemas de Alcantarillado, Pub. L. No. D.S. N°609 (1998).

Norma de Emisión para la Regulación de Contaminantes Asociados a las Descargas de Residuos Líquidos a Aguas Marinas y Continentales Superficiales, Pub. L. No. D.S. N° 90 (2001).

Norma de Emisión de Residuos Líquidos a Aguas Subterráneas, Pub. L. No. D.S. N° 46 (2003).

Morales, A. L. (2020). *Historia, aplicación y análisis de la Ley núm. 20.551 que Regula el Cierre de Faenas e Instalaciones Mineras en Chile*.

Moreno, A., Leturia, C., Cristi, O., & Musalem, M. (2020). *Atlas Calidad del agua Chile 2020*.

Oyarzún, J. (n.d.). *Minería y Contaminación del Agua: ¿Cuándo es Necesario Preocuparse?* Retrieved June 8, 2022, from https://www.aulados.net/Temas_ambientales/Aguas_contaminacion_Chile/Contaminacion_aguas_Chile.htm

SERNAGEOMIN. (n.d.). *Cierre Faenas Mineras*. Retrieved June 8, 2022, from <https://www.sernageomin.cl/cierre-faenas-mineras/>

SERNAGEOMIN. (2020a). *Catastro de Depósitos de Relaves en Chile*. <https://www.sernageomin.cl/datos-publicos-deposito-de-relaves/>

SERNAGEOMIN. (2020b). *Datos de Geoquímica de Depósitos de Relaves de Chile*. <https://www.sernageomin.cl/datos-publicos-deposito-de-relaves/>

SERNAGEOMIN, & Fundación Chile. (2015). *Guía Metodológica para la Estabilidad Química de Faenas e Instalaciones Mineras*.

Terram. (2018). *Comunidad se opone a Angloamerican y su Tranque de Relaves El Torito*. <https://www.terram.cl/2018/01/comunidad-se-opone-a-angloamerican-y-su-tranque-de-relaves-el-torito/>

Urbano, S., & Falcón, M. F. (2016). *Guía para el cumplimiento de DS248 Depósitos de relaves bajo producción de 5000 tpm*.

Valenzuela, L. (2016). *Operaciones Cabildo*.

CAPÍTULO 4

Contaminación y tratamiento de aguas afectadas por la explotación de oro en Colombia

Farith Díaz¹ (farithdiaz@yahoo.com)

¹Universidad Escuela de Ingeniería de Antioquia (Colombia)

Introducción

Con una superficie continental de más de 1,1 millones de km², Colombia es un país abundante en recursos hídricos. Cerca del 2% del territorio nacional está conformado por ríos, lagos, lagunas, humedales y otros cuerpos de agua, distribuidos en las vertientes hidrográficas del Caribe, Orinoco, Amazonas, Pacífico y Catatumbo. Desafortunadamente, buena parte de estas fuentes hídricas presentan graves problemas de contaminación, debido (entre otras cosas) a la inadecuada disposición de las aguas residuales domésticas e industriales y del vertimiento de residuos agrícolas y de sustancias químicas utilizadas en la industria minera. En el caso particular de la minería del oro en Colombia, el uso de insumos químicos como peróxido de hidrógeno, hidróxido de sodio, ácido nítrico, mercurio y cianuro contribuyen significativamente a los graves problemas de contaminación ambiental que afectan algunas fuentes hídricas del país.

En Colombia, los yacimientos de oro están localizados geográficamente en la región amazónica, en las cordilleras Oriental, Central y Occidental, en los valles del Magdalena y del Cauca, y en la costa Pacífica (Figura 4.1, izquierda). Estos yacimientos son típicamente del tipo filón o veta (por lo que su explotación es subterránea) y del tipo aluvión (donde la explotación se hace a cielo abierto) (UNODC 2021). Cifras oficiales indican que cerca del 83% de la explotación de oro en Colombia proviene de la minería de aluvión, mientras que el 17% restante de la minería de filón (DNP 2016; Prieto et al. 2019).

Entre 2010 y 2020, Colombia produjo 580 TM de oro, el cual fue extraído de los departamentos de Antioquia (45,2%), Chocó (27,6%), Bolívar (7,3%), Nariño (6,0%), Cauca (4,9%) y Caldas (3,8%) (UPME 2022) (Figura 4.1, derecha). Desafortunadamente, la mayor parte del oro producido en el país proviene de la minería informal e ilegal. En efecto, en el año 2016 se reportó que aproximadamente el 86% del oro producido en Colombia tenía como origen la minería ilegal (DNP 2016), cifra que se redujo en los últimos años, llegando a ser el 69% en el 2019 (Symmes Cobb 2021).

La minería informal e ilegal del oro está asociada con el uso no controlado de productos químicos, como es el caso del mercurio, cuyos efectos sobre el ambiente, la vida acuática y los seres humanos han sido ampliamente documentados y son visibles en buena parte del país. A nivel mundial, Colombia ha sido considerada como el mayor contaminador de mercurio per cápita (Cordy et al. 2011a), y después de China e Indonesia, sería el tercer país con más emisiones de mercurio al ambiente, como consecuencia de su uso en la minería del oro (Cordy et al. 2011b). Se ha reportado un promedio de 180 toneladas de mercurio son utilizadas cada año en la minería artesanal y de pequeña escala (UN Environment 2017) y según cifras del Departamento Nacional de Planeación,

75 TM de mercurio son liberadas al ambiente cada año en el país (DNP 2016). Un estudio gubernamental del 2014 determinó que en Colombia se utilizan cerca de 193 TM/año de mercurio en actividades mineras; 105 en la minería ilegal y 88 en la minería legal (Universidad de Córdoba and MinEnergía 2014), siendo los departamentos de Bolívar, Chocó y Antioquia los que más utilizan mercurio para el beneficio del oro, con 304, 195 y 170 TM/año, respectivamente (IDEAM 2015).

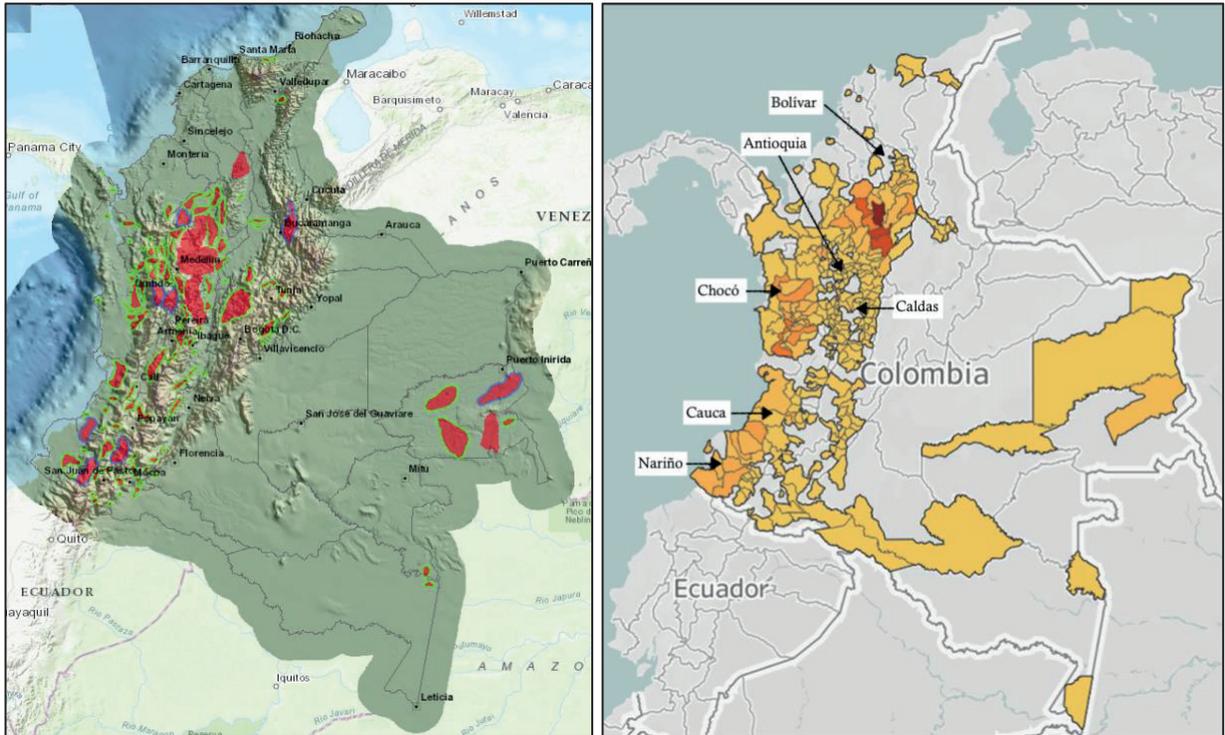


Figura 4.1. Izquierda: Zonas potenciales integrales de recursos mineros - Minerales del oro (principalmente). Derecha: Producción de oro en Colombia por regiones. Fuente: Servicio Geológico Colombiano. Subdirección de Minería-UPME. Agencia Nacional de Minería-ANM.

La información reportada por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP) sobre la cantidad promedio de mercurio utilizado en la minería artesanal y de pequeña escala (UN Environment 2017) y por la organización Thomson Reuter sobre la cantidad de oro producido por país (Thomson Reuters 2018), permite estimar la proporción mercurio utilizado/oro producido en los principales países productores del preciado metal. Según esta información, en Colombia esta proporción sería 4,2/1,0, muy superior a la de países como Indonesia (3,1/1,0), Perú (0,92/1,0), Brasil (0,46/1,0) y China (0,25/1) (Diaz et al. 2020) y otros países con mayor producción de oro que Colombia, pero que a su vez utilizan y vierten al ambiente mercurio en menor cantidad.

La Figura 4.2 (izquierda), incluida en el Estudio Nacional del Agua 2018, presenta cantidades estimadas de vertimiento de mercurio en Colombia en el año 2016, año en que se arrojaron al ambiente 183 TM de mercurio; 156 toneladas durante el beneficio de oro y 27 toneladas durante el beneficio de plata (IDEAM 2019). Para estimar estos vertimientos se tuvo en cuenta la producción de oro en más de 150 municipios ubicados en 17 de los 32 departamentos del país (IDEAM 2019), donde se extrae el oro tanto de manera legal como ilegal. En el Estudio Nacional

del Agua 2014, se reportó que en el año 2012 se arrojaron al ambiente 205 TM de mercurio, de las cuales un 72,5% fue utilizado para el beneficio del oro y un 27,5% para el beneficio de plata (IDEAM 2015). Dicha información fue estimada teniendo en cuenta la producción de oro en 179 municipios ubicados en 15 departamentos del país (IDEAM 2015).

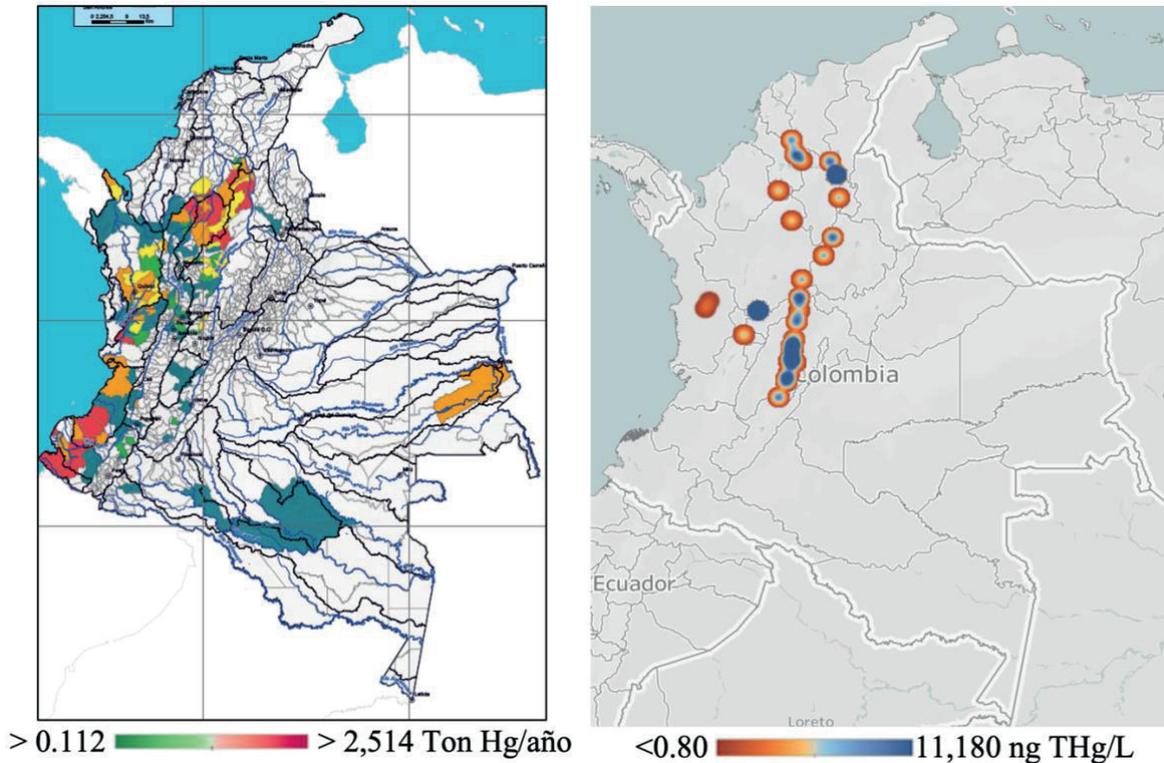


Figura 4.2. Izquierda: Estimación vertimiento de mercurio al suelo y al agua por beneficio de oro y plata en 2016. Derecha: Niveles de mercurio encontrados en fuentes hídricas de Colombia. Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM, Estudio Nacional del Agua 2018. Mapa realizado con datos medidos por el autor y proporcionados por el Grupo Laboratorio de Calidad Ambiental (IDEAM).

Las consecuencias del uso no controlado de mercurio y su liberación al ambiente es de tal magnitud que se llegó a estimar que, de los cerca de 1150 ríos que existen en Colombia, más de 200 atraviesan ecosistemas contaminados con mercurio (Unidad Investigativa 2017). El Mapa de la derecha en la Figura 4.2 muestra las concentraciones de mercurio encontradas en algunos ríos del país, principalmente en los departamentos de Antioquia, Chocó, Bolívar, Tolima y Caldas. De este modo, se ha detectado la presencia de mercurio en ríos como Quito (Figura 4.3), Acandí, Cabí, Atrato y San Juan (Departamento del Chocó), Marmato (Caldas), Nechí (Antioquia), Regidor y Cimitarra (Bolívar), Guachal, Dagua y Arroyohondo (Valle del Cauca), Mira, Barbacoas, Iscuandé, Guátara y Telembí (Nariño), Vichada (Meta), Caquetá (Caquetá), Yarí (Amazonas), Magdalena y el Cauca (Torres Gutierrez et al. 2012; IDEAM 2015; Gafner 2018; IDEAM 2019; Diaz et al. 2020).

Se han detectado niveles alarmantes de mercurio en hídricas de la Amazonía colombiana (provenientes de la minería del oro), particularmente en el Departamento del Vaupés, en los caños Telecom (66,7 $\mu\text{g/L}$) y Amarillal (33,4 $\mu\text{g/L}$) (IDEAM 2019). De igual manera, se ha documentado

bajas concentraciones de mercurio en ríos y otros cuerpos de agua del Departamento del Amazonas (río Putumayo, río Cotuhé, caño Pupuña - afluente del Cotuhé, y lago Tipisca).



Figura 4.3. Panorámica de la degradación ambiental ocasionada por la minería ilegal en río Quito (Municipio de Río Quito, departamento del Chocó, Colombia). Fuente: Propia.

Con respecto a mercurio en sedimentos, se han encontrado muestras de este metal en el río Inírida (0,8 mg/kg), Vaupés; en la desembocadura del río Totare (0,69 mg/kg), Tolima; en el río Cauca (0,61 mg/kg), a su paso por el Municipio de San Jacinto del Cauca (Bolívar); y en el caño Amarillal (5,28 mg/Kg) y caño Rojo (0,37 mg/kg), Vaupés, entre otros (IDEAM, 2019).

La contaminación con mercurio está presente en diferentes ecosistemas acuáticos del país y su impacto ha sido ampliamente documentado, tal como se reporta en los estudios realizados en peces (Nuñez-Avellaneda et al. 2014; Paola et al. 2019), en la fauna silvestre (Sierra-Marquez et al. 2018; Meza Martínez et al. 2020; Canham et al. 2021; Calao-Ramos et al. 2021), en habitantes de zonas impactadas por la minería del oro (Palacios-Torres et al. 2018; Gutiérrez-Mosquera et al. 2018; Díaz et al. 2018; Alcalá-Orozco et al. 2019), en la agricultura (Enamorado-Montes et al. 2021) y en el agua (IDEAM, 2015, 2019; Díaz et al., 2020).

Marco regulatorio

Con el fin de controlar el uso del mercurio en el país y minimizar su impacto en el ambiente, la legislación colombiana incluye normas con diferentes propósitos, las cuales buscan proteger las fuentes hídricas, la salud humana, la vida acuática, la flora y la fauna, además de controlar la comercialización y uso de mercurio en las actividades mineras e industriales, a nivel nacional. Una de estas normas es la Resolución 0631/2015, expedida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, en la cual se establecen los parámetros y valores límites máximos permisibles para los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público.

Esta misma resolución reglamenta el artículo 28 del Decreto 3930/2010 (el cual establece las disposiciones relacionadas con los usos, ordenamiento y vertimientos al recurso hídrico, al suelo y a los alcantarillados), y actualiza parte del Decreto 1594/1984, que trata de los usos del agua y el vertimiento de residuos líquidos.

La Resolución 0631/2015 establece un límite máximo permisible de 1,0 mg/L para cianuro total (CN⁻) y 0,002 mg/L (2,0 µg/L) para mercurio, cuando se realizan vertimientos a cuerpos de agua en actividades de extracción de oro u otros metales preciosos. No obstante, la naturaleza misma de la práctica minera en Colombia dificulta el monitoreo y control de vertimientos, debido en parte a la baja capacidad del Estado para atender la problemática social y ambiental derivada de la minería artesanal y de pequeña escala, y a los altos niveles de informalidad y nexos con la ilegalidad de quienes se benefician de la explotación minera. Adicionalmente, un monitoreo continuo a los niveles mercurio y cianuro en los vertimientos mineros es complicado, dada la ubicación de los sitios donde se desarrolla la minería ilegal, los cuales están generalmente ubicados en lugares remotos y de difícil acceso. La presencia y peligrosidad de grupos armados al margen de la Ley dificulta aún más el control de los vertimientos por parte de la autoridad ambiental, ya sea vía aérea, acuática o terrestre.

A la par de las regulaciones sobre vertimiento de contaminantes a cuerpos de agua, el país cuenta con una nueva normatividad para regular el uso de mercurio en actividades industriales, así como su control, transporte y comercialización dentro del territorio. Una de estas regulaciones es la Ley 1658/2013 (conocida como Ley de Mercurio), la cual busca la eliminación de este contaminante en la minería de oro artesanal y de pequeña escala y en las actividades industriales donde se utiliza. Para ello, se definieron metas para la eliminación gradual del mercurio en el país y se estableció que, a julio de 2018, en el sector minero, y a julio de 2023, en todos los procesos industriales y productivos, el mercurio estaría erradicado del territorio nacional, algo que no se ha cumplido, por ahora para la minería del oro.

Otra normatividad clave es la Ley 1892/2018, con la cual el Congreso colombiano aprobó el Convenio de Minamata sobre el Mercurio. Este convenio, ratificado el 26 de agosto de 2019, no prohíbe el uso del mercurio en la minería artesanal, pero sí apunta a limitar su uso y emisiones a nivel mundial.

Lo paradójico del caso colombiano, en cuanto a protección ambiental se refiere, es que el país todavía depende de regulaciones obsoletas que, en la actualidad, no protegen como se quisiera la salud humana, las fuentes hídricas, la flora, la fauna y la vida acuática. Aunque el Decreto 3930/2010 reglamenta los vertimientos al recurso hídrico, este no reglamenta los criterios de calidad para la destinación o posibles usos de las fuentes hídricas del país, tal como lo hacía el Decreto 1594/1984, actualmente derogado, pero del cuál continúan vigentes algunos de sus artículos. En efecto, el artículo 76 del decreto 3930/2010 fija un régimen de transición para los usos de agua y los criterios de calidad de cada uso. Dicho artículo deja vigente, entre otros, los artículos 37 a 48 del Decreto 1594/1984, hasta que el Ministerio de Ambiente emita, mediante resolución, las regulaciones correspondientes.

Lo anterior significa, además, que la normatividad colombiana sobre mercurio es laxa, si se compara con la de otros países. Mientras en Colombia el nivel admisible de mercurio para proteger la flora y fauna en cuerpos de agua es de 10 µg/L (CL_{50}^{96}) (Art. 45 del Decreto 1594/1984), en los

Estados Unidos es de 1,4 µg/L, en la Unión Europea es 0,7 µg/L, en Brasil es 0,2 µg/L y en Canadá es 0,026 µg/L. Con respecto a los límites máximos permisibles de mercurio en fuentes hídricas destinadas a uso potable, este valor en Colombia es de 2,0 µg/L (Art. 38 y 39 del Decreto 1594/1984), mientras que en Brasil es de 0,2 µg/L y en la Unión Europea es entre 0,5 y 1,0 µg/L. En el caso de la Unión Europea, países que no tienen mayores problemas por la presencia de mercurio de origen antrópico y proveniente de la minería del oro, en sus ecosistemas acuáticos tienen regulaciones muchos más estrictas que la colombiana.

En Colombia, los más afectados por la degradación ambiental y la contaminación con mercurio debido a la explotación del oro son las comunidades indígenas y afrodescendientes, a quienes, según la Defensoría del Pueblo, se les están vulnerando sus derechos humanos dado los graves impactos sociales, ambientales y de salud pública que se presentan en sus territorios (Defensoría del Pueblo de Colombia 2015). Un caso crítico es el de las comunidades étnicas que habitan la cuenca del río Atrato, localizado en el departamento del Chocó (segundo productor de oro del país y de población mayoritariamente afrodescendiente), donde la vulneración de los derechos fundamentales es de tal magnitud que, en una actuación sin precedentes, la Corte Constitucional, en una de sus providencias, reconoció al río Atrato como sujeto de derechos. Esta medida se tomó con el fin de proteger “los derechos fundamentales a la vida, la salud, al agua, a la seguridad alimentaria, al medio ambiente sano, a la cultura y al territorio de las comunidades étnicas accionantes” (Corte Constitucional 2016). De esta manera, se obliga al Estado a buscar acciones que eviten o minimicen los daños ambientales ocasionados por las actividades mineras y la deforestación, garantizando la conservación y protección del río Atrato.

Dado lo anterior, es importante que el país enfoque sus esfuerzos en la eliminación, minimización y control del uso del mercurio en minería aurífera, en el tratamiento de los residuos y vertimientos generados por esta actividad, en la protección de las fuentes hídricas, en la restauración de zonas degradadas por la minería y en el cumplimiento y actualización de la normatividad ambiental, para aspirar a cumplir con lo establecido en el Convenio de Minamata sobre Mercurio.

La problemática del uso de mercurio es tan compleja que incluso el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) reconoce que erradicar el mercurio de la minería artesanal es algo con pocas probabilidades de éxito. Adicionalmente, la Ley 1658/2013 (Ley de Mercurio en Colombia) no solo presenta vacíos y contradicciones en su redacción, sino que además no contempla medidas para la gestión de sitios o ecosistemas contaminados con mercurio, lo cual está contemplado en el Convenio de Minamata (Gafner 2018).

Con respecto a las concentraciones de mercurio en el agua potable, en el 2006 la Organización Mundial de la Salud (OMS) cambió el valor de referencia, pasando de 1,0 µg/L de mercurio total (orgánico + inorgánico) a 6,0 µg/L de mercurio inorgánico, debido en parte a que se espera que las concentraciones de mercurio orgánico en el agua sean extremadamente bajas y a que se estima que la contaminación por mercurio inorgánico, como resultado del consumo de agua, es poco probable (Frisbie et al. 2015). Sin embargo, cada vez más aparecen nuevas evidencias sobre el potencial impacto de la ingesta de bajos niveles mercurio en la salud humana, así como nuevas técnicas para cuantificar trazas de Hg en agua, lo que indicaría la necesidad de que la OMS revise las decisiones tomadas hace 14 años, tal como lo recomiendan investigadores de las universidades de Norwich y Toronto (Frisbie et al. 2015). En el caso de la contaminación con mercurio, investigadores de estas universidades argumentan que si la OMS hubiera mantenido el

procedimiento habitual, el valor de referencia para mercurio establecido en el 2006 habría sido inferior a 1,0 µg/L de mercurio total, esto con el fin de proteger la salud del feto (Frisbie et al. 2015). Los investigadores de esta misma universidad también encontraron que el grupo asesor de la OMS recomendó en 2011 bajar el valor previamente utilizado de la ingesta semanal tolerable de alimentos con mercurio para el organismo. De no haber sucedido esto, la nueva referencia hubiese sido 2,0 µg/L de mercurio inorgánico en lugar de 6,0 (Frisbie et al. 2015). Cabe recordar que la ingesta periódica de alimentos con mercurio, incluso con bajos niveles de este contaminante, también contribuye a la carga contaminante que afecta la salud humana y pone en riesgo a poblaciones vulnerables, particularmente a niños, ancianos, mujeres embarazadas y madres lactantes (Bank 2012).

Tratamientos de los residuos generados en la explotación formal e informal de oro

Una de las etapas en la cual se genera un mayor vertimiento de residuos tóxicos durante las actividades de extracción del oro es en la etapa de beneficio, la cual consiste en diferentes procesos para separar el oro de su material circundante, por lo que se generan drenajes ácidos, alta concentración de sólidos suspendidos y vertimiento de cianuro y de metales pesados, principalmente el mercurio. Estos beneficiaderos son generalmente construidos cerca de ríos y cuerpos de agua, por lo que se vierten aguas contaminadas con residuos peligrosos, en muchos casos sin tratamiento alguno. Otra práctica común es la acumulación de estos residuos tóxicos en depósitos o pozas, los cuales terminan contaminando tanto las aguas subterráneas como las superficiales.

En Colombia, los tratamientos típicos para este tipo de vertimientos consisten en tanques de sedimentación para la remoción de sólidos, seguido por un proceso de neutralización de pH utilizando cal, ácido sulfúrico, ácido clorhídrico o CO₂, según se requiera. En algunos casos, es recomendable el uso de coagulantes para la remoción de partículas discretas, principalmente, y el uso de filtros percoladores para el manejo de sólidos suspendidos en grandes cantidades (UPME 2015).

La remoción de metales pesados usualmente se realiza por medio de la precipitación química, en la cual se forman hidróxidos de metal, los cuales precipitan a pH determinados; este es un proceso recomendado para la minería de mediana y de gran escala (UPME 2015). También se utilizan humedales construidos, en donde la reducción de los metales pesados se logra gracias a su adsorción por plantas macrófitas. Para el caso de los relaves se utilizan depósitos (relaveras) para su almacenamiento y protección de los ecosistemas, así como la construcción de lechos de secados para reducir su humedad y peso, y así facilitar su manejo, transporte y disposición final.

Conclusiones y recomendaciones

Colombia ofrece un panorama único en lo que respecta a los impactos adversos de la minería del oro en las fuentes hídricas del país y al uso de mercurio durante la explotación del oro. El uso no controlado de mercurio en la etapa de beneficio de oro, la alta informalidad, la ilegalidad y criminalidad que rodea la minería aurífera y las dificultades existentes para controlar y minimizar la comercialización, transporte y uso del mercurio en el país, muestran un panorama desalentador,

a pesar de los esfuerzos realizados por el gobierno colombiano para controlar el uso de sustancias químicas y combatir la ilegalidad en todo el país.

Ni siquiera la nueva normatividad creada para combatir esta problemática ha surtido los efectos esperados. La Ley 1658/2013 (Ley de Mercurio) planteó que a 2018 este contaminante estaría erradicado de la actividad minera, algo que ni siquiera ha logrado Brasil, país con más experiencia que Colombia en la búsqueda de mecanismos para controlar la minería artesanal y de pequeña escala y para combatir la minería ilegal. De hecho, hace más de 30 años Brasil expidió el Decreto No. 97.507/1989, para permitir la asignación de licencias para el uso de mercurio y cianuro en la minería del oro; es decir, se creó una nueva normatividad en el país, no para erradicar sino para ejercer mayor control sobre el uso de mercurio y cianuro en la minería aurífera.

Estimar la cantidad de mercurio utilizado en la minería del oro es una tarea compleja. No se conoce con certeza cuánto mercurio ingresa al país de contrabando, quién lo utiliza, en qué cantidades, ni dónde. Las cantidades de mercurio reportadas por los mineros pueden no corresponder con la realidad, y aunque se puede estimar la cantidad de mercurio utilizado en la minería legal, no ocurre lo mismo cuando se habla de minería ilegal, específicamente aquella que tiene vínculos con la criminalidad. De lo que sí hay certeza es la presencia de este contaminante en el aire, suelo, sedimentos, peces y fuentes hídricas a lo largo y ancho del país, y de que el tipo de minería menos deseada, la más contaminante, la que deja un costo ambiental alto, ubica a Colombia como uno de los principales países productores de oro de la región.

Se ha establecido que el mercurio también se encuentra naturalmente en el ambiente, pero a muy bajas concentraciones. En lugares no contaminados, los niveles de mercurio pueden oscilar entre 0,2 y 15 ng/L (Stein y Cohen 1996), aunque otros investigadores han reportado concentraciones entre 0,2 y 100 ng/L (Bank 2012). Esta información sirve de referencia para determinar cuándo un cuerpo de agua puede o no estar contaminado con mercurio proveniente de la minería del oro.

Es necesario que el país realice un diagnóstico sobre los niveles de mercurio en los ríos (particularmente en aquellas regiones donde se llevan a cabo actividades de explotación del oro), y actualice su normatividad sobre concentraciones permisibles de mercurio en el ambiente y destinación o usos del agua, de tal manera que ayude a proteger las fuentes hídricas y la vida acuática. Colombia debe continuar buscando soluciones para regularizar a los mineros informales, así como nuevas formas para combatir la minería ilegal asociada a los grupos armados al margen de la ley, esto con el apoyo de nuevas tecnologías. De igual manera, el Estado colombiano debe incrementar el apoyo técnico y financiero a quienes practican la minería artesanal y de pequeña escala, y acompañarlos hasta que logren adoptar y utilizar tecnologías menos contaminantes para el ambiente y con menor riesgo para la salud de los pobladores de municipios mineros. La minería artesanal del oro es una actividad que sirve de sustento diario a miles de personas en el país, por lo que hay que considerar también el impacto social y humano que ocasionaría cualquier normatividad que afecte la fuente de ingresos de los pequeños mineros.

Dado que la explotación de oro representa una fuente de ingresos importante para las finanzas públicas del país, puesto que es una fuente de empleo y contribuye a la generación de impuestos y regalías, la tecnificación de la industria minera permitiría incrementar la producción de oro, al tiempo que reduciría los impactos negativos sobre el ambiente al tener un mayor control en el uso de sustancias tóxicas como cianuro y mercurio. El mercurio es un contaminante persistente que

puede comportarse de manera errática en el ambiente; además, puede permanecer por décadas en los lugares donde es vertido, enterrarse en el fondo de los ríos y resuspenderse cuando haya perturbaciones en el agua, para finalmente ser transportado aguas abajo de los entables mineros para contaminar fuentes hídricas utilizadas para recreación, pesca, agricultura y potabilización. De ahí la importancia de que el gobierno logre regular la comercialización, transporte y uso de este metal en las actividades mineras de tal manera que se minimice el impacto negativo sobre el ambiente y se proteja la salud y la economía de todos aquellos que, de manera legal, se sustentan de esta actividad.

Referencias

Alcala-Orozco M, Caballero-Gallardo K, Olivero-Verbel J (2019) Mercury exposure assessment in indigenous communities from Tarapaca village, Cotuhe and Putumayo Rivers, Colombian Amazon. *Environ Sci Pollut Res* 26:36458–36467. <https://doi.org/10.1007/S11356-019-06620-X/FIGURES/4>

Bank MS (2012) *Mercury in the environment: pattern and process*, 1st ed. Univ of California Press

Calao-Ramos C, Gaviria-Angulo D, Marrugo-Negrete J, et al (2021) Bats are an excellent sentinel model for the detection of genotoxic agents. Study in a Colombian Caribbean region. *Acta Trop* 224:106141. <https://doi.org/10.1016/J.ACTATROPICA.2021.106141>

Canham R, González-Prieto AM, Elliott JE (2021) Mercury Exposure and Toxicological Consequences in Fish and Fish-Eating Wildlife from Anthropogenic Activity in Latin America. *Integr Environ Assess Manag* 17:13–26. <https://doi.org/10.1002/IEAM.4313>

Cordy P, Veiga MM, Salih I, et al (2011a) Mercury contamination from artisanal gold mining in Antioquia, Colombia: The world's highest per capita mercury pollution. *Sci Total Environ* 410–411:154–160. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.09.006>

Cordy P, Veiga MM, Salih I, et al (2011b) Mercury contamination from artisanal gold mining in Antioquia, Colombia: The world's highest per capita mercury pollution. *Sci Total Environ* 410–411:154–160. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.09.006>

Corte Constitucional (2016) Sentencia T-622

Defensoría del Pueblo de Colombia (2015) *La minería Sin Control: Un Enfoque desde la Vulnerabilidad de los Derechos Humanos*

Diaz FA, Katz LE, Lawler DF (2020) Mercury pollution in Colombia: challenges to reduce the use of mercury in artisanal and small-scale gold mining in the light of the Minamata Convention. <https://doi.org/10.1080/0250806020201845936> 45:730–745. <https://doi.org/10.1080/02508060.2020.1845936>

Díaz SM, Muñoz-Guerrero MN, Palma-Parra M, et al (2018) Exposure to Mercury in Workers and the Population Surrounding Gold Mining Areas in the Mojana Region, Colombia. *Int J*

Environ Res Public Heal 2018, Vol 15, Page 2337 15:2337.
<https://doi.org/10.3390/IJERPH15112337>

DNP (2016) “También tenemos que hacer la paz con la naturaleza porque el mercurio sigue causando estragos”: Simón Gaviria Muñoz. In: Dep Nac Planeación. <https://www.dnp.gov.co/Paginas/“También-tenemos-que-hacer-la-paz-con-la-naturaleza-porque-el-mercurio-sigue-causando-estragos”-Simón-Gaviria-Muñoz.aspx>. Accessed 30 May 2022

Enamorado-Montes G, Reino-Causil B, Urango-Cardenas I, et al (2021) Mercury Accumulation in Commercial Varieties of *Oryza sativa* L. Cultivated in Soils of La Mojana Region, Colombia. *Toxics* 2021, Vol 9, Page 304 9:304. <https://doi.org/10.3390/TOXICS9110304>

Frisbie SH, Mitchell EJ, Sarkar B (2015) Urgent need to reevaluate the latest World Health Organization guidelines for toxic inorganic substances in drinking water. *Environ Heal* 14:63. <https://doi.org/10.1186/s12940-015-0050-7>

Gafner C (2018) La contaminación hídrica por Mercurio y su manejo en el derecho colombiano. In: *Tratado de derecho de aguas. Tomo I: derecho de aguas colombiano para el siglo XXI*. pp 495–526

Gutiérrez-Mosquera H, Sujitha SB, Jonathan MP, et al (2018) Mercury levels in human population from a mining district in Western Colombia. *J Environ Sci* 68:83–90. <https://doi.org/10.1016/J.JES.2017.12.007>

IDEAM (2015) *Estudio Nacional del Agua 2014*. Bogotá D.C.

IDEAM (2019) *Estudio Nacional del Agua 2018*. Bogotá D.C.

Meza Martínez MA, De La Ossa Velázquez J, Hernández Gómez J, Marrugo Negrete J (2020) Mercurio total en hígado de *Trachemys callirostris* (Gray, 1856) (Testudines: Emydidae) en tres zonas de la Mojana, Sucre-Colombia. *Rev UDCA Actual Divulg Científica* 23:.. <https://doi.org/10.31910/RUDCA.V23.N1.2020.1239>

Nuñez-Avellaneda M, Agudelo Córdoba E, Gil-Manrique BD (2014) UN ANÁLISIS DESCRIPTIVO DE LA PRESENCIA DE MERCURIO EN AGUA, SEDIMENTO Y PECES DE INTERÉS SOCIO-ECONÓMICO EN LA AMAZONIA COLOMBIANA. *Rev Colomb Amaz*

Palacios-Torres Y, Caballero-Gallardo K, Olivero-Verbel J (2018) Mercury pollution by gold mining in a global biodiversity hotspot, the Choco biogeographic region, Colombia. *Chemosphere* 193:421–430. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2017.10.160>

Paola S, Licon V, Luis J, et al (2019) MERCURIO, METILMERCURIO Y OTROS METALES PESADOS EN PECES DE COLOMBIA: RIESGO POR INGESTA. *Acta Biológica Colomb* 24:232–242. <https://doi.org/10.15446/ABC.V24N2.74128>

Prieto RG, Guatame CL, Cárdenas SC (comps) (2019) *Recursos minerales de Colombia*, vol. 2.

Bogotá.

Sierra-Marquez L, Peñuela-Gomez S, Franco-Espinosa L, et al (2018) Mercury levels in birds and small rodents from Las Orquideas National Natural Park, Colombia. *Environ Sci Pollut Res* 25:35055–35063. <https://doi.org/10.1007/S11356-018-3359-2/FIGURES/6>

Stein E. D., Cohen Y. 1996. Environmental distribution and transformation of mercury compounds. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 26(1): 1-43

Symmes Cobb J (2021) Colombia alluvial gold output area up 3%, large majority illegal -UN | Reuters. Reuters

Thomson Reuters (2018) GFMS Gold Survey 2018. London

Torres Gutierrez JI, Pinzón Salcedo M, Esquivia Zapata M, et al (2012) La explotación ilitica de recursos minerales en Colombia. 0–137

UN Environment (2017) Global mercury supply, trade and demand. Geneva, Switzerland

Unidad Investigativa (2017) Así entra al país el mercurio que envenena pueblos y ríos. *El Tiempo*

Universidad de Córdoba, MinEnergía (2014) Estudio de la Cadena del Mercurio con énfasis en la actividad minera aurífera Colombiana. Bogotá D.C.

UNODC (2021) Colombia: Explotación de oro de aluvión Evidencias a partir de percepción remota 2020

UPME (2022) Unidad de Planeación Minero Energética. <http://www1.upme.gov.co/Paginas/default.aspx>. Accessed 7 Nov 2018

UPME (2015) Guía de Orientación para el Minero sobre el Correcto Manejo de Vertimientos para la Minería de Metales Preciosos y de Carbón. Bogotá D.C.

CAPÍTULO 5

Contaminación y tratamiento de aguas afectadas por la explotación de oro en Ecuador

Wilson Exson Vilela Pincay¹ (wvilela@utmachala.edu.ec), **Jorge Andrés PARRALES Dávila**¹, **Josué Steven Valencia Zapata**¹ y **Carlos Javier Vilela Reyes**²

¹Universidad técnica de Machala

²Universidad tecnológica empresarial de Guayaquil.

Introducción

Desde los primeros pasos del hombre hasta la actualidad, los minerales han tenido mucha relevancia a lo largo de la historia de la humanidad. Empezando desde mucho antes de Cristo, en las primeras civilizaciones registradas por los historiadores, utilizando y adaptando a estos mismo a su supervivencia, creando muchas herramientas que las emplearon para su desarrollo, como también armas, utensilios o artilugios implementados para facilitar la agricultura, etc.

Con lo que respecta la historia de la minería en Ecuador, cabe recalcar que pese a que no hay datos precisos de cuándo fue la primera obtención de minerales, se sabe de manera general y por hallazgos arqueológicos que datan de diferentes periodos de la historia; sin embargo, el que mayor inferencia tiene es el periodo precolombino que fue donde se dio el desarrollo social de las civilizaciones americanas antes de la llegada española.

Dentro de las civilizaciones precolombinas, uno de los minerales más famosos fue el oro e incluso dentro del mundo contemporáneo aún mantiene su gran valoración. No obstante, en las épocas previas a la intervención española fue implementado en la elaboración de objetos valiosos, que en esos periodos históricos se usaban para entregar a los miembros de las familias nobles como obsequios o en otros casos como elementos ceremoniales, obsequios de boda o previo a esto, presentes para solicitar la mano de alguna mujer célibe, es por esto que su explotación se dio con gran frecuencia.

A pesar de que la explotación del oro se desarrolló frecuentemente en las civilizaciones precolombinas, en América Latina la verdadera sobreexplotación del oro comenzó a partir del mercantilismo y, por consecuencia a este, el imperialismo mismo y constante practica de la conquista a los territorios vírgenes, que eran caracterizados por su riqueza en recursos minerales. Es así que la extracción de oro se convirtió en una práctica usual para los imperios conquistadores, por lo que, con el paso de las décadas, la extracción mineral se plasmó como una práctica económica, muy importante para los estados que en algún momento fueron parte de los grandes imperios, pero que al día de hoy son independientes. No obstante, la explotación mineral se ha convertido en una fuente de sustento económico, sobre todo en el caso de los países con un soporte monetario subdesarrollado. La distribución geográfica de los yacimientos y principales centros de explotación de oro de Ecuador se ilustra en la Figura 5.1.

MAPA DE ZONAS MINERAS MAPE DE ORO - ECUADOR

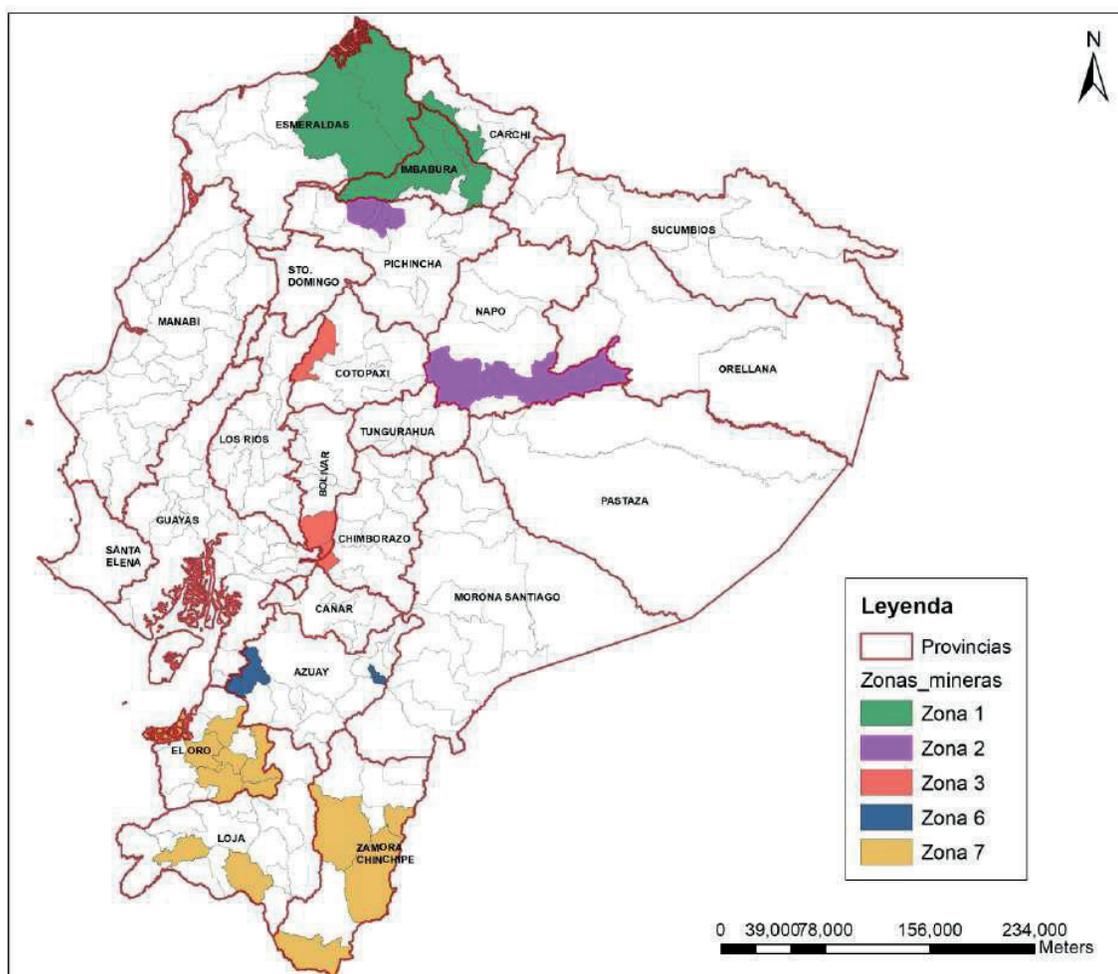


Figura 5.1. Distribución geográfica de los yacimientos y explotación de oro de Ecuador. Fuente: Plan de Acción Nacional Ecuador, 2019.

Factores Importantes dentro de la Minería

Cuando se habla de minería, se deben considerar dos factores importantes dentro de todo el proceso de extracción: (1) el *cianuro* que por sus condiciones y capacidades químicas es utilizado para la disolución del metal precioso, que en estas circunstancias no puede ser extraído con facilidad; es por esto que la producción total de cianuro se encuentra dirigida en un 20% para la extracción de oro sobre todo en los casos de minería ilegal. (2) El otro factor a evaluar dentro del proceso de explotación del oro es el *mercurio*, que al igual que el cianuro es implementado dentro de los procesos mineros, pero en este caso el susodicho mineral es utilizado para aislar el oro de las rocas o aquellas piedras donde se mantiene sujeto. El mercurio se adhiere al oro dando como resultado una amalgama que permite la división de la roca del mineral, por lo que al finalizar este proceso quedará solo el oro con el mercurio; para poder obtener el oro puro, se deberá derretir esta sustancia a altas temperaturas.

El verdadero problema de este proceso minero se presenta con la irresponsabilidad medioambiental que tienen los productores, ya que por disminuir costos de producción no

gestionan como se debe los desechos minerales, mismos que terminan siendo arrojados de modo indiscriminado en los cuerpos acuíferos cercanos a las faenas. Las consecuencias del uso sin precaución de estos elementos químicos son muy nocivas y tienen repercusiones químicas severas como la permanencia constante del cianuro que por sus condiciones es tóxico por un tiempo indeterminado; además, se tiene la producción de drenajes ácidos y la formación de ácido sulfúrico, esto en consecuencia de la oxidación de sulfuros que se encuentran contenidos en las rocas.

Los años de extracción de minerales han sido muchos y para el Ecuador moderno. Esta práctica es un verdadero desafío, sobre todo por uso indiscriminado de elementos químicos como el cianuro y mercurio, implementados dentro de todo el proceso de lavado del oro, que se desarrolla con bastante irresponsabilidad y cumpliendo muy poco los parámetros establecidos dentro del Código del Ambiente y la Ley de Minería

Consecuencias actuales producidas por la minería

Conciencia ciudadana

Dentro de la sociedad contemporánea, se ha desarrollado una percepción polarizada de los temas relacionados con la sostenibilidad ambiental y los implementos sustanciales para poder sujetar la gestión financiera pública, cuya sujeción se ve constituida por las obligaciones estatales, mismas que se reconocen como la potestad de extraer en cifras viables los recursos minerales dentro del territorio nacional. No obstante, dicha actividad debe ser realizada con conciencia ambiental e intereses por el desarrollo amigable del ecosistema, implicado en el proceso de extracción minera, tal como lo dice la Constitución de la República del Ecuador en su Art. 14: “Se reconoce el derecho de la población a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, que garantice la sostenibilidad y el buen vivir, *sumak kawsay*. Se declara de interés público la preservación del ambiente, la conservación de los ecosistemas, la biodiversidad y la integridad del patrimonio genético del país, la prevención del daño ambiental y la recuperación de los espacios naturales degradados” (Constitución de la República del Ecuador, 2008, pág. 14).

La noción de la responsabilidad minera engloba el respeto y el pleno cumplimiento del trabajo social y la gestión ambiental, en absoluta aplicación de las normas jurídicas del país. La buena fe corporativa se identifica como una expectativa para constituir al desarrollo y de modo análogo poder garantizar la minería responsable. Por el contrario, la comisión intergeneracional que desarrolla la dirección de los recursos no renovables, depreciación que los gobiernos de turno deben gestionar con prudencia y responsabilidad, reconociendo como base estructural la transparencia y la justificación del uso de aquellos recursos que son parte del patrimonio económico de todo el país.

La norma jurídica ecuatoriana es una legislación de carácter garantista, por lo que dentro de sus principios contempla los intereses ambientales como puntos clave para el desarrollo integral del Estado. Es así que se desarrollan y adoptan normas vinculantes para la prevención, responsabilidad, solidaridad y gestión responsable integralmente, tal como lo dice el Art. 73 de su Carta Magna: “El Estado aplicará medidas de precaución y restricción para las actividades que puedan conducir a la extinción de especies, la destrucción de ecosistemas o la alteración

permanente de los ciclos naturales. Se prohíbe la introducción de organismos y material orgánico e inorgánico que puedan alterar de manera definitiva el patrimonio genético nacional” (Constitucion de la Republica del Ecuador, 2008, pág. 36).

Entonces podemos resaltar que, para poder cumplir con los intereses establecidos en la norma jurídica, será imperativo que se sometan a controles exhaustivos las actividades que tienen impacto mínimo o notable en el medio ambiente. El desarrollo de las actividades mineras se encuentra subyugado a la plena aplicación de las normas generales del ordenamiento jurídico en doctrina ambiental y dentro de la normativa específica del área minera de acuerdo al Art. 259: “Con la finalidad de precautelar la biodiversidad del ecosistema amazónico, el Estado central y los gobiernos autónomos descentralizados adoptarán políticas de desarrollo sustentable que, adicionalmente, compensen las inequidades de su desarrollo y consoliden la soberanía” (Constitucion de la Republica del Ecuador, 2008, pág. 128).

Tomando en cuenta que la minería es un patrimonio activo del Estado ecuatoriano, las cuantiosas cifras económicas que perciben los gobiernos de turno son el principal motivo por el cual se considera que este recurso debe ser operado con una percepción fiscal transparente y responsable, de modo que tal actividad no sea privada en futuras generaciones y aun se pueda ostentar dicha riqueza.

Profundamente consientes que los minerales son recursos no renovables y las millonarias inversiones que se desarrollen para su futura adquisición pueden ser valores activos por un periodo determinado de tiempo, conforme la actividad se incremente con mayor celeridad, la escases de este patrimonio económico se dejara evidenciar, lo que se representará principalmente en los valores monetarios en contra de la economía estatal, misma que pasara a tener los anteriores números activos en cifras que se percibirán como pasivos, evento que será crucial en la economía.

Incremento de la minería informal

La actividad de explotar el suelo con el objetivo de obtener minerales preciosos décadas se ha popularizado en las últimas, sobre todo de modo irregular. El impacto que genera dicha actividad abarca a las quebradas y las diferentes fuentes de sustento acuífero para la población, por lo que su incidencia en la salud es polémica. Pese a la existencia de diferentes estudios que demuestran cuales son las secuelas negativas a corto, mediano y largo plazo que acarrea la minera en la salud de las personas, el interés por reducir estos efectos negativos es nulo. Lamentablemente, los efectos a la salud de las personas no son los únicos que se encuentran implicados; el daño al medio ambiente también debería ser un motivo por el cual se de mayor interés a la lucha para erradicar las secuelas de esta práctica tan nociva para todos. Sin embargo, en nuestra sociedad se ve mayor interés en cifras económicas que en valores de salud y cifras ambientales (que ya son catastróficas), por lo que, conforme al acrecentamiento de estas prácticas, se irá agudizado en mayor medida.

Efectos Medioambientales

Cuando se habla de los efectos Medioambientales relacionados con la minería, los resultados lesivos ambientales son los probablemente más. Actualmente, los altos grados de polución y la misma emisión de gases de efecto invernado como dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno y

ozono son de los principales contaminantes ambientales a nivel global, y la minería tiene incidencia en la producción de los mismos.

Los casos más críticos que la minería concibe como resultados lesivos al medio ambiente son el calentamiento global, como consecuencia del desequilibrio de los ecosistemas, la misma degradación de los suelos, el degrado masivo de los ecosistemas y el desplazamiento de pueblos y nacionalidades indígenas, que por el aumento de los territorios dedicados a la minería se ven obligados trasladarse de sus lugares de origen y poder huir de los contaminantes en los ríos y demás cuerpos de agua, que son las primeras víctimas de la mala gestión minera.

La degradación del suelo es un fenómeno que se da consecuentemente a la contaminación ambiental dada por la explotación de minerales, pues esto se debe a que los suelos son los principales absorbentes de los desechos tóxicos, que son el resultado de la implicación del cianuro y mercurio en la actividad minera. La ubicación de las minas va a ser crucial dentro de todo este proceso de contaminación, dado que es necesario realizar perforaciones en los suelos para conseguir los minerales, lo que resulta en suelos estériles y desertificados, los cuales al finalizar simplemente dejarán territorios sin vegetación, sin minerales, por ende, improductivos para las personas; ni siquiera serán espacios útiles para la producción de oxígeno, puesto que la vida es insustentable en dichas condiciones.

El Ecuador ha tenido grandes estragos producidos por el impacto medioambiental de la actividad minera. Las secuelas que deja la minería a su paso no solo se limitan a los ríos, pues los mares y océanos también son víctimas de la contaminación por esta actividad. La incertidumbre por el incremento del sector se acrecienta con cada fenómeno ambiental que se desarrolla consecuentemente a la minera. El país vive etapas críticas y los estragos de la minería no se han hecho esperar, pues principalmente la Provincia de El Oro en los cantones de Zaruma, Portovelo asimismo en la zona norte de la Provincia de Esmeraldas y en la Provincia de Morona Santiago que es la última provincia que se ha sumado a este conflicto; estos fueron definidos como efectos colaterales de la minería, mismos que se dan en lugares específicos, los cuales son los principales focos de explotación minera del país.

La minería ecuatoriana se desarrolla a partir de dos fases importantes, que son la fase exploratoria o de exploración, y la fase de explotación, ambas elementales para poder obtener los recursos. Cuando se inicia la fase de exploración, también se da por iniciada la fase de daños en el medio ambiente, específicamente al aire, esto como resultado de la emisión de partículas materializadas de distintos contaminantes del oxígeno implementados necesarios en la antes dicha etapa. También dentro de la fase exploratoria se produce la devastación de la capa vegetal debido a las perforaciones que se hacen en los suelos y comienza el uso de minerales pesados, que son sustancias tóxicas desarrolladas a partir de combustibles fósiles y otros elementos que contaminan los suelos.

De modo análogo a la fase de exploración, la fase de explotación produce efectos adversos en el medio ambiente, pero en este caso serán mucho mayores las consecuencias, por lo que esta etapa se encuentra encasillada como la más destructiva para el medio ambiente, ya que es dentro de este proceso, cuando se comienza a fulminar acrecentando los recursos naturales y en caso de querer remediar los efectos lesivos de esta etapa, será sustancial al menos trabajar en la recuperación

ambiental por un periodo no menor a diez años. La fase de explotación se da por iniciada extrayendo las capas de vegetación que se encuentran en la superficie terrestre, con el objetivo de poder implementar cantidades altas de explosivos, maquinarias pesadas, palas eléctricas y otros implementos que son los encargados de extraer las grandes rocas y que se utilizan en el proceso de explotación.

Consecuencias de la contaminación del agua

El agua es uno de los elementos que más se contamina durante el proceso de explotación minera; dentro de las consecuencias más nocivas se encuentra el daño a la salud humana y a los ecosistemas, producto de la contaminación, por lo que ahora se detallarán cuáles son estos efectos negativos que tiene la minería en el agua y todo lo que esto implica:

- Los ecosistemas acuáticos sufren alteraciones en la vida acuática, esto en consecuencia al vertido de residuos industriales que en situaciones más severas pueden destruir el ecosistema marino
- El surgimiento y la proliferación de diversas enfermedades como cólera, disentería y hepatitis, que afectan perniciosamente a la población humana
- Decaimiento de sistema inmunológico de las especies
- Aumento de la infertilidad reproductiva, desarrollo de enfermedades catastróficas como lixiviados y cánceres de procedencia en los desechos ubicados en los fondos de los diversos cuerpos de aguas
- Aparición de especies invasoras que pueden generar intoxicaciones en las especies autóctonas de algún territorio, esto en consecuencia a la falta de agua.

Contaminación de los ríos de las provincias del Ecuador

En el puente que limita a la Provincia de Azuay existe la contaminación del Río Chico, debido a que presenta una fuerte presencia de cobre, plomo, arsénico, zinc, vanadio y níquel, estos elementos producen la contaminación de las aguas. Similarmente, en el Rio Tenguel, cercano al puente de la Esperanza, contiene altos niveles de metales como el cobre, arsénico, níquel y cobalto. Por otro lado, El rio Siete, que se encuentra ubicado en el puente limítrofe en la Provincia de El Oro, tanta es la contaminación por mercurio, cobre, arsénico que es casi improbable que exista vida acuática.

Los ríos Calera y Amarillo en Portovelo y Zaruma, respectivamente, han visto deterioradas sus aguas a causa de la contaminación minera. No solo existe contaminación en los ríos, sino también en las quebradas, debido a un indebido manejo de los desechos sólidos biodegradables; las aguas ácidas que provienen de las minas son evacuadas de manera directa en las quebradas que existen cerca de las bocaminas.

Distintos estudios coinciden en que existe una inmensa concentración de metales pesados en la cuenca del rio Puyango, afluente que recopila las aguas de los ríos Amarillo y Calera que atraviesan las zonas mineras de Portovelo. Las plantas de beneficio o procesadoras están ubicadas en el Pache, a un lado del rio Amarillo y a tres kilómetros de la zona céntrica del cantón Portovelo.

Marco regulatorio

Constitución

Para empezar a hablar del marco regulatorio, debemos comenzar por las bases o quien da la potestad de regular, en este caso, la contaminación del agua. Obviamente, nuestro punto de partida, se encuentra en la cúspide de nuestro ordenamiento jurídico, nuestra Constitución, la misma que tiene un carácter garantista, además de ser la primera en declarar los Derechos de la Naturaleza, que se encuentra en el Capítulo Séptimo, empezando desde el Artículo 71, que dice: “La naturaleza o Pacha Mama, donde se reproduce y realiza la vida, tiene derecho a que se respete integralmente su existencia y el mantenimiento y regeneración de sus ciclos vitales, estructura, funciones y procesos evolutivos” (Constitucion de la Republica del Ecuador, 2008). Además, agrega: “Toda persona, comunidad, pueblo o nacionalidad podrá exigir a la autoridad pública el cumplimiento de los derechos de la naturaleza. Para aplicar e interpretar estos derechos se observarán los principios establecidos en la Constitución, en lo que proceda. El Estado incentivará a las personas naturales y jurídicas, y a los colectivos, para que protejan la naturaleza, y promoverá el respeto a todos los elementos que forman un ecosistema” (Constitucion de la Republica del Ecuador, 2008). Partiendo desde dicho artículo, se da por sobreentendido que quienes están en obligación de hacer cumplir los derechos de la Pacha Mama son el Estado junto con los ciudadanos.

Código Orgánico del Ambiente

Ya teniendo claro de dónde emana el poder regulador, pasamos a las siguientes leyes que ayudan y dan más instrucciones para el tratamiento del recurso hídrico. Para ello, tenemos de manera general al Código Orgánico del Ambiente, cuyo propósito es garantizar el derecho de las personas a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, así como proteger los derechos de la naturaleza para la realización del buen vivir o *sumak kawsay*. Obviamente, establece las herramientas para cumplir dicha misión que se encuentran en su Capítulo IV, denominado “De los instrumentos para la Regularización Ambiental”.

El establecimiento de la competencia del órgano rector se encuentra en su Artículo 191, que dice: “La Autoridad Ambiental Nacional o el Gobierno Autónomo Descentralizado competente, en coordinación con las demás autoridades competentes, según corresponda, realizarán el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire, agua y suelo, de conformidad con las normas reglamentarias y técnicas que se expidan para el efecto. Se dictarán y actualizarán periódicamente las normas técnicas, de conformidad con las reglas establecidas en este Código. Las instituciones competentes en la materia promoverán y fomentarán la generación de la información, así como la investigación sobre la contaminación atmosférica, a los cuerpos hídricos y al suelo, con el fin de determinar sus causas, efectos y alternativas para su reducción” (Código Orgánico del Ambiente, 2017)

Ley de Minería

Ahora si bien es obvio, el Código Orgánico del Ambiente es lo que se podría llamar una ley de manejo general, pero gracias a los avances de esta actividad se ha logrado consolidar la legislación de manera específica, por así decirlo, en donde las cosas están más claras; me refiero a la Ley de Minería, cuyo objetivo es “Normar el ejercicio de los derechos soberanos del Estado

Ecuatoriano, para administrar, regular, controlar y gestionar el sector estratégico minero, de conformidad con los principios de sostenibilidad, precaución, prevención y eficiencia. Se exceptúan de esta Ley, el petróleo y demás hidrocarburos”.

Para el tema de tratamientos de las aguas residuales de la minería, tenemos el Art. 79: “Tratamiento de aguas.- Los titulares de derechos mineros y mineros artesanales que, previa autorización de la autoridad única del agua, utilicen aguas para sus trabajos y procesos, deben devolverlas al cauce original del río o a la cuenca del lago o laguna de donde fueron tomadas, libres de contaminación o cumpliendo los límites permisibles establecidos en la normativa ambiental y del agua vigentes, con el fin que no se afecte a los derechos de las personas y de la naturaleza reconocidos constitucionalmente. El tratamiento a darse a las aguas para garantizar su calidad y la observancia de los parámetros de calidad ambiental correspondientes deberá preverse en el respectivo sistema de manejo ambiental, con observancia de lo previsto en las leyes pertinentes y sus reglamentos. La reutilización del agua, a través de sistemas de recirculación les una obligación permanente de los concesionarios El incumplimiento de esta disposición ocasionará sanciones que pueden llegar a la caducidad de la concesión o permiso” (Ley de Minería, 2013).

Actualidad

Agregada a la Ley de Minería, también existía una Ley conocida como “Ley del Agua”, pero La Corte Constitucional del Ecuador, el 12 de enero de 2022, a través de sentencia No. 45-15-IN/22, declaró la inconstitucionalidad de la Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Uso y Administración del Agua, LORHUAA y su reglamento. El fallo otorga 12 meses al Presidente de la República, para que este envíe un nuevo Proyecto de Ley. El motivo para expulsar del ordenamiento jurídico a la LORHUAA, en teoría es por haberse incumplido los parámetros de la consulta prelegislativa, previa la aprobación de las mencionadas normas. El proceso inició por una acción de inconstitucionalidad promovida por la CONAIE (10 de junio de 2015), y se acumula con la acción impulsada por la ECUARUNARI en contra del reglamento de la LORHUAA (9 de junio de 2015).

Responsabilidad del Estado

Agua

Ya que hemos aclarado el marco regulatorio (las leyes que dan las herramientas para controlar la minería), ahora corresponde hablar de la ejecución y cumplimiento de estas mismas. Si el deber del Estado es proteger la naturaleza, debe haber partes del mismo destinadas exclusivamente a hacer cumplir este deber. En este espacio es donde encuadra el siguiente Ministerio: El antes llamado Ministerio de Ambiente y Agua, cambió de nombre a Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica, mediante el Decreto Ejecutivo N°59 que consta de siete artículos y que oficializa al nuevo Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica. Dicha cartera de Estado ejerce control como cabeza principal de esta competencia. Dentro de este mismo nivel central tenemos la Agencia de Regulación y Control de Agua (ARCA), y que dado obviamente por su nombre es el encargado de controlar lo que sucede con los recursos hídricos del país. Dentro de este Ministerio existen dos Viceministerios: (1) Viceministerio de Ambiente y (2) Viceministerio de Agua. La misión de este Ministerio es “Garantizar la calidad, conservación y sostenibilidad de los recursos naturales, mediante el ejercicio efectivo de la rectoría, planificación, regulación,

control, coordinación y gestión ambiental y de los recursos hídricos, a través de la participación de organizaciones públicas, privadas, comunitarias y la ciudadanía, en el marco del respeto, integridad, responsabilidad y transparencia” (Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica, 2018).

Minería

Con Decreto Ejecutivo No. 399 del 15 de mayo del 2018, publicado en el Registro Oficial Suplemento 255 del 5 de junio del 2018, se fusionaron por absorción al Ministerio de Hidrocarburos, el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, Ministerio de Minería y la Secretaría de Hidrocarburos. Se modifica la denominación del Ministerio de Hidrocarburos a "Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables". Entre las competencias del Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables están: (1) Electricidad y Energía Atómica; (2) Hidrocarburos; y (3) Minería. Para cumplir con dichas competencias, se divide en tres viceministerios: (a) Viceministerio de Electricidad y Energía Renovable; (b) Viceministerio de Hidrocarburos; y (c) Viceministerio de Minas. La Misión de este Ministerio es: “Impulsar el aprovechamiento sostenible de los recursos energéticos y mineros en el Ecuador, siendo el órgano rector que emite políticas públicas que fomenten la optimización, eficiencia, transparencia, innovación, responsabilidad social y ambiental en las actividades del sector, contribuyendo sustancialmente al desarrollo integral del país” (Ministerio de Energía y Recursos Naturales no Renovables, 2021, pág. 141).

Diagnóstico

Cuando hablamos de minería, también se habla de que es sinónimo de corrupción, y gracias a nuestras autoridades esto se puede afirmar. Esta es una de las causas por las cuales la minería informal ha aumentado y la minería legal no respeta las normas ambientales. El diagnóstico es fácil: debido a las altas ganancias del sector minero, obtienen el poder para poder sobornar a las autoridades de control, es decir, el tema de la contaminación de aguas no está progresando debido a que el que controla es silenciado mediante coimas, como podemos ver en un reportaje especial del diario CORREO, donde un testigo protegido declaró que se dedicó hasta hace dos años a la minería ilegal, confirmado que algunas autoridades y participes del oficio de modo ilegal, comparte con los sableros, ya que estos les aportan grandes ganancias a través de los sobornos o valores del botín. Para la población en general el término “sablero” es desconocido; sin embargo, este se utiliza para referirse a los mineros ilegales.

Es a través de un reportaje realizado por el medio digital Primicias, que Javier, un hombre que era participe de la minería ilegal, declara: “Aquí todo el mundo sabe que hay lavado, se sabe quién lava, dónde tienen la plata, de dónde la sacan y a dónde la llevan, pero no se puede hablar de eso”.

Cuestionablemente, la situación de minería ilegal cada vez resulta más atrayente a muchos individuos, ya que estos tienen ciertas facilidades para cometer otros actos delictivos cuando se aprovechan de las posibilidades que genera la minería ilegal, sobre todo cuando se habla de evasión de la ley, con delitos como el lavado de activos, entre muchos otros.

Tratamiento

Para comenzar esta parte del Capítulo, debemos aclarar ciertos puntos. En primer lugar, que el tratamiento de las aguas residuales en la minería formal no existe o al menos, no hay evidencia fidedigna que verifique dicha gestión. Por consiguiente, la minería ilegal tampoco da tal tratamiento a las aguas residuales, debido a que como es ilegítima no tiene regulación; por ende, no existe obligación por cumplir con normas ambientales; además, tratar las aguas sería costoso y una de las causas de la ilegalidad en estas actividades es ahorrarse la máxima cantidad de dinero y sacar provecho al máximo. Como tercer punto, el tema de contaminación del agua y la minería ha ido tomando relevancia, tanto así que incluso en las últimas Elecciones Presidenciales 2021, uno de los principales candidatos era un activista por el medio ambiente, que quedó en tercer lugar de dicha competencia. Esto es un gran paso ciudadano de que el ambiente está tocando la luz del debate social, que ya no es un tema de mineros y Estado, si no de sociedad, Estado y mineros; pero esto aún no ha sido suficiente debido a la ineficiencia del Estado ecuatoriano y sus ministerios que no han sido capaces de parar estos desastres ambientalistas. Esto se ha traducido en frenar la evolución de esta problemática, incapacitando el avance de las tecnologías de “purificación” del agua. Obviamente, en diferentes universidades tanto públicas como privadas desarrollan proyectos piloto y de pequeña escala para sugerir cambios y dar soluciones, pero aún sin recibir el apoyo necesario para llevar dichos emprendimientos a un nivel macro para salvar a nuestras aguas

Sucesos recientes

Zaruma

El Cantón Zaruma fue reconocido como patrimonio cultural del Ecuador en el año 1990 y pasó a ser parte de la lista de La Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), esto en virtud a las innumerables características particulares que poseía esta ciudad. Sin embargo, y de manera lamentable, todo este reconocimiento internacional ha quedado obsoleto y ha sido de nulo interés para la gran mayoría de los mineros de la zona. Es por ello que este paraje tan maravilloso actualmente pasa por una crisis geológica, consecuente a la sobreexplotación minera del territorio.

La crisis geológica se ha podido evidenciar en las últimas décadas a través de los innumerables socavones por los que ha tenido que pasar la ciudad, el último ocurrido el 15 de Diciembre del 2021, afectando al casco céntrico de la urbanización. El socavón ocasionó que diversidad viviendas colapsaran, por lo que se debió evacuar al menos a 300 personas, para tutelar su bienestar.

Río Jatunyacu

Tan solo en tres meses, la minería ilegal había tomado para su dominio 70 hectáreas del brazo izquierdo del río Jatunyacu, mismo que se encuentra en la Provincia de Napo y es un foco de operaciones mineras ilícitas que, gracias a la gestión del Ministerio de Defensa, han podido ser paralizadas; todo esto con el objetivo de mediar el deterioro que sufren estos ríos debido a la constante contaminación generada por la minería ilegal. Es por lo que la gestión de la fiscalía con el apoyo de otros órganos no ha parado y ha continuado con la lucha en contra de esta actividad.

Es así que fechas atrás se encontraron diferentes maquinarias que eran oficiales del Municipio de la Provincia.

Lamentablemente, a través de investigaciones realizadas por diversos científicos, se ha podido evidenciar que las secciones más bajas de estos ríos se encuentran muertas debido al uso de elementos mineros como el mercurio, que es un contaminante muy severo y que para la salud humana representa un deterioro bastante grande. Es la ausencia de macroinvertebrados en el agua lo que deja observar el nivel de contaminación que tiene estos elementos.

Conclusiones y recomendaciones

La minería es antrópica, que por sus características afecta catastróficamente al medio ambiente y representa un peligro latente para las supervivencias de los pueblos y comunidades indígenas del Ecuador. Sin embargo, esta actividad es fundamental para alentar el desarrollo económico de las sociedades, que lamentablemente gestionan esta actividad de manera irregular, por lo que la práctica de la misma termina siendo coercitiva para el medio ambiente.

A pesar de que el oro ha sido catalogado como un mineral imprescindible para la economía en las últimas décadas, su explotación a través de la minería termina siendo una actividad que arremete en contra de los derechos de la naturaleza, reconocidos en la constitución del 2018; a su vez también vulnera el reconocimiento jurídico que tienen las comunidades y pueblos indígenas del territorio ecuatoriano, que por esta actividad tienen que abonar sus territorios para buscar espacios donde la contaminación no atente en contra de sus vidas. En otras palabras, los altos ingresos económicos que la minería genera para el Estado ecuatoriano tienen una factura muy alta para las personas que residen cerca a los espacios mineros, mismos que terminan siendo suelos estériles y espacios sin capacidad de albergar vida.

Es sustancial que la actividad minera sea regularizada con mayor precisión, pues es una actividad que genera indignidad humana, sobre todo en aquellos grupos que se encuentran en un estado de vulnerabilidad, misma que ha sido reconocida nacional e internacionalmente por el Ecuador. Es decir, al permitir que la actividad minera se desarrolle con irregularidad, también se está dando cabida a los atropellos de los derechos humanos, son pues los grupos étnicos del Ecuador, individuos con derechos reconocidos tanto en la Constitución como en los instrumentos internacionales sobre derechos humanos. Sin embargo, en la actualidad estas culturas sufren gran cantidad de enfermedades por el uso de químicos tóxicos en la minería. Lamentablemente, el uso de químicos tóxicos en la actividad minera es un verdadero desafío que atraviesan los grupos vulnerables, pues son desechados en los ríos y quebradas, que son utilizados para la supervivencia de los grupos antes mencionado.

Considerando todo lo antes mencionado, podemos decir que la minería mal gestionada es un peligro para la ecología, pues las consecuencias de estas irregularidades ambientales nos afectan a todos y en reiteradas ocasiones terminan cobrando vidas, ya que la actividad minera en Ecuador erosiona el suelo y destruye los ecosistemas.

Aunque no se busque satanizar la minería, es evidente que se debe trabajar para poder mejorar esta situación, pues los daños ambientales no esperan y las consecuencias ya están sintiéndose, por lo

que el tiempo de trabajar es hoy y las soluciones no pueden ser retrasadas, ya que el medio ambiente ha tolerado demasiados estragos por parte de la inconciencia ambiental, tanto de los estados como de las personas, que aunque conocen y palpan una realidad ambiental cada vez más dura, aún continúan con los actos repudiables que atentan contra los intereses ambientales de todos.

En conclusión, podemos decir que la minería es una actividad que lamentablemente no puede ser erradicada del todo, pero sí es necesario que se comiencen a trabajar en proyectos de desintoxicación de los cuerpos de aguas, en planes de contingencia para los casos de erosión del suelo y en proyectos que ayuden a remediar las secuelas de la minería, sobre todo en los casos donde ya la situación es insostenible. Cabe aclarar que también se reconoce que existen espacios donde la minería debe ser catalogada como prohibida, bajo cualquier circunstancia, pues estos territorios son espacios que tienen gran valor ambiental o cultural para el país, por lo que deben ser protegidos a toda costa.

Recomendaciones

- Aumentar la participación ciudadana en todo lo que respecta al control y legislación del Derecho Ambiental, ya que consideramos que es el núcleo del problema debido a que, si nadie reclama y no hay difusión, los casos se olvidan con sobornos o pasan desapercibidos por la sociedad.
- En los deberes del Gobierno ecuatoriano debe estar contratar personas éticas y con el conocimiento técnico requerido en los puestos de control para la minería.
- Aumentar el presupuesto y las carteras de Estado relacionadas a la minería, cuidando siempre que se articulen bien para poder hacer una sola presión, ya que los ministerios no deben trabajar independientemente, pues eso solo rebajaría el nivel de efectividad requerido.
- Capacitar a los jueces en materia ambiental, debido a que esto produce poca movilidad y aplicación correcta de los Derechos de la Naturaleza, aunque esto de cierta manera es un problema doctrinal debido a que el nacimiento de esta rama del derecho es muy reciente, comparadas con el resto.
- Adaptar la legislación actual al contexto ecuatoriano, teniendo como regla obligatoria primera recomendación, para así garantizar una ley más apegada al bien común y de la sociedad, evitando que se convierta en una norma aprovechada por los grupos de poder de esta industria.
- Fortaleciendo el punto anterior, debemos crear una cultura de prevención y no de daños; es decir, debemos crear un entorno viable a la naturaleza, que se puedan detener acciones, no que simplemente sancione cuando el daño ambiental ya está hecho y que en muchos casos es irremediable.
- Tener una legislación clara que esté en sintonía también con el aparato estatal; primero resolver problemas estructurales y luego aplicar normas, porque luego esto se convierte en letra muerta, como es el caso actual ecuatoriano. Además, que con esto se generen planes elaborados desde la óptica técnica y no solamente desde la política.
- Implementar un verdadero acceso a la información pública relacionada al tema minero, pues esto aseguraría una debida fiscalización ciudadana y un vínculo de confianza necesario entre sociedad y Estado

Referencias

Asamblea del Ecuador. (2008). Constitución de la República del Ecuador., (pág. 219). Montecristi.

Asamblea Nacional . (2013). *Ley de Minería*. Quito.

Asamblea Nacional. (12 de Abril de 2017). Código Orgánico del Ambiente. *Código Orgánico del Ambiente*. Quito, Pichincha, Ecuador.

Ministerio de Energía y Recursos Naturales no Renovables. (2021). *Plan Estratégico Institucional* . Quito .

Ministerio del Ambiente y Agua. (2020). *Plan de Acción Nacional Sobre el Uso de Mercurio en la Minería Artesanal y de pequeña escala de oro en Ecuador, conforme la convención de Minamata sobre mercurio*. Quito .

Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica. (2018). *Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica*. Obtenido de Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica: <https://www.ambiente.gob.ec/valores-mision-vision/#>

CAPÍTULO 6

Contaminación y tratamiento de aguas afectadas por la explotación de oro en Nicaragua

Francisco J. Picado Pavón¹ (francisco.picado@cira.unan.edu.ni)

¹Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos de Nicaragua. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua (CIRA/UNAN-Managua).

Introducción

La minería del oro (Au) y de otros metales como la plata (Ag), se estableció en Nicaragua a finales del siglo XVIII como una actividad económica trascendente para el país. A mediados del siglo XIX, el país ya era el principal productor de oro en la región Centroamericana (Roberts & Earl, 1957). Desde entonces, el proceso industrial para la recuperación del oro involucraba la flotación y la cianuración. Esta actividad dio lugar simultáneamente al surgimiento de generaciones de familias que desde ese entonces se dedicaron a la extracción del metal como medio de subsistencia. La extracción la realizaban artesanalmente y haciendo uso de sustancias tóxicas como el mercurio (Hg) y el cianuro (CN⁻), práctica que continua hasta la fecha (Veiga, Angeloci, Hitch, & Velasquez-Lopez, 2014). La exposición y manipulación directa de estas sustancias es una práctica que incide no solo en la calidad ambiental, sino también en la salud humana (Saunders, y otros, 2013). Este escenario, ha representado un riesgo permanente, tanto para los mineros como para el resto de los pobladores locales (Cuadra, Lundh, & Jakobsson, 2009), lo cual sugiere el monitoreo ambiental del Hg y otros metales que también son removidos de sus fuentes naturales y liberados localmente (Picado, y otros, 2010).

La producción de oro en Nicaragua ocupa un lugar importante en la economía nacional, tal que el país sigue siendo el mayor productor de este mineral en Centroamérica. Esta producción proviene principalmente de cuatro distros mineros localmente conocidos como Bonanza, La India, El Limón y La Libertad (Figura 6.1). En estas áreas mineras operan compañías de capital extranjero, las cuales realizan la extracción de metales como el oro y plata (GRUN, 2021), tanto a cielo abierto como subterránea (Castellón, 2021). En las últimas décadas, la tendencia en el aumento del precio internacional del oro ha dado lugar al surgimiento de nuevos proyectos mineros en el país, tales como el Topacio Gold Project y La India-San Isidro Project (ver Figura 6.1). Aunque la minería industrial metálica en Nicaragua es una fuente de empleo formal para la economía nacional (FUNIDES, 2016), el aumento de esta actividad ha intensificado y diseminado la minería artesanal y de pequeña escala (MAPE) (Castellón, 2021). Al igual que otras regiones, la minería metálica ha resultado en la alteración del estado prístino de los suelos, pérdida de bosques y en la modificación del curso de las fuentes de agua superficiales, cuya calidad se ve afectada por la presencia de sustancias como el Hg y el CN⁻ (Nolasco, 2011). Estas sustancias son liberadas, en cierto grado, por el uso que hacen de estas en el proceso de la MAPE (Nolasco, 2011). Otros elementos como el arsénico (As), cromo (Cr) y el plomo (Pb) que no son recuperados también son liberados a través de los residuos mineros que contaminan las aguas superficiales (McKinley, 2013).



Figura 6.1. Área de mineralización del oro en Centroamérica (Steiner, 2010) y áreas de explotación del oro en Nicaragua. Fuente: El Pulso, 2017.

En la actualidad, unas 30 mil personas están dedicadas a la MAPE en el país (ACAFREMIN, 2019), las cuales están organizadas en colectivos o cooperativas. Sin embargo, por falta de recursos económicos y en cierta forma por el desconocimiento de otras alternativas, este subsector de la minería metálica (que cuentan con niveles tecnológicos bajos) no ha implementado tecnologías amigables con el medio ambiente. Esta actividad extrae el oro remanente en el mineral aurífero de minas abandonadas y el oro que está confinado en afloramientos externos, así como el oro que se acumula en los sedimentos fluviales, contribuyendo significativamente (~20-30%) a la exportación del oro nacional. Sin embargo, las MAPE en Nicaragua liberan al ambiente una cantidad importante de Hg (AMAP/UNEP, 2019). Estudios recientes revelan que aproximadamente 3,5 toneladas de Hg son liberadas anualmente por las MAPE en el país (Yoshimura, Suemasu, & Veiga, 2021), de las cuales una cantidad importante contamina los suelos y las aguas superficiales. En América Latina se ha estimado recientemente que por cada gramo de Au que se produce, unos 4,6 gramos de Hg son liberados al ambiente.

El manejo inadecuado de los residuos mineros y la consecuente liberación ambiental del Hg por la MAPE (Veiga, Angeloci, Hitch, & Velasquez-Lopez, 2014) continúa siendo un tema de contaminación ambiental en las áreas mineras (AMAP/UNEP, 2019). En Nicaragua, la presencia de Hg, CN⁻ y otros metales en las aguas y sedimentos de los cuerpos de agua superficiales y probablemente en las fuentes de aguas subterráneas han limitado algunos usos de estos recursos (Nolasco, 2011) (Picado, y otros, 2010). La liberación del Hg tiene lugar a través de los desechos mineros y la quema a cielo abierto de la amalgama formada entre el Hg y el oro, así como entre el Hg y otros metales (Picado, 2004). En el año 2010 se estimó que la emisión ambiental de Hg por las MAPE existentes en el país fue de unas 0,75 toneladas (AMAP/UNEP, 2013) y representó el 16% de las emisiones totales de Hg del resto de países de la región Centroamericana y el 0,1% de las emisiones globales registradas en ese mismo año. No obstante, estos valores de emisión reportados varían en un rango de 0,70 a 0,91 toneladas/año (AMAP/UNEP, 2019) que al compararlos con las 3,5 toneladas de Hg/año reportado recientemente (Yoshimura, Suemasu, &

Veiga, 2021) es un indicativo del aumento de las MAPE en el país y probablemente de una intensificación de la contaminación de las aguas.

Los niveles de contaminación observados en algunas áreas mineras de Nicaragua (Wickre, Folt, Sturup, & Karagas, 2004) (Picado & Bengtsson, 2012) son en cierto grado superiores a los valores guías internacionalmente existentes de regulación ambiental y de protección al ser humano (Sequeira-León, Luna-Avilés, & Huete-Peréz, 2011) (Esbensen & Appel, 2017). En el caso de la minería industrial, cuya capacidad de procesamiento diario va desde los 25 toneladas hasta 6050 toneladas, esta cuenta con programas de monitoreo de la calidad de las aguas circundantes, cuyo cumplimiento es vigilado por instituciones de gobierno como el Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales, el Ministerio de Salud y el Ministerio de Energía y Minas; sin embargo, el uso de sustancias tóxicas en la minería artesanal sigue siendo una amenaza para las aguas superficiales. No obstante, los esfuerzos del Estado nicaragüense en conjunto con los del sector minero, encausado hacia una minería responsable, ha contribuido a mejorar la percepción de las familias dedicadas a la MAPE en cuanto al cuidado de su salud y del ambiente.

Marco regulatorio

Nicaragua en su Constitución Política, Artículo 102 (AN, 1987), establece que los recursos naturales (en los que se incluyen los minerales metálicos) son patrimonio nacional y pueden ser explotados de forma racional por interés de la nación. Bajo este mandato constitucional, el país concibió un marco jurídico (año 2001) como herramienta para regular los procesos concesionarios y las exigencias técnicas y ambientales para el sector nacional minero. Esta regulación, así como la organización de las actividades de exploración y explotación de los recursos minerales, se lleva a cabo bajo la Ley General sobre la Explotación de las Riquezas Naturales (AN, 1958); instrumento que dio lugar a la Ley 387-2001 “Ley Especial sobre Exploración y Explotación de Minas” (AN, 2001). Paralelo a este marco jurídico, el país cuenta con una legislación que asegura la protección ambiental y controla la actividad nacional minera.

Por decreto de ley, Ley No. 217 “Ley General del Medio Ambiente y los Recursos Naturales”, el Estado de Nicaragua dictamina que el establecimiento y aplicación de normas para la conservación, protección, mejoramiento y restauración del medio ambiente y los recursos naturales para asegurar su uso racional y sostenible, es responsabilidad del Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales (AN, 2017). Por tanto, bajo el mandato de esta ley se establece (Decreto ejecutivo No. 21-2017) la regulación de la calidad de las aguas residuales provenientes de actividades industriales vertidas a cuerpos receptores, mediante el establecimiento de límites o rangos máximos permisibles de vertidos. Esta regulación se aplica a toda persona que en el desarrollo de sus actividades transporten o viertan aguas residuales a cuerpos receptores, prohibiendo además el vertido cuando este altere la calidad y los diferentes usos de las aguas del cuerpo receptor.

El Decreto Ejecutivo No. 21-2017 “Reglamento en el que se establecen las disposiciones para el vertido de aguas residuales”, en su Artículo 13 no da lugar al cumplimiento de los límites o rangos máximos permisibles cuando las aguas residuales han sido diluidas. En el caso de vertidos de aguas residuales provenientes de la industria minera metálica, estos rangos y valores máximos permisibles (Artículo 55) incluyen parámetros como sólidos, pH, y elementos metálicos como el

Cobre, Cromo, Níquel, Zinc, Cadmio, Plomo, Aluminio, Bario, Manganeso, Plata, Hierro, Arsénico, así como Metil mercurio, Cianuro total y Cianuro libre, cuyos valores máximos permisibles varían entre 0,005 y 1,0 mg/L.

Adicional a las exigencias de calidad de los vertidos de la industria metálica, el Decreto Ejecutivo No. 21-2017 establece en su Artículo 70 que el plan de monitoreo de los vertidos debe incorporar sitios de muestreo aguas arriba y aguas abajo del sitio de vertido, cuando el cuerpo receptor son aguas con caudal permanente. En el caso de cuerpos de aguas superficiales sin flujo como lagos, humedales o embalses, el monitoreo debe ser realizado en el sitio de descarga.

De acuerdo a las exigencias para el cuidado ambiental, las instituciones de gobierno promueven a través de las empresas mineras, el desarrollo de capacidades en la MAPE enfocadas a una minería comunitaria responsable. Sumado a este esfuerzo, el sector minero promueve, a través de ferias nacionales, las buenas prácticas y la implementación de nuevas tecnologías para la sostenibilidad ambiental. Bajo estas exigencias, el sector de la minería metálica industrial cuenta con: Programas de monitoreo de la calidad de las aguas, Programas de reforestación y biodiversidad, Programas de manejo de residuos sólidos (reciclaje, confinamiento, transformación y aprovechamiento) y Programas de capacitaciones sobre el cuidado ambiental y protección de la salud. Todas estas acciones son de carácter participativo comunitario, incluyendo el monitoreo de las aguas.

Nicaragua también cuenta con una Ley General de Agua Nacionales; la Ley No. 620 (AN, 2007). En su Artículo 102 del Capítulo II, esta ley mandata el requerimiento de permiso, por parte de la Autoridad Nacional del Agua, a personas naturales o jurídicas, públicas o privadas, para el vertido de las aguas residuales en cuerpos receptores. Además, les exige en su Artículo 104, el tratamiento previo de las aguas residuales para su disposición en el cuerpo receptor. Adicionalmente, en su Artículo 60, obliga a los titulares del derecho de uso de aguas a la prevención y control de la contaminación y del agotamiento de este recurso.

Para hacer cumplir las exigencias por parte de la entidad regulada, el Decreto Ejecutivo No. 21-2017 hace referencia en su Artículo 72 “Sanciones Administrativas”, a las infracciones, las cuales son sancionadas conforme a lo establecido en la Ley No. 217 Ley General del Medio Ambiente y los Recursos Naturales, su reglamento y reformas. En el Título V de la Ley se declara las competencias, acciones, responsabilidad civil, y sanciones aplicables en materia administrativa y judicial.

La Ley No. 953 “Ley creadora de la Empresa Nicaragüense de Minas (ENIMINAS)” (AN, 2017) establece que el proceder de ENIMINAS debe ser bajo las disposiciones de la Ley No. 387. En su Artículo 5 “Objeto y funciones”, la ley promueve a través el ordenamiento de la pequeña minería, la erradicación del mercurio en la minería artesanal y las buenas prácticas ambientales. Con esta ley, el Estado promueve el aprovechamiento de los minerales en alianza con la minería metálica industrial, el gobierno local y la minería artesanal, creando las condiciones para el desarrollo sostenible de la MAPE.

Son herramientas bajo las cuales debe regirse la actividad del manejo de desechos en el sector minero: Norma Obligatoria Nicaragüense para el Manejo Ambiental de Aceites Lubricantes usados (NTON 05032-10. 2010-2012) (MED/CNNTC, 2012) y la Norma Técnica para el Manejo

y Eliminación de Residuos Sólidos Peligrosos (NTON 05015-02. 2001-2002) (MED/CNNTC, 2002).

Otra herramienta para velar por el cumplimiento de normas, regulaciones y otras exigencias ambientales que aplican al sector minero, es el Decreto No. 68-2001 “Creación de Unidades de Gestión Ambiental (UGA)”. Las UGAs tienen como objeto velar por el cumplimiento de normas, regulaciones y otras prácticas ambientales en los programas, proyectos y actividades de la institución, y monitorear la ejecución de la política ambiental en su ámbito (AN, 2001).

La regulación ambiental ha llevado obligatoriamente a monitorear la calidad de las aguas con incidencia de la minería metálica y ha promovido la acreditación de laboratorios de ensayos en el país para el diagnóstico de la calidad de las aguas.

Tratamiento

El manejo de los desechos mineros generados por la minería artesanal en Nicaragua ha sido a través de la implementación de pilas de sedimentación, las cuales retienen el material sólido presente en el efluente (colas) minero, evitando de esta forma que este material que contiene Hg no llegue a las corrientes de agua superficiales. Sin embargo, la fracción líquida de las colas mineras retornan a las aguas superficiales en forma de escorrentías. En el manejo de los desechos, el material sólido retenido en las pilas es removido y depositado en áreas específicas a la espera de su aprovechamiento. Este aprovechamiento consiste en extraer al máximo las partículas de oro remanente, sometiendo nuevamente el material sólido de las colas mineras al proceso de extracción.

Basadas en experiencias de otras regiones del mundo (Appel & Esbensen, 2019), en Nicaragua se han llevado a cabo algunas iniciativas para la remoción del Hg remanente en los desechos mineros de la MAPE (Esbensen & Appel, 2017) (Appel & Esbensen, 2019). Sin embargo, estas iniciativas han sido a nivel de ensayos. La implementación de estas tecnologías, como la Mercury Recovery Plant (MRP) y la Peter Plates (PP) (Appel & Esbensen, 2019), no ha sido una realidad en el país. Esto probablemente se deba a los costos de inversión y/o a la eficiencia (< 57%) en la remoción de mercurio, la cual está en dependencia de las características del material procesado. Alternativas para mejorar los procedimientos para extraer el oro y consecuentemente reducir las emisiones de mercurio, basado en experiencias de otras regiones del mundo, han sido publicadas (UNEP, 2012) (Veiga, y otros, 2006); no obstante, su aprovechamiento aún no es una realidad en la MAPE.

Las afectaciones generadas por la minería metálica a los cuerpos de aguas superficiales son obviamente: la presencia de metales tóxicos, la sedimentación que generan las colas mineras y/o la lixiviación de los suelos contaminados que se acentúa durante el período de precipitaciones. Probablemente no existen en el país sistemas para el tratamiento de estas aguas contaminadas. En el caso de la minería industrial del oro, este sector cuenta con programas para el manejo de sus residuos que generalmente están clasificados como peligrosos y no peligrosos. Los residuos peligrosos son aquellos materiales y sustancias (Cianuro) y sales (Borato de Sodio, Amonio y Carbonato de Sodio) procedentes del proceso industrial y cuya disposición final son respectivamente las lagunas de oxidación y la fundición. Entre estas sustancias también está el Ácido Nítrico, cuyo destino es la incineración. Existen otros residuos peligrosos que no proceden

del proceso de extracción pero que son generados por la actividad minera, entre los cuales están: aceites usados, hidrocarburos, alquitrán, baterías, los cuales son enviados a empresas especializadas en el tratamiento de residuos y que han sido autorizadas por el Ministerio del Ambiente (Vanegas, 2016).

La información aquí presentada no aborda el tratamiento de las aguas con incidencia de la minería del oro en el país. Esto obedece a que, probablemente, aún no existen sistemas de tratamiento para las aguas con incidencia de la minería del oro, cuyas afectaciones se exponen detalladamente en la literatura citada en países de la región, incluyendo Nicaragua.

Conclusiones y recomendaciones

La presencia de mercurio y de otras sustancias en las aguas superficiales seguirá siendo una realidad no deseada en las áreas mineras, hasta que estas sustancias tóxicas dejen de ser empleadas por la minería del oro y/o tecnologías ambientalmente viables sean implementadas.

La contaminación ambiental por mercurio debe ser atribuida no solo a su uso por las MAPE, sino que también al manejo inadecuado o falta de manejo de los residuos generados por esta actividad.

A pesar de la fortaleza del marco jurídico existente y su aplicación para la protección ambiental, la contaminación de las aguas sigue siendo una preocupación y un costo asociado al beneficio económico generado por el sector minero del país. De ahí las exigencias al sector minero por parte de los ministerios de gobierno, para el cumplimiento con la legislación ambiental con el fin de proteger las aguas y del ambiente en general.

Recomendaciones

- Las MAPE deben ser asistidas técnica y económicamente para la implementación de sistemas eficientes para el tratamiento de sus residuos u optimizar los sistemas existentes, lo cual ayudaría a disminuir la contaminación ambiental.
- Monitorear la calidad de las aguas y suelos con incidencia de la minería metálica y exponer frecuentemente los resultados al sector minero para promover el control y manejo eficiente de los residuos.
- Hoy en día, el mercado informal existente en la región sigue suministrando el mercurio a la MAPE en el país; por tanto, es necesario consolidar un esfuerzo en común con el resto de países de la región para controlar y eliminar esta actividad ilícita.

Referencias

ACAFREMIN. (2019). *ACAFREMIN. Pequeña Minería y Minería Artesanal en Centroamérica*. Recuperado el 03 de 05 de 2022, de <https://www.acafremin.org/es/noticias-regionales/393-pequena-mineria-y-mineria-artesanal-en-centromerica>

AMAP/UNEP. (2013). *Technical Background Report for the Global Mercury Assessment 2013, Arctic Monitoring and Assessment Programme*. Geneva: UNEP Chemicals Branch.

AMAP/UNEP. (2019). *Technical Background Report for the Global Mercury Assessment 2018. Arctic Monitoring and Assessment Programme*. Geneva: UN Environment Programme, Chemicals and Health Branch.

AN. (1958). Asamblea Nacional. Decreto N° 316-1958. Ley General sobre la Explotación de las Riquezas Naturales. La Gaceta Diario Oficial No. 83 del 17-04-1958. Managua, Nicaragua.

AN. (1987). Asamblea Nacional. Constitución Política de la República de Nicaragua. La Gaceta, Diario Oficial No. 05 del 09-01-1987. Managua, Nicaragua.

AN. (2001). Asamblea Nacional. Decreto No. 68-2001 “Creación de Unidades de Gestión Ambiental”. La Gaceta, Diario Oficial N°. 144 del 31-07-2001. Managua, Nicaragua.

AN. (2001). Asamblea Nacional. Ley 387-2001 “Ley Especial sobre Exploración y Explotación de Minas”. La Gaceta, Diario Oficial No. 151 del 13-08-2001. Managua, Nicaragua.

AN. (2007). Asamblea Nacional. Ley No. 620 “Ley General de Agua Nacionales”, La Gaceta Diario Oficial No.169 del 04-09-2007. Managua, Nicaragua.

AN. (2017). Asamblea Nacional. La ley No. 953 “Ley creadora de la Empresa Nicaragüense de Minas (ENIMINAS). La Gaceta, Diario Oficial, No. 127 del 06-07-2017. Managua, Nicaragua.

AN. (2017). Asamblea Nacional. Ley No. 217 “Ley General del Medio Ambiente y los Recursos Naturales”. La Gaceta, Diario Oficial N°. 229 del 30-11-2017. Managua, Nicaragua.

Appel, P. W., & Esbensen, K. H. (2019). Reducing global mercury pollution with simultaneous gold recovery from small-scale mining tailings. *TOS Forum*, 9, 3-9.

Castellón, N. M. (2021). *Análisis de la Actividad Minera en Nicaragua 2015-2020*. Managua: Cámara Minera de Nicaragua (CAMINIC).

Cuadra, S., Lundh, T., & Jakobsson, K. (Noviembre de 2009). Paraoccupational and Environmental Mercury Exposure due to Small Scale Gold Mining in Central Nicaragua: A Cross-Sectional Assessment of Blood Mercury Levels in Children and Women. *Epidemiology*, 20(6), S227.

El Pulso. (2017). Recuperado el 13 de 04 de 2022, de El Pulso. En alza producción de oro en Nicaragua: <https://elpulso.hn/wp-content/uploads/2017/08/nicaragua-main-gold-mines-and-projects.png>

Esbensen, K. H., & Appel, P. W. (2017). Barefoot sampling in San Juan de Limay, Nicaragua: remediation of mercury pollution from small scale gold mining tailings. *TOS Forum*, 17, 30-35.

FUNIDES. (2016). *Impacto Económico y Social de la Minería en Nicaragua*. Cámara Minera de Nicaragua (CAMINIC), Consejo Superior de la Empresa Privada (COSEP), Fundación Nicaragüense para el Desarrollo. Managua.

GRUN. (2021). *Plan Nacional de Lucha contra la Pobreza y para el Desarrollo Humano 2022-2026. Gobierno de Reconciliación y Unidad Nacional*. Managua: Gobierno de Reconciliación y Unidad Nacional.

McKinley, A. (2013). *The Myths and Reality of Gold Mining in Central America*. El Salvador: Caritas.

MED/CNNTC. (2002). Comisión Nacional de Normalización Técnica y Calidad, Ministerio de Economía y Desarrollo. NTON 05015-02. 2001-2002. Norma Técnica para el manejo y eliminación de residuos sólidos peligrosos.

MED/CNNTC. (2012). Comisión Nacional de Normalización Técnica y Calidad, Ministerio de Economía y Desarrollo. NTON 05032-10. 2010-2012. Norma Obligatoria Nicaragüense para el Manejo Ambiental de Aceites Lubricantes usados.

Nolasco, S. (2011). *Impacto de la Minería Metálica en Centroamérica*. . Observatorio de Conflictos Mineros de América Latina (OCMAL).

Picado, F. (2004). *Mercury in the environment and the gold mining activity in the St Domingo district, Chontales-Nicaragua (Introductory paper no 157)*. Lund: Department of Ecology Chemical Ecology and Ecotoxicology. Lund University.

Picado, F., & Bengtsson, G. (2012). Temporal and spatial distribution of waterborne mercury in a gold miner's river. *Journal of Environmental Monitoring*, 14, 2746-2754.

Picado, F., Mendoza, A., Cuadra, S., Barmen, G., Jakobsson, K., & Bengtsson, G. (2010). Ecological, Groundwater, and Human Health Risk Assessment in a Mining Region of Nicaragua. *Risk Analysis*, 30(6).

Roberts, R. J., & Earl, I. M. (1957). Mineral Deposits of Central America. *Geological Survey Bolletín*, 1034.

Saunders, J. E., Jastrzemski, B. G., Buckey, J. C., Enriquez, D., Mackenzie, T. A., & Karagas, M. R. (2013). Hearing Loss and Heavy Metal Toxicity in a Nicaragua Mining Community: Audiological Results and Case Reports. *Audiology & Neurotology*, 18, 101-113.

Sequeira-León, Y., Luna-Avilés, I., & Huete-Peréz, J. (2011). Mercury Pollution in La Libertad, a Gold Mining Town in Central Nicaragua. Uncontrolled Mining, Economic Crisis, and Climate Effects—A Dangerous Mixture. *Epidemiology*, 22 (1), S291-S292.

Steiner, R. (2010). El Salvador—Gold, Guns, and Choice: The El Dorado gold miner, violence in Cabañas, CAFTA claims, and the national effort to ban mining. *International Union for the Conservation of Nature (IUCN)*, 1-52. Recuperado el 04 de 05 de 2022, de https://www.oasis-earth.com/_files/ugd/92a90d_6db19e634dd940ec97d1655f071ea8a6.pdf

UNEP. (2012). United Nations Environment Programme. *A Practical Guide on Reducing Mercury Use in Artisanal Small-Scale Gold Mining. Guide Produced in Conjunction with Artisanal Gold Council.*

Vanegas, R. M. (2016). Identificación y análisis de los procesos de recolección y manejo de residuos y desechos generados en diferentes áreas de trabajo en la Empresa Minera HEMCO, Bonanza, RAAN. Trabajo de Graduación, Facultad de Recursos Naturales y del Ambiente. UNA.

Veiga, M. M., Angeloci, G., Hitch, M., & Velasquez-Lopez, P. C. (2014). Processing centres in artisanal gold mining. *Journal of Cleaner Production*, 64 (2014), 535-544.

Veiga, M. M., Metcalf, S., Baker, R. F., Klein, B., Davis, G., Bamber, A., . . . Singo, P. (2006). *Manual for Training Artisanal and Small-Scale Gold Miners.* Vienna: GEF/UNDP/UNIDO Global Mercury Project.

Wickre, J. B., Folt, C. L., Sturup, S., & Karagas, M. R. (2004). Environmental Exposure and Fingernail Analysis of Arsenic and Mercury in Children and Adults in a Nicaraguan Gold Mining Community. *Archives of Environmental Health*, 59(8).

Yoshimura, A., Suemasu, K., & Veiga, M. M. (2021). Estimation of Mercury Losses and Gold Production by Artisanal and Small Scale Gold Mining (ASGM). *Journal of Sustainable Metallurgy*, 7, 1045–1059.

CAPÍTULO 7

Contaminación y tratamiento de aguas afectadas por la explotación de oro en el Perú

Aide Pacompia¹ (aideida25@gmail.com) y Julio Olivo²

¹Universidad de Piura

²Pontificia Universidad Católica del Perú

Introducción

La minería es una actividad extractiva que se desarrolla en todo el mundo; tiene un rol fundamental al ser fuente de crecimiento, sustento y desarrollo. La minería en el Perú tiene presencia desde tiempos remotos, incluso antes de la época Incaica. Tal como menciona Tumialan (2003), en la cultura Chavín de Huantar se ha evidenciado la existencia de la metalurgia más antigua que trabajó el oro mezclado con plata y cobre, por la presencia de piezas metálicas con diseños complicados cuyo proceso de fabricación debe haber incluido procesos de soldadura. En esa misma línea, culturas como Vicus, Paracas y Mochicas también dieron evidencias de su destreza en el manejo de los metales. En la época incaica, según menciona Romero (2006), los incas antes de mineros fueron metalurgistas, por las técnicas empleadas que fueron perfeccionando para el trabajo con los metales, las que estaban orientadas con fines ceremoniales más que económicos. Sin embargo, la minería como eje del sistema social y económico se inicia con la conquista española y desde allí ha formado parte de economía del país.

La riqueza mineralógica de los Andes peruanos permite pues encontrar áreas en las que los yacimientos de oro conocidos o por explorar atraen a empresas formales y especializadas en la explotación del mineral, con gran capacidad de inversión y caracterizadas por emplear tecnologías de aprovechamiento de recursos y disminución de sus impactos ambientales (en especial en el agua), además de ser susceptibles la fiscalización por parte del Estado y al control ciudadano sobre reales o supuestos daños al medio ambiente.

De la misma manera, esta atracción ha hecho que personas que inicialmente conocían muy poco de la actividad se involucren en minería y a lo largo de los años (en especial en los últimos veinte años) hayan logrado evolucionar en sus métodos de explotación y concentración, aunque ello no incida necesariamente en el mejor tratamiento compatible con el medio ambiente. Estos productores pequeños y artesanales, y sin contar a los ilegales, han tenido una tasa de crecimiento importante sobre todo en vertientes orientales de los Andes y en la selva alta, así como en áreas puntuales de las vertientes occidentales como en Piura, Ica y Arequipa principalmente; no poseen tantos reflectores fiscalizadores pues muchos en las zonas de explotación están de una forma u otra vinculados con esta economía. Al haber gran dispersión de actores en constante crecimiento y a la par con una expansión espacial de sus explotaciones, se hace difícil tener control de sus operaciones desde el Estado. Cabe señalar que este tipo de empresas está bajo el escrutinio de los gobiernos subnacionales peruanos que se caracterizan por no poseer cuadros de funcionarios suficientes para este desafío, ni herramientas ejecutivas.

En este capítulo describiremos de manera resumida el impacto económico y ambiental generado por la explotación de oro a causa de la minería formal, informal e ilegal en el Perú, y sus alternativas para el tratamiento de las mismas

Impacto económico de la minería formal

Como se ha mencionado, la minería en el Perú contribuye en gran medida a la economía del país por sus conexiones con otras actividades productivas, lo cual hace que incida en la economía local a través de actividades como la compra de insumos nacionales, mano de obra directa o indirecta por servicios tercerizados y recaudación fiscal, entre otros. En la Figura 7.1 podremos observar las interacciones del sector minero con la economía peruana.

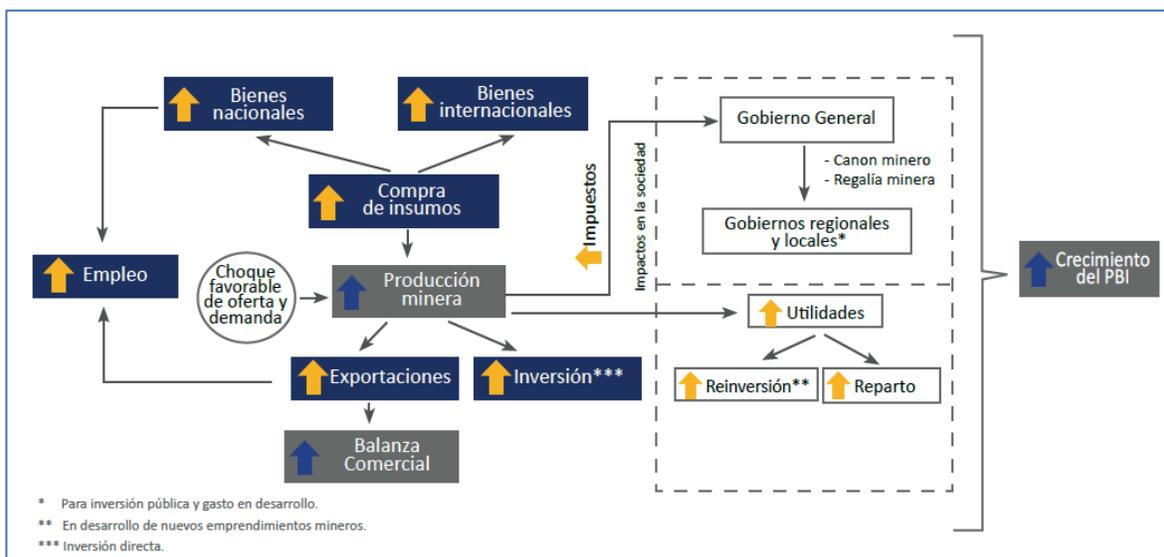


Figura 7.1. Interacciones del sector minero formal con la economía peruana. Fuente y elaboración: GPAE-OSINERGMIN.

La minería contribuye al crecimiento y desarrollo económico a nivel nacional, siendo significativa su participación en el Producto Bruto Interno (PBI), tal como se observa en la Figura 7.2, que detalla el PBI entre 2011 y 2021. Cabe mencionar que el año 2010 el PBI se contrajo a causa de las medidas sanitarias impuestas por el gobierno respecto a la paralización de las actividades productivas, incluyendo las mineras; a pesar de ello, se observa una recuperación importante debido al aumento de la demanda externa.



Figura 7.2. Evolución anual del PBI nacional y minero (%var), entre 2011 y 2021. Fuente: <https://estadisticas.bcrp.gob.pe/estadisticas/series/api/PM04923AA/grafico-> y anuario minero 2020.

En esa misma línea, es oportuno mencionar que el Perú es el segundo productor de plata, cobre y zinc a nivel mundial, y es el primer productor de oro, zinc, estaño, plomo y molibdeno en América Latina (ver tablas 7.1 y 7.2).

Tabla 7.1. Posición del Perú en el ranking mundial de producción minera. Fuente: Boletín estadístico minero enero 2022.

Producto	Latinoamérica	Mundo
Cobre	2	2
Oro	2	11
Plata	2	3
Zinc	1	2
Plomo	1	4
Estaño	1	3
Molibdeno	2	4
Arsénico	1	1
Indio	1	7
Andalucita/kyanita y minerales relacionados	1	4
Selenio	1	10

Tabla 7.2. Posición del Perú en el ranking mundial de reservas mineras. Fuente: Boletín estadístico minero enero 2022.

Producto	Latinoamérica	Mundo
Cobre	2	3
Oro	2	9
Plata	1	1
Zinc	2	5
Plomo	1	3
Estaño	3	8
Molibdeno	1	3

Dadas las ventajas competitivas del Perú y la magnitud de las inversiones asociadas a la minería, el Ministerio de Energía y Minas tiene a su cargo al Instituto Geológico Minero Metalúrgico (INGEMMET) que es un organismo público y técnico especializado cuyo objetivo es conducir el procedimiento ordinario minero (incluyendo la recepción de petitorios), el otorgamiento de concesiones mineras y su extinción según las causales fijadas por la ley, ordenando y sistematizando la información georreferenciada mediante el Catastro Minero Nacional, así como la administración y distribución del Derecho de Vigencia y Penalidad. Anualmente emite el “Mapa Metalogenético de Perú”, el cual presenta siete grandes componentes con información relacionada a aspectos geofísicos, estructurales, geocronológicos, tectono-estratigráficos, geoquímicos, así como la distribución de los depósitos minerales, tipos de mineralización, elementos commodities y el tamaño de estos por cada cuadrángulo, a través de los cuales será posible definir e identificar áreas con potencial exploratorio,

El INGEMMET a través de sus estudios en el territorio peruano ha identificado zonas metalogénicas en donde se encuentran las zonas con mayores posibilidades de encontrar concentraciones mineralógicas que permiten iniciar exploraciones en minería, así como también identificar correlaciones entre la riqueza mineral (en este caso de caso, del oro) y el asentamiento de empresas mineras, sean estas grandes o pequeñas (ver Figura 7.3).

Según el boletín del MINEM, la producción nacional aurífera al cierre de diciembre del 2021 ascendió a 96,6 TMF, siendo los principales productores las compañías mineras Poderosa, Yanacocha, Minera Aurífera Retamas, Ares, Horizonte, Shahuindo y Buenaventura (Figura 7.4).

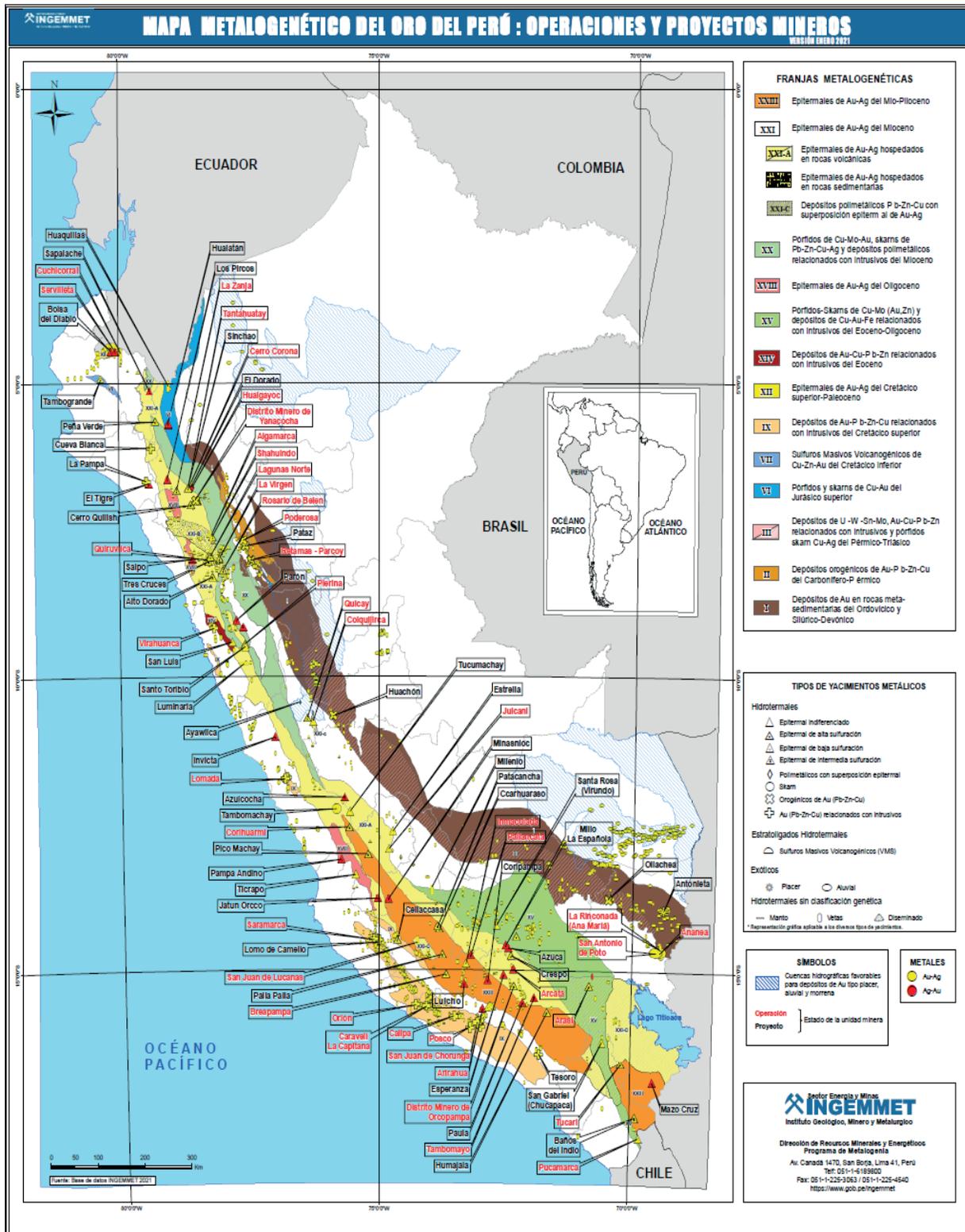


Figura 7.3. Mapa metalogénico del oro del Perú, con sus respectivas operaciones y proyectos mineros. Fuente: <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/3839#files>.

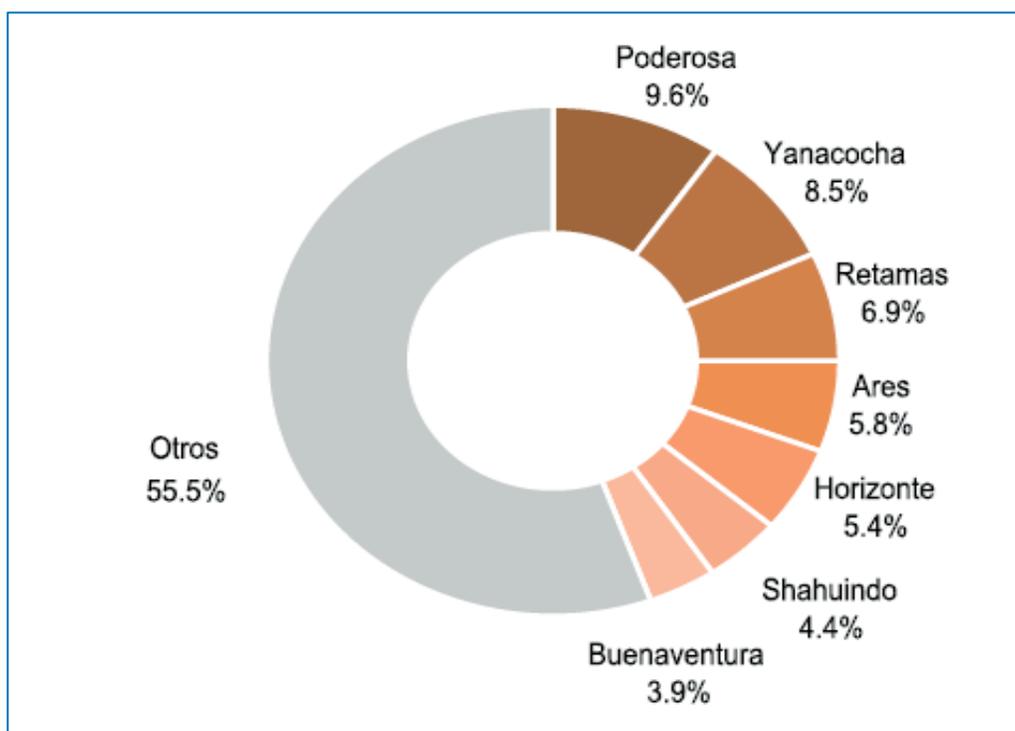


Figura 7.4. Estructura de la producción de oro por empresas, enero-diciembre. Reporte: 2020 (291 titulares mineros), 2021 (282 titulares mineros). Fuente: 2021 Boletín estadístico MINEM – edición N°12.

Empresas mineras auríferas de régimen general

En el régimen general, destaca notablemente la producción aurífera de Madre de Dios, y en segundo lugar y con diferencia, Puno. Los medios en donde se desarrolla la minería son diferentes y se replican en las otras escalas de minería. Y es que en Madre de Dios se explota en arenas aluviales y en Puno mayoritariamente en las alturas de la cordillera de Carabaya. Destacan en el primer caso de la cuenca sur del río Madre de Dios, y en el segundo, destacan Ananea y La Rinconada.

La producción de oro en las empresas mineras de régimen general (gran y mediana minería) se ha realizado utilizando métodos tales como la gravimetría y la lixiviación con cianuro. Respecto a la producción de oro utilizando la concentración gravimétrica en el lapso de 2010 a 2019 (Figura 7.5), el 93% corresponde al Departamento Madre de Dios, en comparación con las otras regiones del país tales como Cusco, Arequipa, Ica y Ancash. Asimismo, se aprecia que a partir del 2015 la producción por este método se ha reducido significativamente.

Respecto a la producción de oro por lixiviación (Figura 7.6), se ha generado en mayor porcentaje en las regiones de La Libertad, Cajamarca, Arequipa y Ancash.

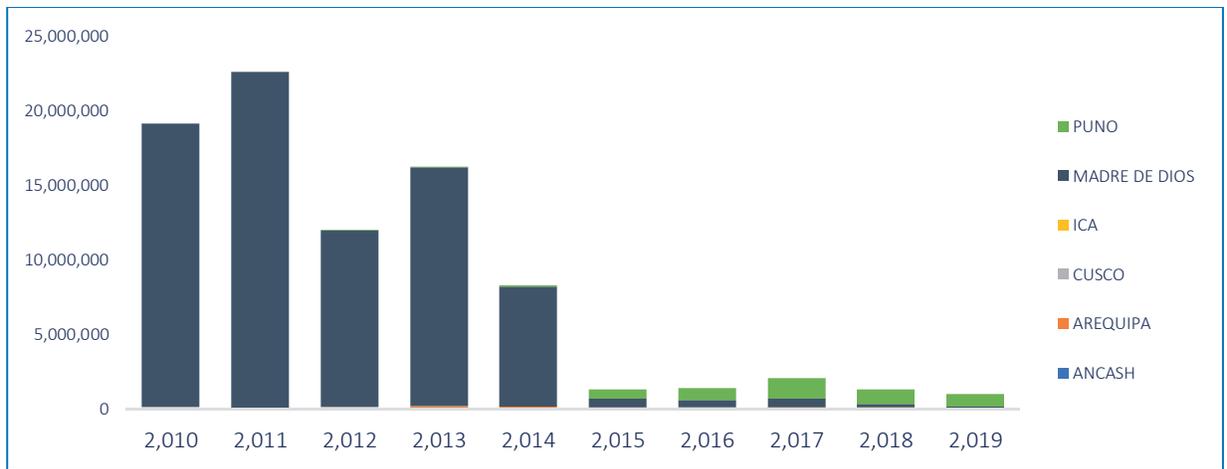


Figura 7.5. Producción nacional de oro (gr) por gravimetría, entre 2010 y 2019. Fuente: elaboración propia en base a datos obtenidos de MINEM, 2022.

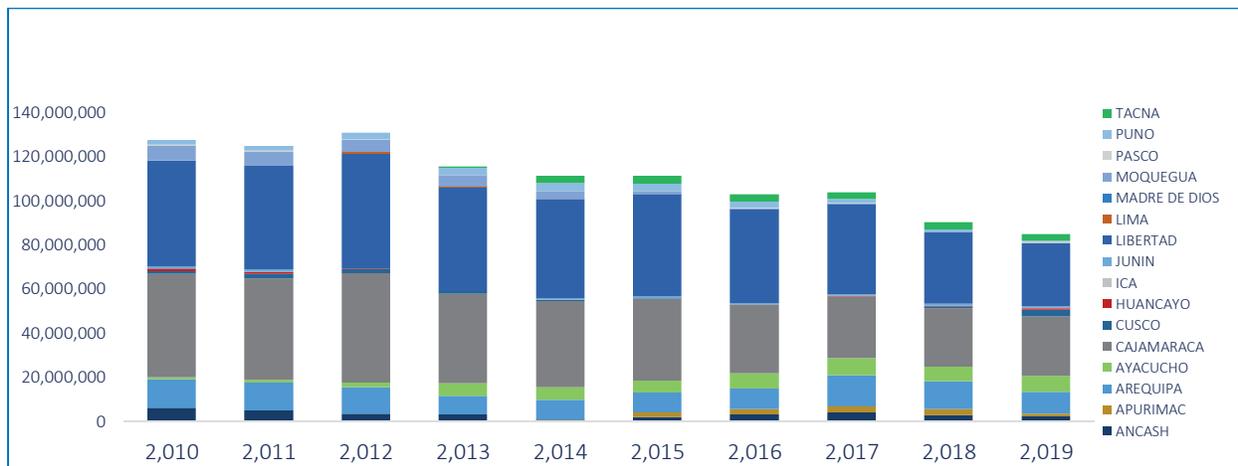


Figura 7.6. Producción nacional de oro (gr) mediante lixiviación, entre 2010 y 2019. Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de MINEM, 2022.

Empresas mineras auríferas de pequeña escala

Centrándonos en la pequeña minería, esta emplea mayoritariamente la concentración por gravimetría en operaciones en Madre de Dios y en Puno. Existe una ausencia de información en el caso de la pequeña minería de Madre de Dios entre 2014 al 2017 (Figura 7.7), pero al retomar la serie de datos, la gravimetría sigue siendo preponderante y hasta un uso en ascenso.

La producción de oro por lixivación tuvo importancia muy fuerte a inicios de la década pasada en Madre de Dios, pero registra un incremento a través del tiempo, evidenciando un posible cambio tecnológico por parte de los pequeños mineros hacia el uso del cianuro para aumentar el porcentaje de recuperación del metal. Departamentos como Arequipa, La Libertad, Ayacucho y Puno son los que muestran el mayor porcentaje de recuperación (Figura 7.8).

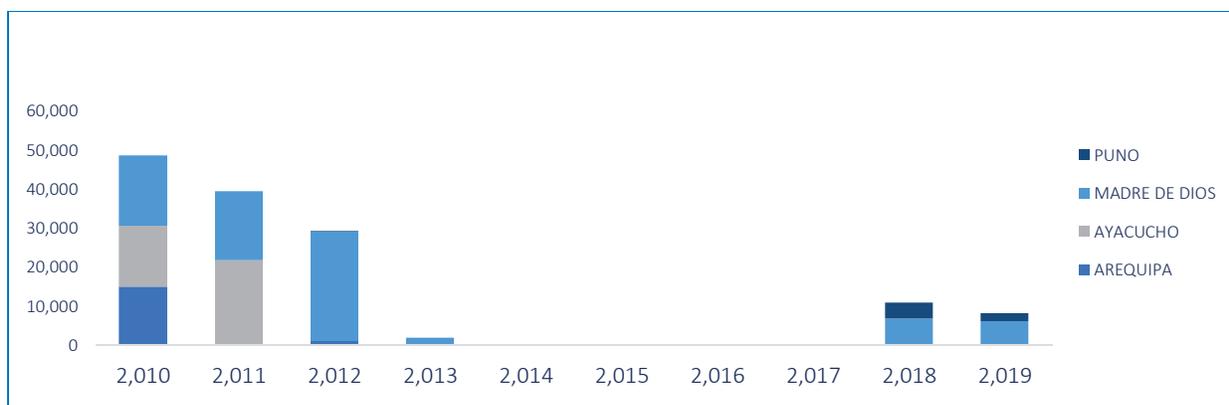


Figura 7.9. Producción nacional de oro (gr) en la minería artesanal, mediante gravimetría, entre 2010 y 2019. Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de MINEM, 2022.

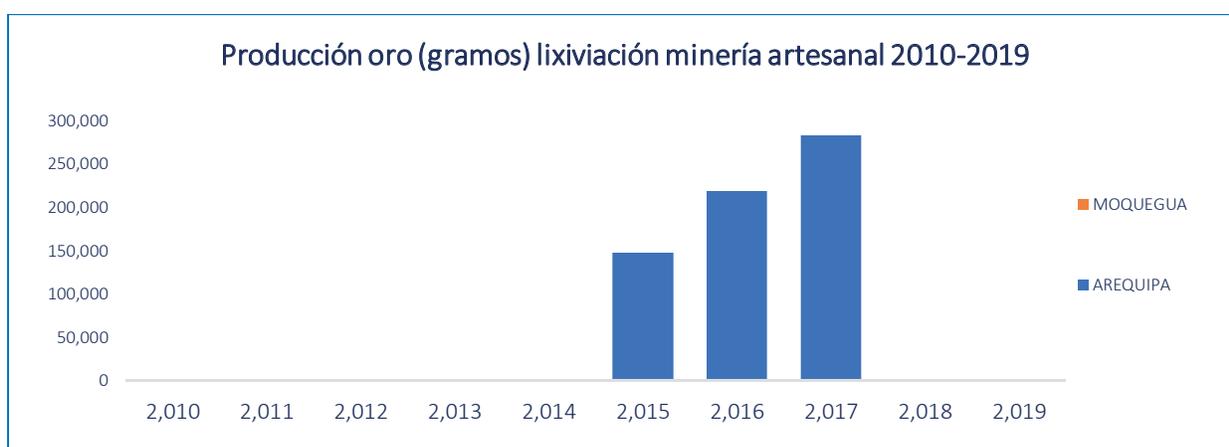


Figura 7.10. Producción nacional de oro (gr) en la minería artesanal, mediante lixiviación, entre 2010 y 2019. Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de MINEM, 2022.

Minería ilegal

Según el Decreto Legislativo N°1105 en su Artículo 2, se define a la minería ilegal como “*Actividad minera ejercida por persona, natural o jurídica, o grupo de personas organizadas para ejercer dicha actividad, usando equipo y maquinaria que no corresponde a las características de la actividad minera que desarrolla (Pequeño Productor Minero o Productor Minero Artesanal) o sin cumplir con las exigencias de las normas de carácter administrativo, técnico, social y medioambiental que rigen dichas actividades, o que se realiza en zonas en las que esté prohibido su ejercicio*”. Esta definición se califica como ilegal al desarrollo de minería en zonas prohibidas, las cuales son establecidas por el Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado (SERNANP), que es un organismo público adscrito al Ministerio del Ambiente desde mayo del 2008.

En octubre de 2013, el MINAM en su publicación “*Diálogos ambientales con la prensa*”, menciona que la minería ilegal se encuentra presente en casi todas las regiones del Perú, principalmente en las zonas de Cusco, Madre de Dios y Puno, afectando 15 reservas nacionales y siendo la Reserva Nacional de Tambopata invadida por un aproximado de 15 mil mineros ilegales.

En la Figura 7.11, elaborada por el Sistema de información Geografía del Ministerio del Ambiente (SIGMINAM), se muestran las Jurisdicciones político-administrativas del Perú con presencia de minería ilegal e informal pintadas de color rojo, siendo las más resaltantes los departamentos de Madre de Dios, Pucallpa, Amazonas y Apurímac.

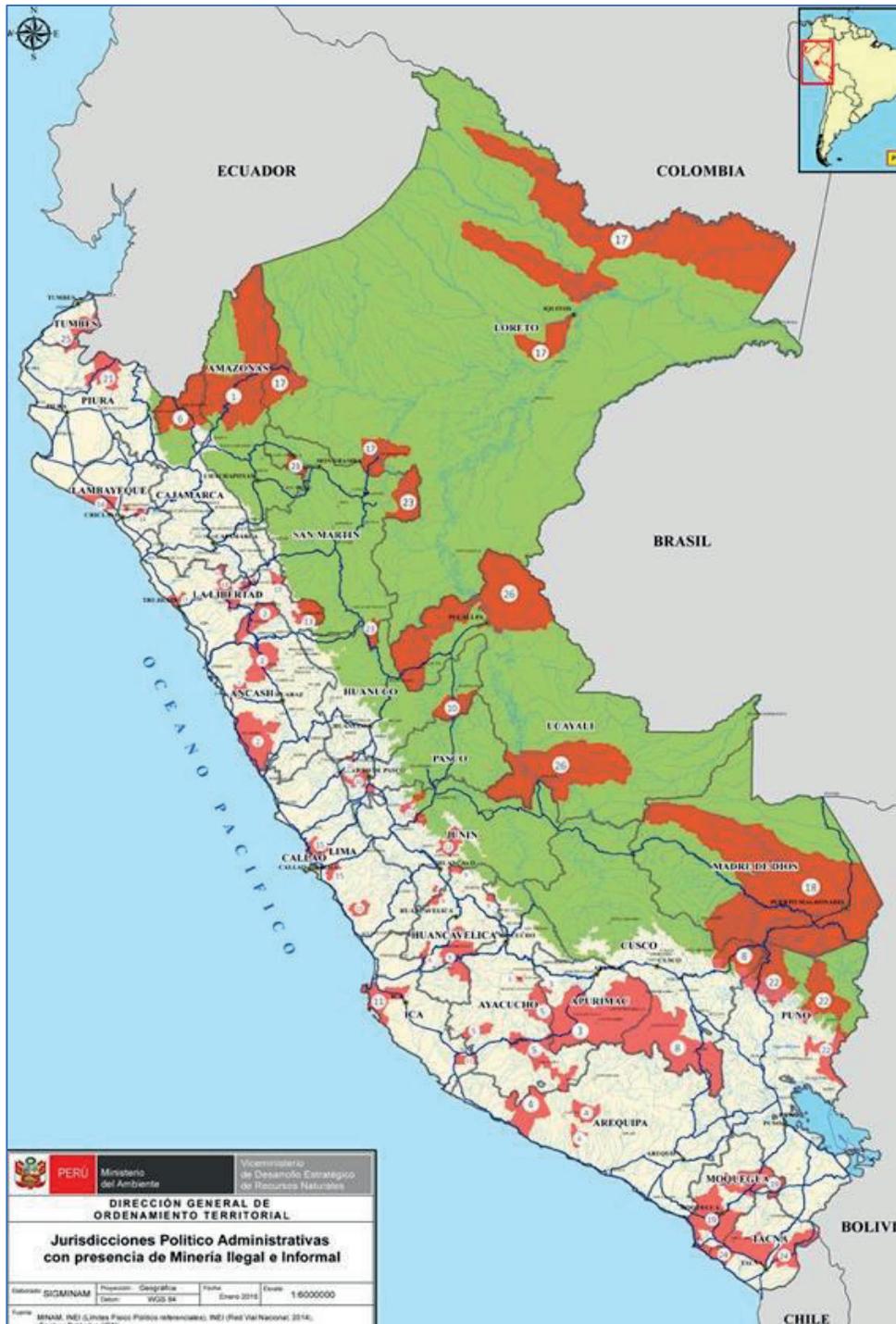


Figura 7.11. Jurisdicciones político-administrativas del Perú con presencia de minería ilegal e informal pintadas de color rojo. Fuente: <https://www.servindi.org/actualidad-noticias/02/04/2016/la-mineria-ilegal-en-la-campana>.

El incremento de la minería ilegal puede estar relacionado de manera proporcional con el aumento en la demanda del oro a nivel mundial, lo que hace que el precio a nivel internacional se eleve, como puede observarse en la Figura 7.12, notando que en el año 2000 el precio del oro se encontraba en menos de US\$300/oz, mientras que en marzo de 2021 casi supera los US\$1800/oz (ocho veces más), lo cual genera un incentivo muy fuerte para que se mantenga el desarrollo de la minería ilegal en el país.

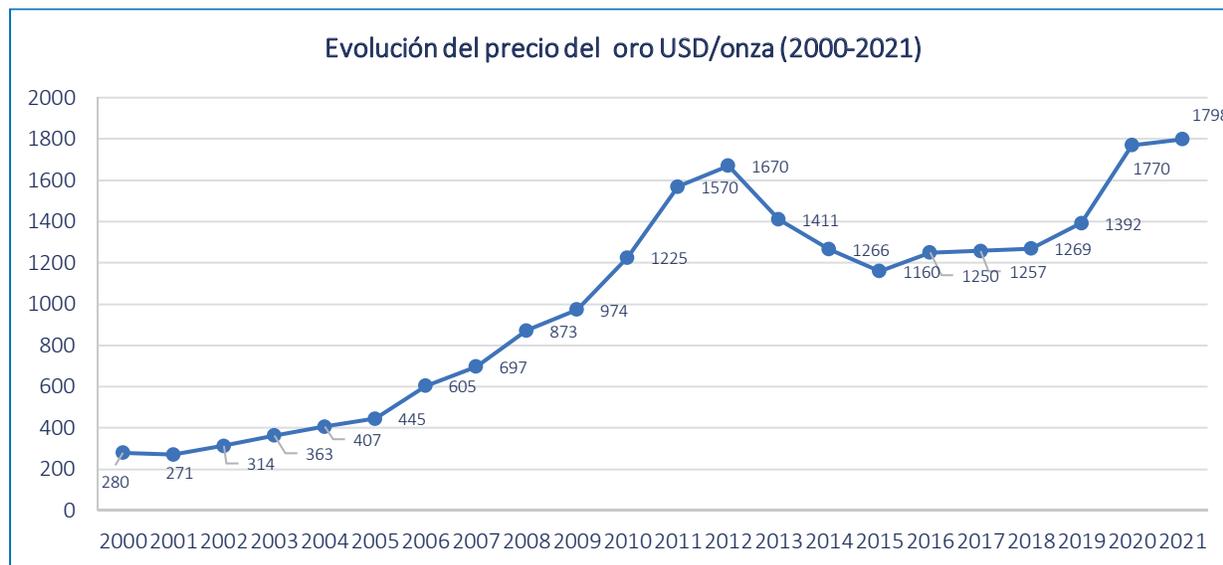


Figura 7.12. Evolución del precio del oro (US\$/oz), entre los años 2000 y 2021. Fuente: <https://estadisticas.bcrp.gov.pe/estadisticas/series/mensuales/resultados/PN01527BM/html/2000-1/2021-3/>.

Caso destacado: impacto en la calidad de recurso hídrico Paroy – La Libertad

En el norte de Perú (Departamento de La Libertad, Provincia de Patate), la minería ha sido parte de las principales actividades de esta zona desde comienzos de siglo, con la presencia de empresas formales tales como la Northern Mining Co., Compañía Minera Parcoy y Compañía Minera Buldibuyo S.A, quienes al dejar sus operaciones dieron paso al uso de las mismas por parte de sus ex-trabajadores o parte de población cercana que se han convertido en mineros artesanales, generando impactos negativos en la calidad del agua superficial en la micro cuenca de Anacardo de Parcoy. Dicha contaminación está representada por la presencia de grandes concentraciones de cargas orgánicas, drenajes ácidos, aceites, grasas, combustibles y metales pesados, además de afectar la disponibilidad y cantidad de este recurso, a través del estudio realizado por Mantari y Pinchi (2021), el cual concluyó que el 75% de la actividad minera de la zona es informal. Además, las pruebas realizadas en la calidad de agua evidencian contaminación por presencia de arsénico, plomo, cadmio, cobre, y hierro que superan los valores de los ECA de agua.

Marco normativo

El Perú dispone de gran cantidad leyes y normas orientadas a reducir y controlar los efectos de la minería en el ambiente y promover el desarrollo sostenible de su población. A continuación, presentaremos un breve resumen de las principales normas relacionadas con contaminación de aguas por efectos de la minería del oro en el país.

La Figura 7.13 ilustra una muestra de la jerarquía de la normatividad en materia de minería y protección ambiental, con énfasis en lo relacionado con los recursos hídricos. Similarmente, la Tabla 7.3 muestra de manera resumida las principales normas relacionadas con la actividad minera formal, protección de los recursos hídricos y normas para reducir la minería informal y eliminar la minería ilegal. Como se puede apreciar, el Estado peruano dispone de normas específicas para control de la actividad minera formal, normas para lograr la reducción de la minería informal y la erradicación de la minería ilegal, con el fin de reducir los impactos a la calidad del agua que estos vienen ocasionando. Se está estableciendo la prohibición de la actividad minera en zonas de amortiguamiento (reserva natural), hasta la prohibición del uso de maquinarias como las dragas o equipos similares, incluyendo el control del abastecimiento de productos químicos. Sin embargo, los resultados no han sido los esperados debido al escaso nivel de aplicación de las mismas, especialmente las relacionadas con los insumos, los cuales son adquiridos de manera ilegal.

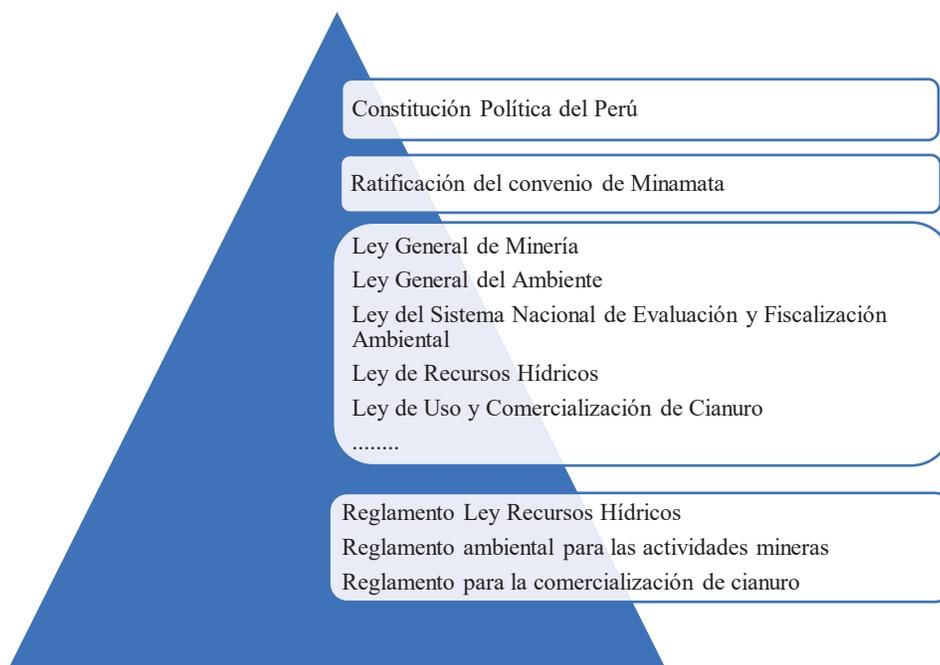


Figura 7.13. Jerarquía de la normatividad en materia de minería y protección ambiental, relacionadas con el agua. Fuente: elaboración propia.

Otro aspecto que ha obstaculizado que se cumplan estas normas según mencionan Valdez, et al. (2019) es “*la falta de preparación técnica de los gobiernos regionales*”, a quienes desde febrero del 2012 por Decreto Legislativo 1101, se les ha atribuido en el marco de la descentralización las funciones de entes fiscalizadores de la pequeña minería y minería artesanal, sin considerar la brecha existente por parte de los gobiernos locales respecto al manejo de los procesos de formalización y fiscalización de dichas actividades. Sumado a ello está la presión ejercida por los mineros informales que aliados al narcotráfico ha dificultado y paralizado la lucha contra la minería ilegal.

Tabla 7.3. Principales normas relacionadas con la actividad minera formal, protección de los recursos hídricos y normas para reducir la minería informal y eliminar la minería ilegal. Fuente: Elaboración propia.

Norma	Detalle
Constitución Política del año 1993,	En su II capítulo: Del <i>Ambiente y Los Recursos Naturales</i> (artículos del 66 al 69) menciona que los recursos naturales renovables y no renovables son patrimonio de la nación, el estado determina la política nacional del ambiente, así como promover el desarrollo sostenible con una legislación adecuada.
Ley General de Minería:	Aprobada mediante decreto Supremo N° 014-02-EM el 04/06/92, comprende lo relativo al aprovechamiento de las sustancias minerales del suelo y del subsuelo del territorio nacional, este aprovechamiento se realiza a través de la actividad empresarial del Estado, y mediante el otorgamiento de derechos para ejercer actividades de la industria minera personas naturales o jurídicas de derecho privado, nacionales o extranjeras.
Ley N° 29325, Ley del Sistema Nacional de Evaluación y Fiscalización Ambiental:	Publicada el 01/03/2009, crea el Sistema Nacional de Evaluación y Fiscalización Ambiental, a cargo del Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental - OEFA como ente rector.
Decreto Legislativo N° 1101:	Establece medidas para el fortalecimiento de la fiscalización ambiental como mecanismo de lucha contra la minería ilegal, son Entidades de Fiscalización Ambiental (EFA) los gobiernos regionales reciben la transferencia de tales funciones en el marco del proceso de descentralización, en lo relacionado a la fiscalización de las actividades de pequeña minería y minería artesanal. Asimismo, la Dirección General de Capitanías y Guardacostas del Perú (DICAPI), en lo relacionado a la autorización del uso de áreas acuáticas que sean utilizadas en el desarrollo de estas actividades en aguas navegables en los ámbitos fluvial y lacustre, en el marco de sus competencias
Ley N° 28611, ley general del ambiente:	Publicada el 13/10/2005, para la gestión ambiental en el Perú. Establece los principios y normas básicas para asegurar el efectivo ejercicio del derecho a un ambiente saludable, equilibrado y adecuado para el pleno desarrollo de la vida. En su artículo N°31 describe los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) niveles de concentración de los elementos de naturaleza física, química y biológica presentes en el aire agua o suelo que no representan riesgo significativo para la salud de las personas ni al ambiente, estos ECAs son de aplicación obligatoria para el diseño de normas legales y las políticas públicas e instrumentos ambientales.
Ley N° 29338, ley de recursos hídricos:	Publicada el 27/03/2019 regula el uso y gestión de los recursos hídricos. Comprende el agua superficial, subterránea, continental y los bienes asociados a esta. El Estado promueve y controla el aprovechamiento y conservación sostenible de los recursos hídricos previniendo la afectación de su calidad ambiental y de las condiciones naturales de su entorno, siendo la Autoridad Nacional del Agua el ente rector que establece los procedimientos para la gestión integrada, sostenible y multisectorial de los recursos hídricos. La autorización de vertimientos esta descrita en el artículo N°80 de la presente ley, mencionando que es requisito principal presentar el instrumento ambiental pertinente aprobado por la autoridad ambiental respectiva, el cual debe contemplar los siguientes aspectos: (1) Someter los residuos a los necesarios tratamientos previos; y (2) Comprobar que las condiciones del receptor permitan los procesos naturales de purificación.
Decreto Supremo N° 040-2014-EM: Reglamento de Protección y Gestión Ambiental para las Actividades de Explotación, Beneficio, Labor General, Transporte y Almacenamiento Minero	Publicado en el 2014, tiene por finalidad asegurar que las actividades mineras en el territorio nacional en el marco de la libre iniciativa privada y el aprovechamiento sostenible de los recursos naturales. Respecto a los procesos hidrometalúrgicos (lixiviación) se establece la obligación de un manejo y tratamiento de los efluentes conforme a lo dispuesto en sus estudios ambientales, presentando los reportes respectivos a la autoridad.

Ley 27651, Ley de Formalización y Promoción de la Pequeña minería y la minería artesanal	Introduce en la legislación minera un marco legal que permita regulación de las actividades mineras desarrolladas por pequeños productores mineros y mineros artesanales, propendiendo a la formalización, promoción y desarrollo de las mismas.
Ley N° 29023, Ley que regula la Comercialización y Uso de Cianuro:	El uso de cianuro debe contar con las autorizaciones de las autoridades sectoriales competentes referidas a las regulaciones de gestión ambiental vigentes.
Decreto Supremo N° 045-2013-EM Aprueban Normas Reglamentarias para la actividad minera de la Ley N° 29023	Regula la Comercialización y Uso del Cianuro, considera lineamientos desde el estudio ambiental para las instalaciones, transporte, manipulación y neutralización del cianuro.
R.LEG. N° 30352 - Resolución Legislativa que aprueba el Convenio de Minamata sobre el Mercurio.	Ratificado con Decreto Supremo N.° 061-2015-RE el 25 de noviembre de 2015. Establece la hoja de ruta respecto a la implementación de medidas sobre fuentes de suministro y comercio de mercurio, productos y procesos con mercurio, minería artesanal, emisiones y liberaciones, almacenamiento temporal de mercurio, disposición de residuos, y sitios contaminados, con el objetivo de proteger la salud humana y el ambiente por la exposición a este contaminante.
Decreto Legislativo N° 1102	Incorpora al código penal los delitos de minería ilegal, lo que había sido considerado como una actividad económica informal, pasa a ser desde ese momento un delito perseguible con hasta ocho años de cárcel. El tipo penal se encuentra incorporado en el artículo 307-A del Código Penal
Decreto Legislativo N° 1103	Establece que el mercurio, el cianuro de potasio y el cianuro de sodio se incorporan al Registro Único para el Control de Insumos Químicos y Productos Fiscalizados., es decir que se incorporan dentro de la lista de lista de insumos químicos y productos que están sujetos al registro, control y fiscalización en el territorio nacional
Decreto Legislativo N° 1105	Establece disposiciones complementarias para implementar el proceso de formalización de la actividad minera informal de la pequeña minería y de la minería artesanal, ejercida en zonas no prohibidas para la realización de dichas actividades a nivel nacional.
Decreto Legislativo N° 1106	Incorpora a la lucha contra la minería ilegal otras relaciones delictivas de carácter sistémico; es decir, delitos asociados a la minería relacionados con el lavado de activos y con el crimen organizado.
Decreto Legislativo N° 1107	Establece medidas de control y de fiscalización en la distribución, transporte y comercialización de maquinarias y equipos que puedan ser utilizados en la actividad minera ilegal, así como de los productos mineros obtenidos de dicha actividad

Tratamiento

El oro en la naturaleza puede encontrarse en estado nativo o formando aleaciones con otros minerales como la plata. Puede estar diseminado en pequeñas cantidades, en filones que tienen relación con rocas ígneas de tipo silícico, además de estar mezclado mecánicamente con sulfuros. Estas características mineralógicas determinan los requerimientos específicos de los procesos de extracción metalúrgica que serán aplicados al mismo. En el Perú, el oro se encuentra en yacimientos de llanura aluvial, yacimientos filonianos, sierras andinas y en la Amazonía (Tabla 7.4). En la Amazonía, la actividad minera informal se centra en la explotación del oro aluvial en ciertas áreas de los ríos Madre de Dios, Alto Madre de Dios, Malinowsky, Tambopata y de los

Amigos. Se explota el oro contenido en las arenas de las playas, bancos antiguos y cursos de agua desviados artificialmente.

Tabla 7.4. Tipo de mena y proceso de extracción de oro en el Perú. Fuente: Recopilación sobre la Metalurgia del oro. Antonio Ros Moreno, 2017.

Tipo de mena	Proceso de extracción
Oro libre (aluviones, eluviones, fluviones)	Concentración gravimétrica, aglomeración- cianuración de residuos
Oro combinado (teluros)	Flotación, oxidación (tostación), concentrados. Cianuración residuos
Oro asociado pirita y marcasita	Concentración gravimétrica del oro y/o sulfuros si están liberados
	Flotación-fusión de concentrados (oro en sulfuros)
Oro asociado con pirrotita	Cianuración (preaireación) y baja alcalinidad
Minerales complejos plomo-zinc (igual a minerales complejo de cobre)	Gravimetría-amalgamación (si el oro se libera por conminución)
	Conminución- cianuración directa

Los métodos de extracción y transporte del material aurífero más utilizados son:

- Maquinaria pesada: donde el mineral aurífero es removido mediante excavadora o cargador frontal para ser cargado al volquete que transporta y vierte el contenido a la tolva del chute.
- Uso de bombas de succión (dragas): el mineral aurífero y el desmonte se remueven mediante un chorro de agua a presión accionado por una motobomba. El transporte se reemplaza por la elevación del material aurífero, mezclado con el desmonte, mediante su bombeo junto con el agua que se utiliza para el lavado del material y el traslado del sedimento aurífero por la canaleta.

El proceso de amalgamación (Figura 7.14) es utilizado para separar y extraer el oro mediante la unión del oro con mercurio. Los mineros calientan la amalgama para recuperar el oro. En algunos casos realizan este procedimiento al aire libre, lo que ocasiona que todo el vapor sea inhalado por los trabajadores.

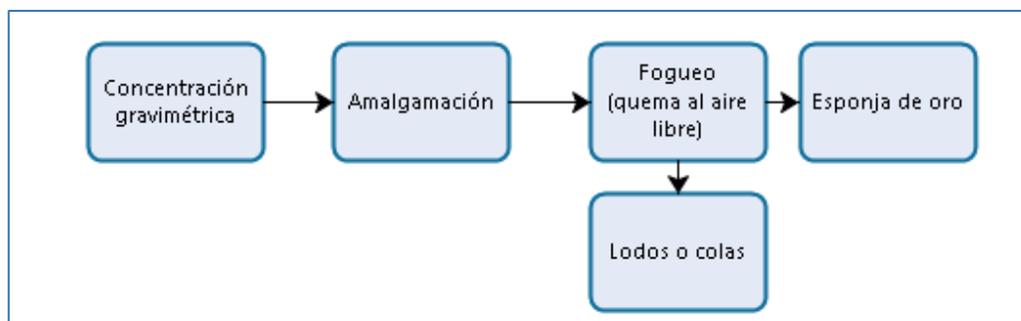


Figura 7.14. Proceso de amalgamación. Fuente: elaboración propia.

Uso de mercurio

Por su facilidad en la extracción del oro, manipulación y bajo costo, el mercurio es utilizado por los pequeños productores y mineros ilegales; pero los efectos del mismo en la salud son adversos al ingresar en el organismo por medio de los vapores de la quema de la amalgama, que generan daños a nivel neuronal. Al respecto, la reducción del uso del mercurio se busca en Perú a través de los siguientes procesos: (1) Concentración y amalgamación con recuperación del mercurio a

través de retorta y sistema de extractores; (2) Concentración y fundición directa con borax; y (3) Lixiviación con cianuro.

Uso de cianuro

Además del mercurio, el cianuro es otro de los pocos reactivos que tiene la capacidad de disolver el oro, que es uno de los metales con alta resistencia al ataque de la mayoría de los reactivos químicos. Por ello, el cianuro se utiliza en minería para extraer oro (y plata) de minerales de baja ley que no pueden tratarse fácilmente mediante procesos físicos simples (trituración o separación por gravedad). La lixiviación cianurada consigue extraer el oro de menas pobres (1-2 g por tonelada) con rendimientos que llegan al orden del 90%, resultando ser el más efectivo de todos los desarrollados hasta ahora y, por ello, el más utilizado.

Cuando se ha recuperado el oro de la solución por los distintos métodos aplicables, esta sigue conteniendo cianuro, por lo cual puede ser utilizada nuevamente para el riego de las pilas de mineral luego de un proceso de acondicionamiento (Figura 7.15).

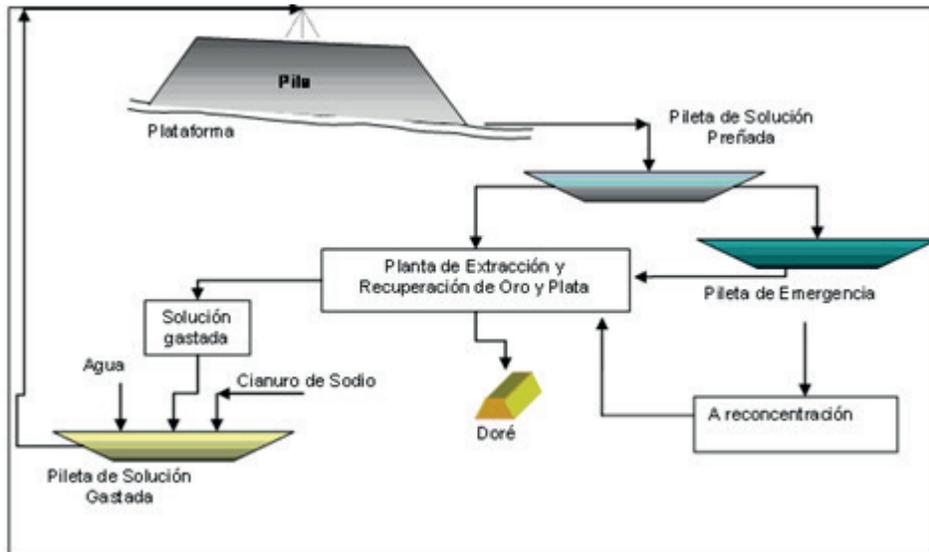


Figura 7.15. Sistema de lixiviación. Fuente: Diario Oficial de México.

Antes de ser vertida como efluente a un cuerpo receptor (cuerpo de agua), parte de la solución que no es recirculada debe ser sometida a un proceso de detoxificación, es decir, eliminación o descomposición del cianuro. La Tabla 7.5 expone algunas vías para llevar a cabo la detoxificación, mientras que más detalles del proceso de oxidación se listan en la Tabla 7.6.

Tabla 7.5. Alternativas para llevar a cabo la detoxificación de cianuro. Fuente: Elaboración propia en base a tesis de Fernández, 2007.

Categoría	Sub categoría
1. Eliminación de compuestos cianurados	a) Volatilización de HCN
	b) Biodegradación
	c) Adsorción en superficies minerales
	d) Hidrólisis
2. Formación de complejos menos tóxicos y susceptibles de precipitación	Formación de compuestos de hierro
3. Oxidación de fases cianuradas	a) Oxidación natural
	b) Oxidación con peróxido de hidrógeno
	c) Oxidación con dióxido de azufre
	d) Oxidación cloración alcalina
	e) Ozonización

Tabla 7.6. Tecnologías para la destrucción de cianuro mediante proceso de oxidación. Fuente: Elaboración propia en base a tesis de Fernández, 2007.

Tecnología	Detalle	Ventajas	Desventajas
INCO SO ₂ /aire	Conversión de los cianuros WAD a cianato usando una mezcla de SO ₂ y aire en presencia de cobre soluble el cual actúa como catalizador a un pH controlado en el rango de 8 a 9.5	Produce efluentes de cianuro y metales de bajas concentraciones	Para altos niveles de cianuro el costo de reactivo es alto
		Efectivo para tratar pulpas y soluciones	El cianuro no es recuperado
		Costos de capital y de operación comparables con otros procesos químicos	Pueden ser necesario tratamientos adicionales
Cloración alcalina	Oxidación de los cianuros libres y wad en condiciones alcalinas utilizando el cloro o hipoclorito de calcio	Equipos y controles disponibles	No puede remover el cianuro en complejos estables de hierro y cobalto
		Los metales pesados precipitan como hidróxidos	
		Disponibilidad de cloro	
		El proceso es aplicable en pulpas y en soluciones clarificadas	
Ácido de Caro	Conocido como en ácido peromonosulfúrico (H ₂ SO ₅) es un agente fuerte para desintoxicar pulpas, producido a partir de peróxido de hidrógeno y ácido sulfúrico	Cinética de la reacción es rápida y tiempo de residencia es menor	Costos operativos por reactivo pueden ser excesivos
		Los reactivos están disponibles ampliamente	Es más aplicable a pulpas que a soluciones
		Los costos de capital pueden ser menores que los tratamientos con otros químicos.	La reacción del ácido sulfúrico y el peróxido de hidrogeno para producir el ácido caro puede ser peligrosa
		Proceso relativamente simple en diseño y operación	Para alcanzar niveles bajos de cianuro WAD son necesarias cantidades mayores de ácido caro

		Puede ser usado para pulpas y soluciones clarificadas	El amoniac y el tiocianato no son removidos El cianuro no es recuperado
Proceso Peróxido de hidrógeno	El pH óptimo para remover los metales después de la destrucción es cerca de 9 a 9,5, con pH por debajo de 9 se precipitan los cianuros de Fierro, el cianato producido en la reacción puede ser hidrolizado a amoniac y bicarbonato	Costos de capital menores o iguales con otros procesos químicos	Los costos de los reactivos y el consumo de sulfato de cobre y peróxido de hidrogeno pueden ser altos
		El proceso es relativamente simple en diseño y operación	Altas concentraciones de cianatos pueden ser producidas y potencialmente se puede incrementar la concentración de amoniac
		Todas las formas de cianuro incluidos el cianuro de fierro puede ser removidos a través de la oxidación y precipitación.	El proceso no remueve amoniac y tiocianato
		Los metales pesados son reducidos significativamente mediante la precipitación	Un tratamiento adicional puede ser requerido si las concentraciones de amoniac y tiocianato o metales exceden los límites ambientales aceptables
		El proceso no produce grandes cantidades de lodos	El proceso no es generalmente adecuado para pulpas
		El control de pH cercano no es requerido	
Ozono	Oxidación de cianuros, contenidos en una solución a dióxido de carbono y nitrógeno mediante aplicación de ozono reduciendo el uso de reactivos químicos, así como de producción de residuos químicos tóxicos	Adicionalmente, el ozono oxida fenoles y cromóforos, y los transforma en productos no tóxicos e incoloros	Por su inestabilidad, el ozono se debe genera in situ.
			Dificultad para el manipuleo y control del dosaje.

Conclusiones y recomendaciones

La actividad minera constituye una pieza fundamental para la economía del Perú, por lo que existe la necesidad de mantener su desarrollo, pero bajo un control exhaustivo por parte de las autoridades y de la ciudadanía.

La formalidad de la minería muestra diferencias significativas. Por un lado, se tiene a la minería formal que cuenta con aportes significativos al PBI nacional que, además de estar sujeta a controles normativos para su ejecución, debe cumplir con estándares de calidad ambiental para la emisión de sus efluentes. Debe obtener certificaciones ambientales para el inicio de sus proyectos y ser susceptibles de paralizaciones por los organismos reguladores como el OEFA. En el caso de la producción minera de oro, la minería formal aplica el proceso de lixiviación mediante el riego de solución cianurada, solución que funciona en un ciclo de recirculación; es decir, una vez recuperado el oro, la misma vuelve a ser regada de manera que la cantidad de efluente que se vierte es mucho menor.

Escenario contrario es el caso de la minería informal e ilegal, quienes no solo no tributan al Estado por su producción, sino que además no invierten en la recuperación eficiente del oro y menos en el tratamiento de los efluentes con contenido de mercurio y cianuro. La existencia de economía ilegal en alza por precio del oro, que se convierte en un negocio rentable que induce a actos de corrupción a las autoridades.

Uno de los mecanismos de tratamiento para la destrucción del cianuro más asequible en Perú es la oxidación mediante la aplicación del peróxido de hidrógeno por los costos del insumo e instalaciones para su aplicación, así como la manipulación del mismo. Por otro lado, el uso del mercurio como insumo para la recuperación del oro no es eficiente (en comparación con el cianuro), por lo que los productores ilegales están utilizando el cianuro para recuperar el oro que queda en las colas luego de aplicar el mercurio, lo cual genera la formación de cianatos de mercurio que afectaran al medio ambiente y a la población.

Recomendaciones

- El Estado debe continuar con el objetivo de reducir la minería informal, potenciando a los gobiernos locales con herramientas tecnológicas para la comunicación y administración de los procesos de formalización. Asimismo, debe priorizar puntos críticos de este proceso respecto a las zonas con mayor presencia de minería ilegal, como es el caso de Madre de Dios en la zona “La Pampa”, a través de operativos con apoyo del gobierno central.
- Establecer estrategias especiales y localizadas para ejecutar controles y monitoreos en las zonas más conocidas de extracción de oro de mineros artesanales en el Perú.
- El Estado debe evaluar flexibilizar las normas relacionadas con la adquisición y comercialización del cianuro y restringir el acceso al mercurio, a fin de lograr la reducción de su consumo por parte de la pequeña minería y minería artesanal, pues el mercurio tiene un mayor nivel de toxicidad que el cianuro por ser un elemento que puede bioacumularse en las plantas, peces y animales, afectando además al sistema nervioso de los seres humanos.

Referencias

- Fernández Pérez, B. (2007). Desarrollo de un nuevo método para la eliminación de cianuro de aguas residuales de mina.
- Valdés, R., Iglesias, C. B., & Vera, D. (2019). La minería no formal en el Perú: Realidades, tendencias y¿ soluciones?. Capital Humano y Social Alternativo.
- Ministerio del Ambiente- (2016)- Informes Sectoriales- “La Lucha por la legalidad en la actividad minera”
- Ministerio del Ambiente., (2017). “Manual de buenas prácticas en Minería Aurífera Aluvial” para facilitar una adecuada recuperación de áreas-Programa Contribución a las Metas Ambientales del Perú (ProAmbiente)
- Cabanillas Vásquez, F. (2016). Manual de buenas prácticas en minería aurífera aluvial para facilitar una adecuada recuperación de áreas.

Alcides Edgar Mantari- 2021- Revista Ciencia y Tecnología- “Influencia de la Minería Artesanal e Informal en la Calidad del Recurso Hídrico de Parcoy, La Libertad”

Ministerio de energía y Minas- 2021- edición N°12- “Boletín estadístico minero”

Ministerio de energía y minas – 2021 Producción minera anual (En: https://www.minem.gob.pe/_estadistica.php?idSector=1&idEstadistica=12501. Recuperado el 14/04/2022)

Ministerio del Ambiente., (2013). “Diálogos Ambientales con la Prensa- Minería Ilegal”

Programa de las Naciones Unidas para el Medioambiente, (2012). Guía Práctica – Reducción del uso del Mercurio en la minería de oro artesanal y de pequeña escala”

Sociedad Nacional de Minería Petróleo y Energía, (2020). Reporte estadístico minero energético-<https://www.snmpe.org.pe/informes-y-publicaciones/reporte-estadistico-mineroenergetico/7141-ano-2020-fecha-de-publicacion-noviembre-2021.html>

Sociedad Nacional de Minería Petróleo y Energía (2021). Efecto de la minería sobre el empleo, el producto y recaudación en el Perú-<https://www.snmpe.org.pe/informes-y-publicaciones/efecto-de-la-mineria-sobre-el-empleo-el-producto-y-recaudacion-en-el-peru/259-efecto-de-la-mineria-sobre-el-empleo-el-producto-y-recaudacion-en-el-peru-libro.html>

Rinconada el oro más difícil <https://www.youtube.com/watch?v=isEx7fJ9gHI>

OSINERGMIN, (2017) primera edición - La Industria de la Minería en el Perú: <https://issuu.com/osinergmin/docs/osinergmin-industria-mineria-peru-2/76>

CAPÍTULO 8

Contaminación y tratamiento de aguas afectadas por la explotación de oro en Venezuela

José Rafael Lozada¹ (jolozada61@gmail.com)

¹Instituto de Investigaciones para el Desarrollo Forestal. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.

Introducción

El aprovechamiento del oro en Venezuela se realiza desde la época pre-colombina. Existe una leyenda (Perera, 2000) sobre un marinero llamado Iones Martínez que, en 1532, fue abandonado por castigo en un lugar cercano a la desembocadura del Río Orinoco; lo auxiliaron unos indígenas y lo llevaron a una ciudad llamada Manoa, ubicada en las orillas de un lago Parima. Martínez logró salir de ese lugar y comentó que allí existían adornos de oro en las casas, templos, vestidos, armaduras y escudos de guerra; también había una ceremonia donde el cacique se cubría todo el cuerpo con polvo de oro (Ocampo, 2004). La posible ubicación del Lago Parima se indica en un mapa elaborado en 1625 por el cartógrafo holandés Hessel Gerritsz (Figura 8.1); en la época moderna ese lago nunca ha sido encontrado, ni en Venezuela ni en los países vecinos (Guyana, Surinam, Brasil).

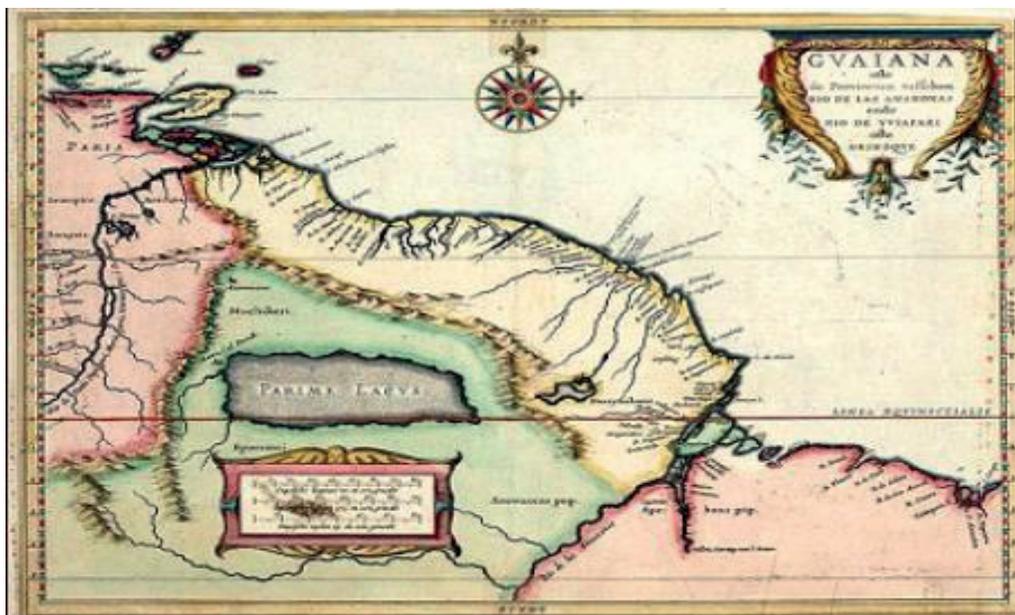


Figura 8.1. Mapa de Guayana según Gerritsz. Fuente: <http://www.geheugenvanederland.nl>.

La explotación comercial del oro comenzó en 1842 en El Callao, cuando un brasileño llamado Pedro Joaquín Ayres encontró ese mineral en las orillas del río Yuruari; en 1852 se descubrieron filones cuarzosos en Caratal y en 1860 aparecieron las primeras empresas que usaron maquinaria para triturar la roca (Murguey, 1989).

La mayor parte de las explotaciones de oro se han ejecutado en la Guayana Venezolana. Muy aisladamente ocurre en otras regiones; por ejemplo, en 2018 se reportó una explotación ilegal en varios sitios del Estado Carabobo (región centro-norte), en donde se hicieron operativos para desalojar a unos 3000 mineros (Gutiérrez, 2018) y no se han encontrado evidencias cartográficas de que esa actividad continúe.

Tipos de minería ejecutados en Venezuela y sus impactos ambientales

Desde el siglo XX hasta el presente, la explotación de oro ha ido aumentando, mediante los métodos que se indican a continuación con sus respectivos impactos ambientales más significativos (Lozada, 2017):

- *Minería Artesanal*: utiliza la fuerza humana para desprender el material aurífero, con la ayuda de herramientas sencillas (palas y picos). Ha sido ejecutada desde tiempos ancestrales por las comunidades indígenas y hoy en día la desarrollan criollos que van a la selva a explorar territorios en búsqueda del oro (Figura 8.2).



Figura 8.2. Minería artesanal. Fuente: Propia.

- *Monitores Hidráulicos*: utilizan agua a presión para romper el suelo y extraer los aluviones auríferos, por ello su actividad depende de la existencia de ríos cercanos. Cada equipo consta de una motobomba que proyecta un chorro de agua (Figura 8.3) y otra que succiona el material desprendido y lo transporta al “tame”. En este proceso se agrega mercurio, el cual forma una amalgama con el oro. El “tame” es una especie de canal abierto, inclinado, donde pasa el material fluido con el fin de que las partículas de oro y de mercurio queden atrapadas en una alfombra tipo grama artificial. Una vez a la semana se detiene toda la

actividad, se lavan las alfombras, se recupera el oro y el mercurio. La amalgama se coloca en una superficie de metal y se le aplica calor para que se evapore el mercurio; toda esta última fase se denomina “resumen” (Figura 8.4). Los principales impactos ambientales son: fragmentación de los bosques, destrucción extensiva de la vegetación, hábitat, fauna, suelos y topografía de los ríos, y contaminación del agua con sedimentos y con mercurio.



Figura 8.3. Minería con monitores hidráulicos. Fuente: Propia.

- *Balsas Mineras*: son estructuras flotantes con las cuales se extraen sedimentos auríferos del fondo de los ríos, mediante succión con una motobomba. El extremo de la manguera es dirigido por un buzo que camina en el fondo del río, ayudado por cinturones con plomo. En la balsa existe una especie de “tame”, donde se agrega mercurio de manera similar a lo descrito en el punto anterior (Figura 8.5). Los principales impactos ambientales son: alteración de la topografía del río y contaminación extensiva de las aguas con sedimentos y mercurio. En 1989, se estimaba la existencia de 253 balsas mineras sólo en el Bajo Caroní, que ocupaban a unas 900 personas (Briceño, 1989); posteriormente, fueron desalojadas debido al desarrollo hidroeléctrico que se ejecutó en ese sector.



Figura 8.4. "Resumen": aplicación de calor para evaporar el mercurio y obtener el oro puro. Fuente: Propia.



Figura 8.5. Balsas mineras. Fuente: Propia.

- *Galerías Pequeñas*: son túneles de 1 m de diámetro y hasta 80 m de profundidad construidos con máquinas pequeñas (Figura 8.6). Se utiliza un martillo hidráulico ("ploga"), corto y liviano, para romper la roca y también se hacen perforaciones con taladros para ejecutar pequeñas voladuras. Las personas y los materiales bajan y suben con una cuerda atada a un torno manual de madera denominado "machina". La roca fragmentada es procesada en la superficie con un "molino" y con mercurio. Los impactos ambientales son: alteración a pequeña escala de la vegetación y contaminación de los ríos.



Figura 8.6. Galerías Pequeñas. Fuente: Propia.

- Galerías Industriales*: son túneles de 5-10 m de diámetro y hasta 500 m de profundidad, abiertos mediante explosiones muy controladas (Figura 8.7). Utilizan maquinaria pesada y tecnología que requiere altas inversiones. El acceso para personal, maquinaria y extracción del mineral se hace con ascensores industriales o túneles con recorrido en forma de helicoides. En la superficie el material se lleva a una planta procesadora donde se tritura la roca y se usa cianuro para separar el oro. Los impactos ambientales son: alteración de la vegetación en una escala muy reducida.



Figura 8.7. Galerías Industriales. Fuente: Propia.

- *Excavación Superficial Industrial*: utiliza explosivos y maquinaria pesada para desprender el mineral a cielo abierto (Figura 8.8). El material es transportado a una planta de procesamiento donde se tritura la roca y se usa cianuro para separar el oro. Los impactos ambientales son: destrucción de la vegetación y alteración de la topografía en espacios grandes (hasta unas 500 ha por cada mina).



Figura 8.8. Excavación Superficial Industrial. Fuente: Propia.

Situación actual

Muy recientemente, se hizo una cartografía del uso de la tierra en la Guayana Venezolana (Provita, 2021a) y, además, se hicieron estimaciones de los cambios en la superficie de los distintos usos de la tierra (Provita, 2021b). De ello resulta que la actividad minera ocupa una superficie total cercana a 50000 ha (Figuras 8.9 y 8.10). Hay sectores donde la minería está concentrada y eso se muestra en la Figura 8.11. Al analizar esos mapas, se estima que más del 95% de la minería se está ejecutando con el método de monitores hidráulicos en las zonas de influencia de los ríos, siendo este el método de extracción que genera más impactos ambientales.

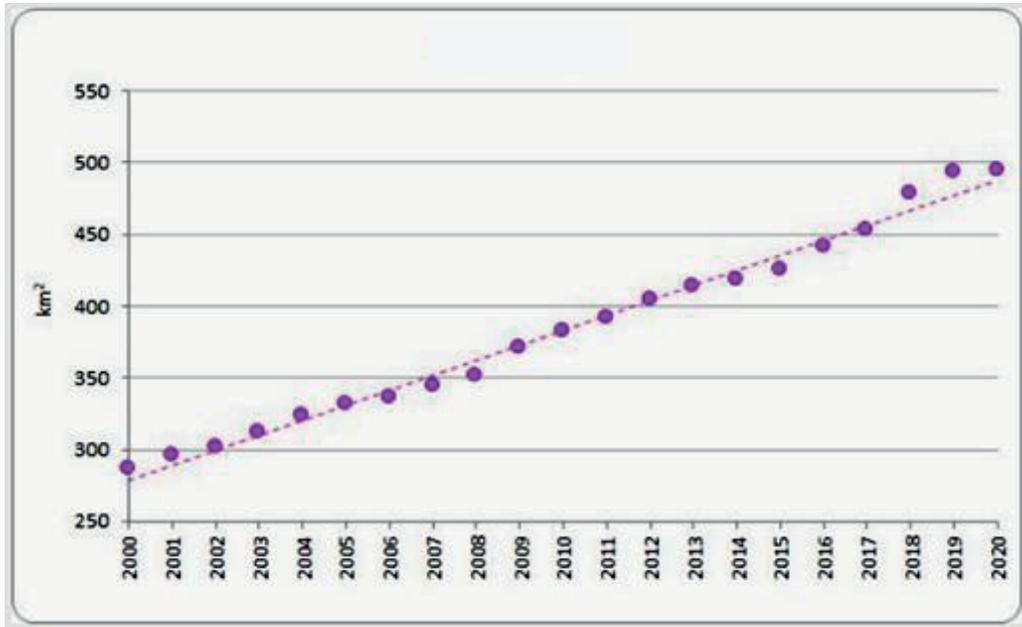


Figura 8.9. Incremento del uso minero en la Guayana Venezolana. Fuente: Provita, 2021b.

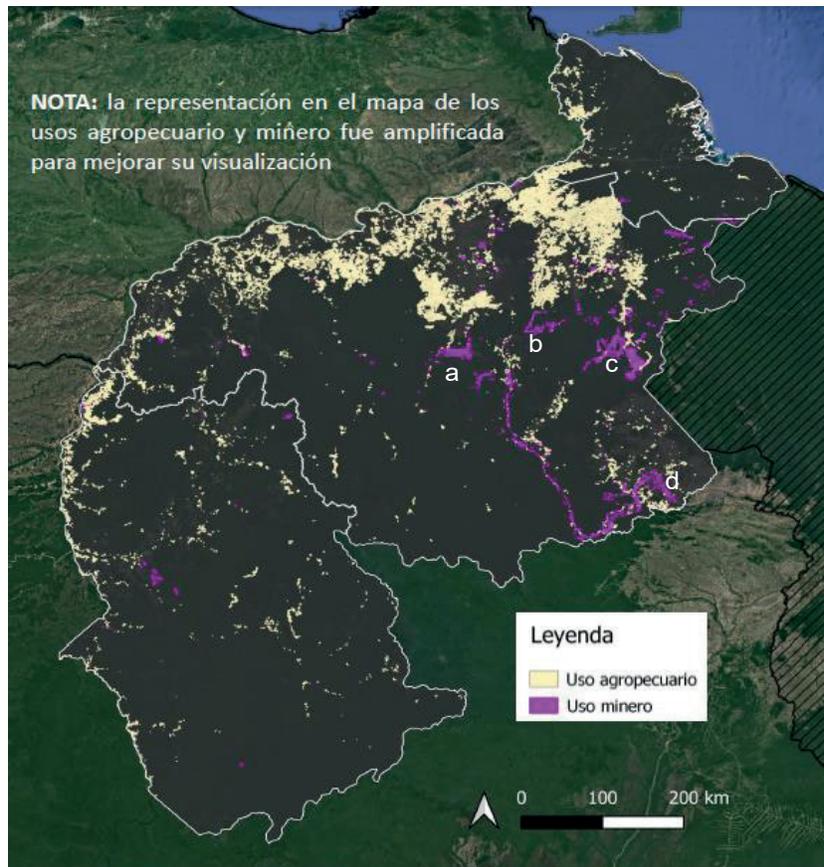


Figura 8.10. Localización de las áreas de minería en la Guayana Venezolana. a) Sector Paragua. b) Sector Supamo. c) Las Claritas. d) Kukenán. Fuente: Provita, 2021b.

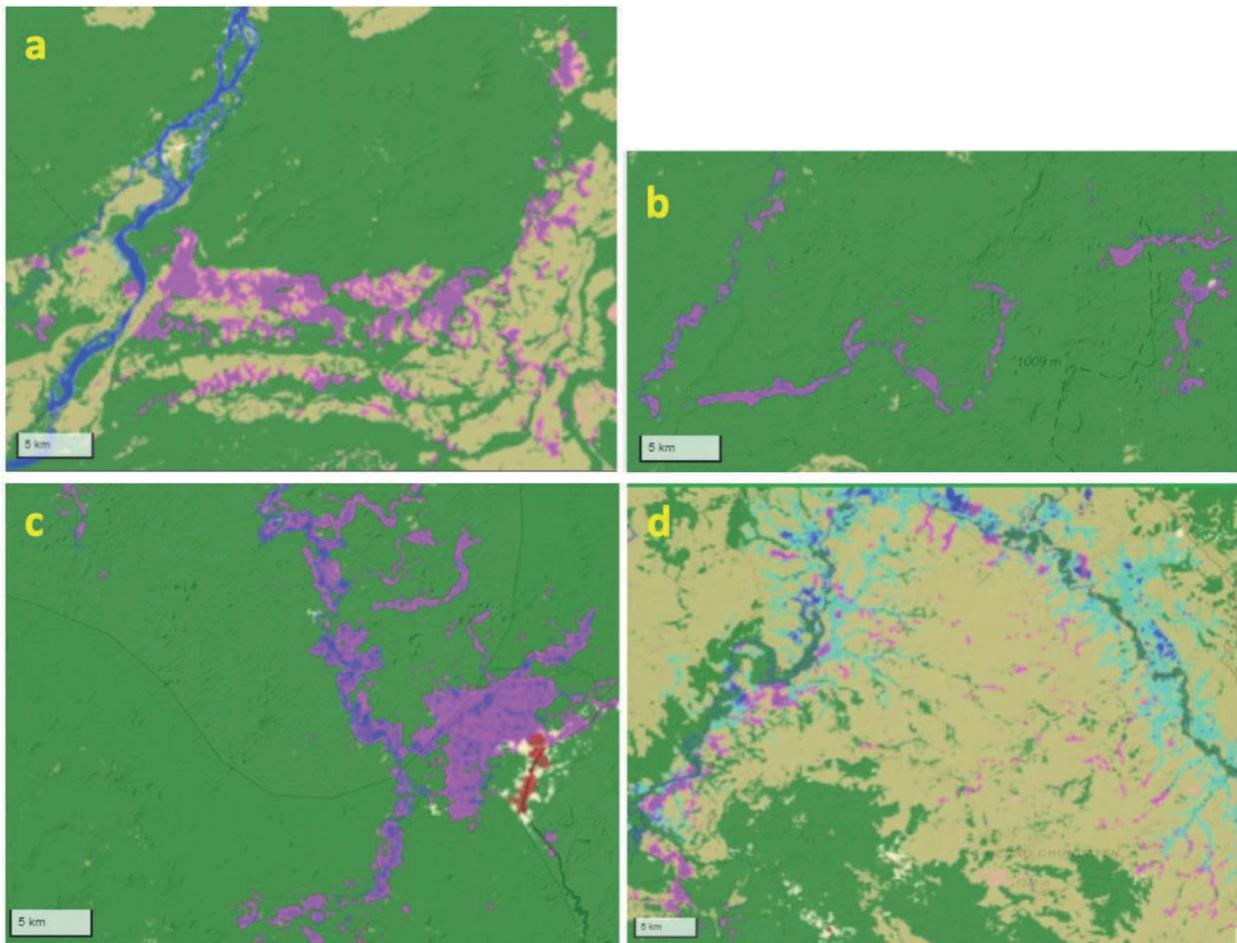


Figura 8.11. Sectores de concentración de actividades mineras (color fucsia) en la Guayana Venezolana: a) La Paragua, b) Supamo, c) Las Claritas, d) Kukenán. Fuente: Adaptado de Provita 2021a.

Cabe destacar que la mayor parte de la actividad minera se ejecuta actualmente de manera ilegal. Eso significa que no se cumplen los requisitos técnicos que debe tener este tipo de proyectos (prospección, exploración, diseño, estudio de impacto ambiental y ejecución de medidas de control de impactos ambientales). En 2016, el Gobierno venezolano decretó el Arco Minero del Orinoco y se anunció que había más de 130 empresas, de 35 países, interesadas en estos proyectos, los cuales generarían ingresos anuales superiores a 5000 millones US\$. Sin embargo, estas empresas internacionales no han venido; lo que existe actualmente son "asociaciones estratégicas" con "Brigadas Socialistas Mineras" y pequeños y medianos empresarios de origen nacional, en 23 áreas de producción minera que ocupan una superficie total de 3400 ha (Figura 8.12). Existen serias dudas sobre el cumplimiento de la normativa ambiental en estos desarrollos, dado que hay un notable deterioro institucional que se refleja en el desmantelamiento del Ministerio del Ambiente (sustituido por un Ministerio de Ecosocialismo y creación de un ministerio pseudo ambiental denominado Ministerio de Minería Ecológica), la falta de personal capacitado para hacer el control y gestión, falta de vehículos, y escasez de laboratorios especializados para los análisis de muestras de agua y de suelo (observación personal).

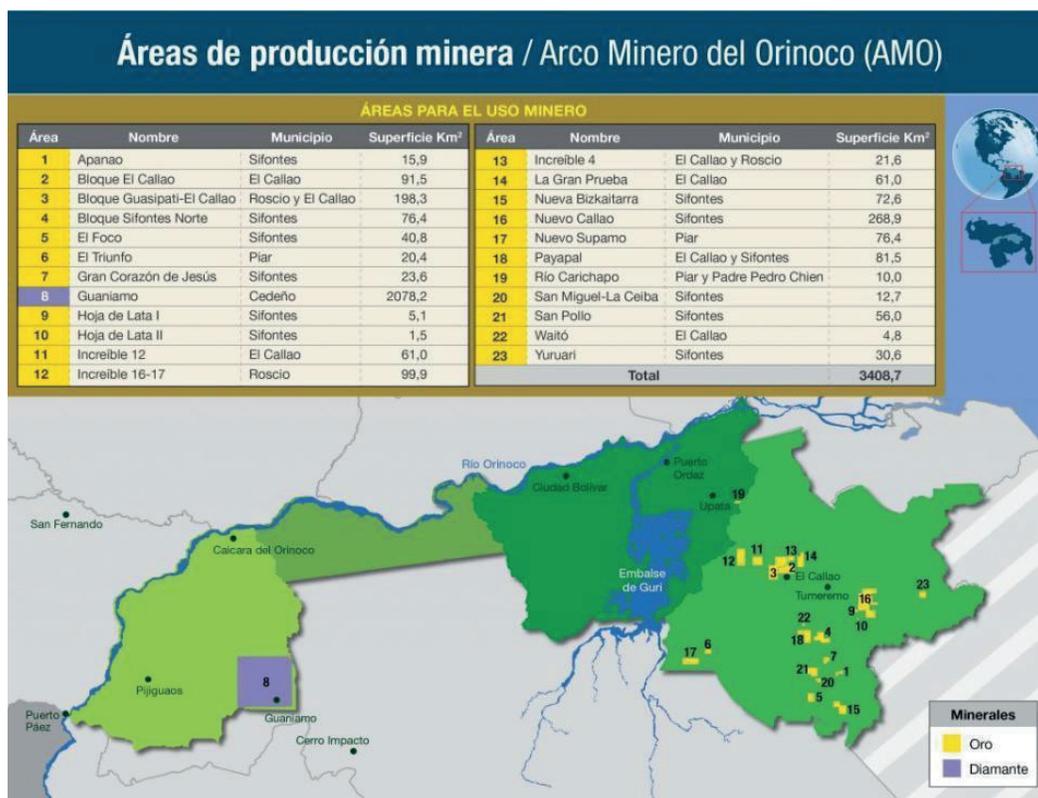


Figura 8.12. Sectores de producción en el Arco Minero del Orinoco. Fuente: <http://www.desarrollominero.gob.ve/zona-de-desarrollo-estrategico-nacional-arco-minero-del-orinoco/>.

Otro aspecto fundamental es la presencia de grupos irregulares extranjeros y de organizaciones delictivas autodenominadas "sindicatos", que han protagonizado enfrentamientos con muchas fatalidades y un clima de violencia muy intensiva en casi todas las áreas de explotación minera (Mayorca, 2010; Singer, 2020).

Contaminación con mercurio

La amalgama con mercurio (Hg) es el método más simple que existe para separar el oro y por lo tanto es el más utilizado por los pequeños mineros. Durante el proceso de extracción, el Hg entra en contacto con el agua; además, al finalizar dicho proceso quedan fluidos residuales (denominados "colas") que van a los ríos cercanos. La amalgama es sometida a calor para que el Hg se evapore y quede el oro puro. Existen las llamadas "retortas" (Figura 8.13), que son herméticas y es donde los vapores de Hg se condensan, elemento que puede ser reutilizado. Este artefacto es conocido por los mineros en Venezuela pero, por idiosincrasia, la mayoría no lo usan y se contaminan con vapores de Hg. Los vapores de Hg se mueven por el aire y finalmente se depositan en el suelo, donde se condensan, aunque luego vuelve a ocurrir una evaporación; el Hg "... tiene una alta tensión de vapor ... es decir, si nosotros ponemos acá un recipiente con mercurio, en menos de media hora habrá mercurio por todo el ambiente, rápidamente se evapora" (Carrión, 2019).

Se ha intentado el uso de *concentradores Knelson*, que funcionan con un mecanismo gravimétrico para separar las partículas de oro, sin mercurio. No están claras las razones por las que este sistema

no se ha extendido en Venezuela; algunos comentarios indican lo siguiente: no se adapta bien a materiales arcillosos (frecuentes en la Guayana Venezolana); es una tecnología compleja para los pequeños mineros; requiere fuentes de energía que no están disponibles en los sitios de explotación; son equipos con gran tamaño y peso que hace difícil su instalación en las minas; el costo es muy elevado para pequeños mineros que no conocen la posible productividad de la mina porque no hacen prospección y exploración.



Figura 8.13. "Retorta": tiene una tapa de rosca, la amalgama se coloca en la parte inferior, allí se aplica calor, los vapores de mercurio se condensan en el recipiente superior. Fuente: Propia

En el agua, el Hg es atacado por bacterias y forma metil-mercurio; este compuesto se incorpora a la cadena trófica y finalmente llega a los seres humanos cuando consumen peces contaminados. Por lo tanto, todos los ríos donde se practica la minería tienen diversos niveles de contaminación con Hg que se detecta en el agua, los sedimentos y los peces. Buena parte de las comunidades indígenas de Guayana están a orillas de los ríos Caroní, Caura y Cuyuní, o sus tributarios; el agua potable de Ciudad Guayana se abastece del río Caroní. Se ha calculado que en ese río se descargaron 5 toneladas de Hg en las últimas tres décadas del siglo XX (Veiga, 1996, citado por Sandoval et al., 2006). Esto da una idea de la magnitud del problema; esta ciudad tenía una población cercana a 800000 personas en 2020.

Se han establecido diversos valores como niveles máximos permisibles o "valor umbral" de Hg; esto es el contenido o concentración de Hg en el cual no ocurren efectos adversos a la salud. Se han realizado innumerables estudios sobre la contaminación por Hg en la Guayana Venezolana; en este documento se citarán los que se consideran más relevantes (Tabla 8.1).

En las personas, el Hg genera una gran variedad de trastornos en la salud. Raffenberger et al. (1989) realizaron un estudio en la Concesión Cristina IV (cuenca del río Cuyuní), donde estimaban que existía una población de 20000 mineros; hicieron un muestreo en 51 personas seleccionadas al azar (45 masculinos y 6 femeninos) y se encontraron que 72,6% presentaron trastornos del sistema nervioso, 53% pérdida de memoria y 27,5% tenían la denominada "tríada clásica" (temblor, gingivitis y eretismo; lo último se expresa mediante síntomas como el insomnio,

timidez excesiva y variabilidad emocional). Rodríguez et al. (1993), en el Bajo Caroní, encontraron las siguientes afectaciones a la salud: inflamación de encías 32%, temblor distal 28%, dolor de cabeza 18%, cambios de carácter 9%.

Tabla 8.1. Concentraciones de mercurio (Hg) encontradas en diferentes evaluaciones realizadas en la Guayana Venezolana. (a): WHO, 1990. (b): WHO, 2005. (c): WHO, 1976. (d): República de Venezuela, 1999. (e): República de Venezuela, 1995. (f): COVENIN, 1994, 1995.

Fuente y sector del estudio	Orina (µg/l)	Cabello (µg/g)	Agua (µg/l)	Peces (µg/kg, en músculo)
Valor de umbral internacional	4 (a)	2 (a)	6 (b)	500 (c)
Valor de umbral nacional	50 (d)	6 (d)	10 (e)	500 (f)
De Quilisque y Vera (1989), Bajo Caroní.			12	
Raffensberger et al. (1989), cuenca del río Cuyuní.	78%: >100			
Briceño (1989), Bajo Caroní.				160 (<i>Millessinus shomburgkii</i>)
Minproc (1991, citado por Sandoval et al., 2006), Bajo Caroní.				2520 (<i>Plagioscion squamosissimus</i>)
Rodríguez et al. (1993), Bajo Caroní.	84%: >50			
Bermúdez (1993, citado por Piña, 2002b), Bajo Caroní.				620 (<i>Hydrolicus scomberoides</i>)
Álvarez et al. (2001), La Paragua, Lago Guri.		8,17		
Nasser et al. (2001), Bajo Caroní.		6,7	3	
Pérez (2001), varios sectores.				760 (<i>Hoplias malabaricus</i>)
Álvarez y Rojas (2006), Medio Caroní.	14,2	6,5		
Carrasquero (2006), El Callao, cuenca del río Cuyuní.		34%: >6		1920 (<i>Speronotus leptoryncus</i>)
Farina et al. (2009), Alto Cuyuní.			20,1	4100 (<i>Plagioscion squamosissimus</i>)
Pérez et al. (2012), río Caura.		9,4		1800 (<i>Hoplias aimara</i> , <i>Ageneiosus inermis</i> , <i>Plagioscion squamosissimus</i>)
Ramírez (2021), Medio Caroní (cabello) y Caicara del Orinoco (agua)		35%: >2	3,9	

De acuerdo a la ubicación de las áreas mineras, se infiere que una buena parte de los cuerpos de agua de la Guayana Venezolana tienen algún nivel de contaminación con Hg (Figura 8.14). Esto incluye el Embalse de Guri, con una superficie de 3118 km² y 57 ríos con una longitud total de 7277 km (Tabla 8.2).

Contaminación con cianuro

En algunas oportunidades las lagunas de colas, que contienen vertidos con cianuro, se han desbordado por fallas estructurales o por exceso de precipitación, generando contaminación en los cuerpos de agua cercanos. Hay gran cantidad de casos de estos impactos; la Plataforma Contra el Arco Minero (2018) hizo una lista bastante detallada de estas situaciones de contaminación en diversas partes del mundo y de América Latina; debe destacarse que no mencionan NINGÚN CASO DE VENEZUELA. Esto significa que no hay ningún reporte técnico sobre contaminación con cianuro de un cuerpo de agua en Venezuela, generada por la minería de oro. Sí hay infinidad de artículos de prensa, pero no tienen fundamentos técnicos. Obviamente, es un riesgo potencial, pero se considera que mientras estuvo activo el Ministerio del Ambiente, las medidas de control funcionaron de manera adecuada.



Figura 8.14. Mapa de contaminación con mercurio (Hg), en la Guayana Venezolana. Se han resaltado (con colores) solamente las secciones de los ríos que reciben descargas directas de Hg. Fuente: Elaboración propia mediante interpretación de los mapas de uso de la tierra de Provita (2021a).

Tabla 8.2. Ríos contaminados con mercurio (Hg) en la Guayana Venezolana. Se consideran sólo las secciones de los cauces que reciben descargas directas de Hg. Fuente: Elaboración propia, cálculos propios.

No.	Nombre	Longitud (km)	No.	Nombre	Longitud (km)
1	Orinoco	1219	30	Chibau	24
2	Grande	201	31	Yuruán	67
3	Imataca	98	32	Supamo	186
4	Merejina	69	33	Guariche	48
5	Sacupana	138	34	Parapapoi	6
6	Araguao	157	35	Yuruari	182
7	Tres Caños	58	36	Botanamo	71
8	Mariusa	207	37	Matupo	57
9	Mánamo	235	38	Guarampín	55
10	Macareo	151	39	Agua Linda	71
11	Manamito	49	40	Santa María	84
12	Cocuina	128	41	Cuyubini	67
13	Pedernales	113	42	Basama	21
14	Capure	61	43	Amacuro	136
15	Medio y Alto Caroní	421	44	Carrao	124
16	Bajo Caroní	95	45	Acanán	15
17	Aponguaao	201	46	Carún	153
18	Kukenán	109	47	Paragua	287
19	Yuruani	62	48	Tonoro	75
20	Uairén	20	49	Oris	62
21	Surunkún	37	50	Aza	110
22	Icabarú	119	51	Chiguao	140
23	Uaiparú	41	52	Antabará	111
24	Mowak	23	53	Caura	280
25	Caruay	94	54	Yuruani	90
26	Tirica	33	55	Cuchivero	65
27	Cuyuní	299	56	Guaniamo	148
28	Amarillo	17	57	Venamo	28
29	Chicanán	59	TOTAL		7277

Marco normativo

Desde el siglo XIX, se promulgó gran cantidad de leyes y decretos en Venezuela que aspiraban a ejercer el control de las actividades mineras y la minimización de sus impactos ambientales. En esta sección no se pretende hacer un listado ni un análisis exhaustivo de todas esas leyes, pero se hará un resumen de las que se consideran más relevantes.

Se señaló antes que la mayor parte de la minería que se ejecuta actualmente es ilegal; esa situación se viene arrastrando desde hace décadas. Se han hecho esfuerzos para legalizar a los pequeños mineros y hubo muy pequeños avances en los años 1990's (observación personal), por ejemplo, con la cooperativa Nuevo Callao (cerca de Tumeremo) y la cooperativa Los Rojas (en Las

Claritas). Pero la Misión Piar (2004), impulsada desde la Presidencia de la República, aportó créditos, motobombas y tuberías que reimpulsaron una pésima forma de minería (monitores hidráulicos), dando lugar a la peor situación de anarquía minera en Guayana, lo cual ha llevado a la afectación de áreas protegidas como el Parque Nacional Canaima (que es Patrimonio de la Humanidad).

Hubo empresas grandes, nacionales y extranjeras, que cumplieron toda la normativa ambiental y ejecutaron sus actividades durante muchos años, con el respectivo seguimiento y control del Ministerio del Ambiente. Sin embargo, esa no es la situación dominante en este momento.

- *Decreto del Libertador Simón Bolívar sobre conservación y propiedad de las minas contra cualquier ataque y contra la facilidad de turbarla o perderla (1829)*: Este decreto tenía como finalidad controlar la propiedad, la posesión, la protección y el resguardo de las minas en toda la Gran Colombia. Contiene reglas relativas a deberes y derechos, así como el proceso judicial, los procedimientos y las formalidades que se debían seguir ante los tribunales (Aboasi El Nimer, 2016).
- *Ley de Minas (1945)*: En esta ley se incluyó una de las primeras normas ambientales relativas a la minería pues se estableció "...que las aguas sucias o envenenadas no se devuelvan al cauce común sin antes ser filtradas o hechas inofensivas ... y que los residuos de un molino o planta de tratamiento no se arrojen directamente a un río, quebrada o canal de drenaje, o sobre tierra cultivada o cultivable. El agua que contenga sedimentos, sustancias coloidales o arenas en suspensión debe dejarse decantar en un espacio o zona cerrada dentro de la concesión" (Artículo 69).
- *Ley Forestal de Suelos y de Aguas (1966)*: En esta ley se establecen zonas protectoras en 50 metros de ancho en ambos márgenes de los ríos y se indica que en esas áreas no puede haber destrucción de la vegetación (Artículos 17, 19). También señala que, en general, las Cuencas Hidrográficas, deben ser protegidas "contra todos los factores que contribuyan o puedan contribuir a su destrucción o desmejoramiento" (Artículo 22). Esta ley contempló arresto entre 2 y 12 meses (Artículo 110), y multas entre 1000 y 50000 Bolívares (Artículo 114) equivalentes a un rango entre 233 y 11628 US\$ (tasa de cambio 4,30 Bs/US\$), a quienes destruyeran la vegetación de forma ilegal. En el caso de explotaciones mineras ilegales, los arrestos se aplicaron por pocos días y las multas eran próximas al límite inferior debido a las reducidas superficies (generalmente inferiores a 1 ha), que ocupaban los pequeños mineros. Por estas razones, esta Ley no tuvo la fuerza suficiente para detener los impactos generados por la minería ilegal.
- *Decreto N° 1.740 (Gaceta Oficial N°34.763, del 26/06/1991)*: En este decreto "... se dispone la prohibición de uso de mercurio en la extracción y preparación del mineral aurífero en tierra y balsas" (Piña, 2002a).
- *Ley Penal del Ambiente (1992, modificada en 2012)*: Esta ley consideró las faltas ambientales como delitos penales y establece sanciones en forma de multas (expresadas como unidades tributarias - U.T.) o prisión, para los siguientes casos: (1) Actividades no permitidas en los ríos u otros cuerpos de agua: prisión de seis meses a un año o multa de 600 a 1000 U.T. (Artículo 37); (2) Obstrucción del flujo o el lecho natural de los ríos, o sedimentación: prisión de uno a cinco años o multa de 1000 a 5000 U.T. (Artículo 56); (3) Contaminación de las aguas destinadas al uso público o a la alimentación pública, poniendo en peligro la salud de las personas, con prisión de dieciocho meses a cinco años

o multa de 1800 a 5000 U.T. (Artículo 83); y (4) Vertido de sustancias no biodegradables, agentes biológicos o bioquímicos, efluentes o aguas residuales no tratadas, en los cuerpos de aguas, capaces de degradarlas, envenenarlas o contaminarlas: prisión de uno a dos años o multa de 1000 a 2000 U.T. (Artículo 84).

- *Resolución N°368 (Ministerio de Energía y Minas; Gaceta Oficial N°35.280 del 23/08/1993)*: Dicta las normas aplicables a la explotación de yacimientos minerales de aluvión, ubicados en jurisdicción del estado Bolívar. Indica excepciones en algunas áreas contempladas en decretos anteriores. Ratifica la prohibición de mercurio y cianuro (Piña, 2002a).
- *Decreto N° 883: Normas para la clasificación y el control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos (1995)*: Se establecen rangos y límites máximos de calidad de vertidos líquidos que sean descargados, en forma directa o indirecta, en ríos, estuarios, lagos y embalses: Cianuro total 0,2 mg/L, Mercurio total 0,01 mg/L. (Artículo 10).
- *Decreto N° 3091: Norma técnica para el control de la afectación del ambiente asociada al aprovechamiento de oro y diamante en el estado Bolívar y en el municipio Antonio Díaz del estado Delta Amacuro (1998)*: Prohíbe el uso del mercurio "en los frentes de extracción y en cualquier tipo de instalación construida directamente sobre los cursos de agua (balsas) o en sus riberas, así como su vertido en las lagunas de sedimentación" (Artículo 10). Permite el uso del mercurio en plantas de procesamiento "en condiciones que garanticen el manejo seguro de este elemento, el control de los vapores mercuriales y la adecuada disposición de los desechos" (Artículo 12). También permite el uso del cianuro "en instalaciones que cuenten con lagunas impermeables especialmente construidas para el confinamiento de las soluciones cianuradas o colas de cianuración. Los líquidos sobrenadantes deberán cumplir con los límites establecidos en este Decreto para su descarga en cuerpos de agua o infiltración en el suelo" (Artículo 15).
- *Ley de Minas (1999)*: Establece que "las actividades mineras reguladas por esta Ley, se llevarán a cabo científica y racionalmente, procurando siempre la óptima recuperación o extracción del recurso minero, con arreglo al principio del desarrollo sostenible, la conservación del ambiente y la ordenación del territorio" (Artículo 5). "El Ministerio de Energía y Minas en coordinación con el Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales, ejercerá la prevención de la contaminación del ambiente derivada de las actividades mineras" (Artículo 36).
- *Ley de Aguas (2007)*: Esta ley hizo un compendio de diferentes normativas relacionadas con los recursos hídricos. Se indica que las multas aumentarán al doble en los casos de contaminación por vertido de sustancias, materiales o desechos peligrosos (Artículo 113), las acciones administrativas para la persecución de los infractores no prescribirán (Artículo 117) y se establecen multas de 50 a 5000 U.T. para las acciones que degraden el agua o cuando se superen los límites de calidad de los vertidos (Artículos 119 y 124).
- *Decreto N° 2.412, mediante el cual se prohíbe el uso, tenencia, almacenamiento y transporte del Mercurio (Hg) como método de obtención o tratamiento del oro (2016)*: Este decreto prohíbe el uso del mercurio "en todas las etapas de la actividad minera que se desarrollen en el Territorio Nacional" (Artículo 1) y reserva al Estado venezolano el "manejo, procesamiento y disposición de las arenas contaminadas de mercurio (Hg), catalogadas como pasivos de la actividad minera" (Artículo 2).

Como síntesis, podría señalarse que en Venezuela existen suficientes instrumentos jurídicos para normar la minería sin que existan daños irreversibles al ambiente. Lo que hace falta es el CUMPLIMIENTO de esas normas. No se logra nada con un cuerpo de leyes en el papel, si no existe la decisión y la fortaleza política e institucional para hacer cumplir dichos reglamentos. El caso de Venezuela demuestra que, en muchos casos, la elaboración y promulgación de regulaciones sólo sirve para que gobernantes, legisladores y políticos puedan mantener una cierta imagen pública positiva (dar la impresión de que "están haciendo algo"), puesto que existe una inmensa distancia entre esas ordenanzas teóricas y la realidad en el terreno.

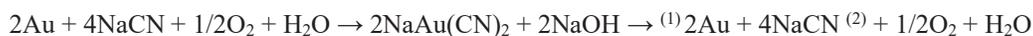
Tratamiento

Medidas de control para la contaminación con mercurio

La literatura indica que existen métodos, basados en la bioremediación, para recuperar el Hg de los ambientes contaminados. Por ejemplo, se puede usar la planta *Arabidopsis thaliana* (Sinha et al., 2009) o bacterias transgénicas (Ruiz et al., 2011). Se encontró además que *Lemna minor* tiene una eficiencia de remoción del Hg de 30% (en 22 días) en aguas contaminadas (Arenas et al., 2011). También se ha reportado que *Vetiveria zizaniodes* acumula 4,1 mg/kg en el follaje y 86,9 mg/kg en las raíces, en 3 meses de crecimiento en un sustrato con 300 mg de Hg por kg de suelo (Bolívar et al., s/f). Estos resultados corresponden a investigaciones realizadas en laboratorios; en Venezuela no se conocen experiencias de este tipo en condiciones reales de campo.

Medidas de control para la contaminación con cianuro

La cianuración es el método más utilizado por las medianas y grandes empresas y es el más eficiente para recuperar el oro. Consiste en un proceso químico cuya ecuación general es la siguiente (Márquez, 1980):



⁽¹⁾: proceso electrolítico

⁽²⁾: cianuro que forma parte de los efluentes.

Las aguas residuales del proceso son llevadas a una planta de tratamiento y allí se recupera buena parte del cianuro. La planta de Minerven (El Callao, Venezuela) llegó a reciclar hasta un 90% del cianuro, el cual se volvía a usar en el sistema de recuperación del oro (observación personal). En dicha planta de tratamiento, la fracción de cianuro restante era transformada en elementos inertes.

Otras empresas han usado el tradicional método de dirigir los efluentes a lagunas de colas, donde ocurre la conocida degradación natural del cianuro a cianatos y tiocianatos, que son sustancias no contaminantes (Ou y Zaidi, 1995). De hecho, estos dos últimos compuestos no se mencionan en la norma de calidad del agua en Venezuela (Decreto N° 883: Normas para la clasificación y el control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos. 1995).

La descomposición del cianuro al aire libre se representa en la Figura 8.15. En el punto del vertido existen las más altas concentraciones y en el punto más lejano de la laguna se presentan las más

bajas. El agua de estas lagunas queda allí confinada; el sitio finalmente se colmata por sedimentos y en ese momento se clausura la operación en ese lugar.

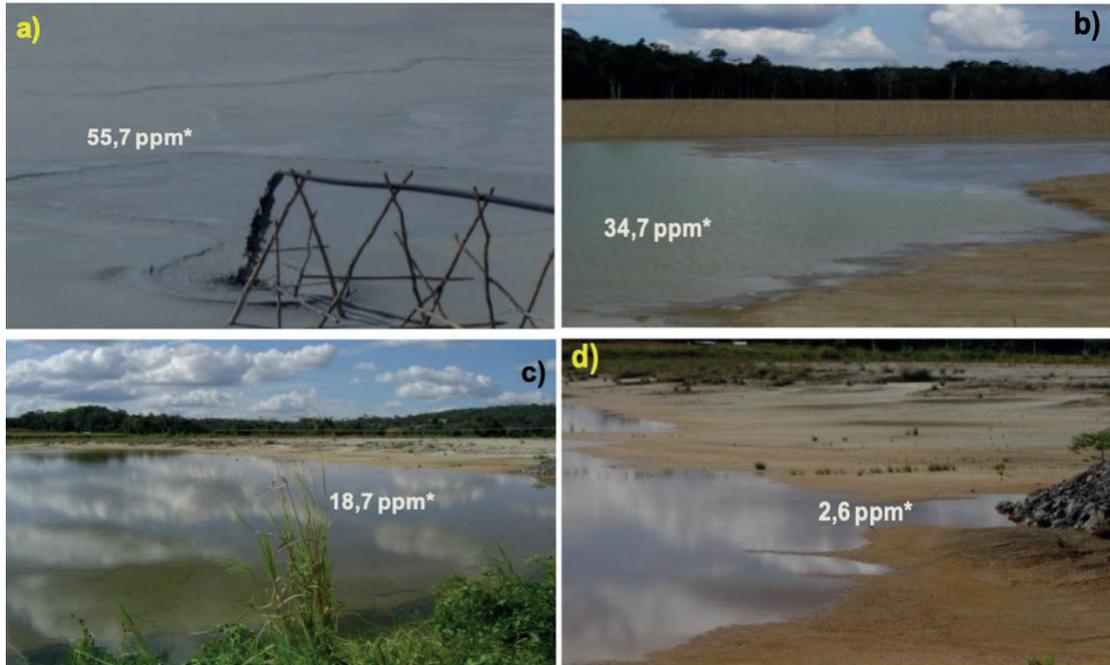


Figura 8.15. Descomposición natural del cianuro en lagunas de colas. Las cifras indican la concentración del cianuro en diferentes secciones de la laguna. a) Punto del vertido (primer cuarto de la distancia). b) Segundo cuarto de la distancia, desde el vertido. c) Tercer cuarto de la distancia. d) Lugar más lejano desde el vertido. Fuente: Datos tomados de García y González (2011).

Las lagunas de colas clausuradas se han recuperado en Venezuela mediante siembra de gramíneas (*Urochloa* spp.; antes denominado *Brachiaria*) y plantaciones de árboles como Apamate (*Tabebuia rosea*). Estos elementos constituyen una cobertura vegetal inicial, que posteriormente evoluciona a un bosque secundario más denso y con mayor diversidad de especies (Figura 8.16). La efectividad del establecimiento de la vegetación también se puede evidenciar mediante imágenes de satélite, en diferentes años, del mismo lugar (Figura 8.17).

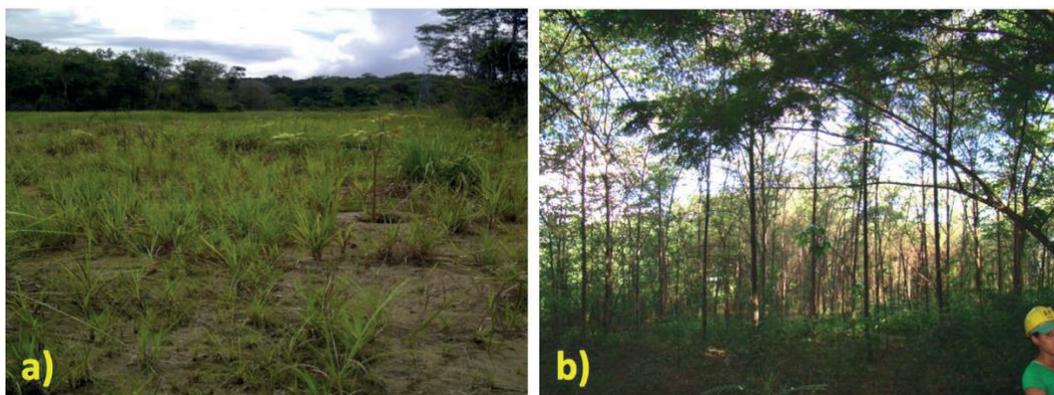


Figura 8.16. Recuperación de la cobertura vegetal en lagunas de colas clausuradas. a) Estado inicial con gramíneas y arbolitos plantados. b) Bosque secundario avanzado. Fuente: Propia.

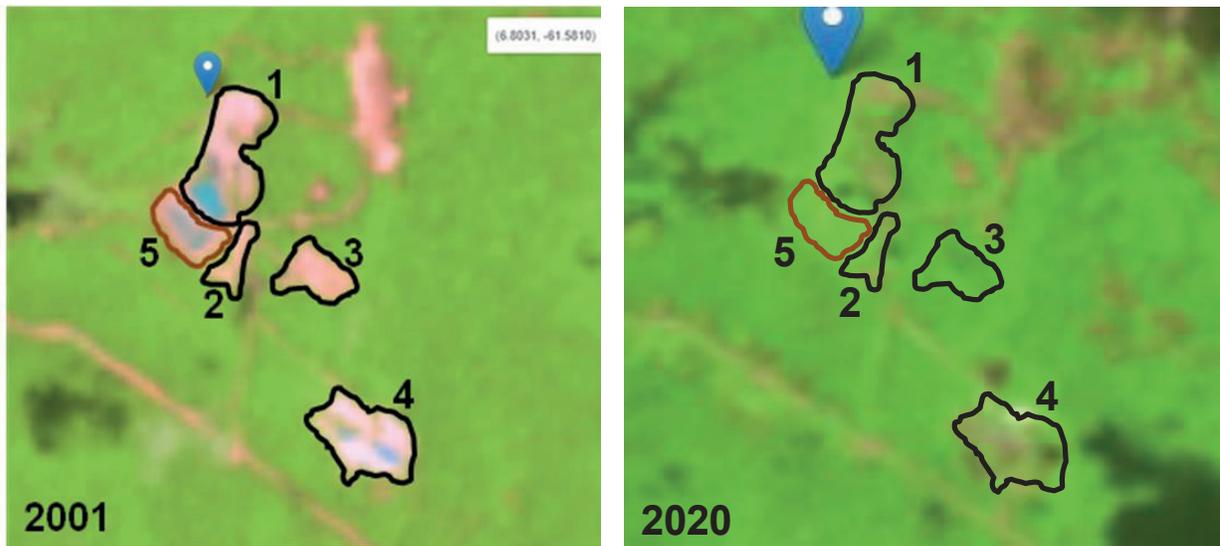


Figura 8.17. Recuperación de lugares deforestados con diversos fines (1, 2, 3 y 4) y de lagunas de colas (5) en la Mina Simón Bolívar (N: 6,8031°; E: -61,5810°). Fuente: Imágenes Landsat 7.

Conclusiones y recomendaciones

La minería que se ejecuta actualmente en Venezuela corresponde principalmente al aprovechamiento de aluviones con monitores hidráulicos, siendo este el tipo de minería que produce mayores impactos ambientales y *afecta a una superficie cercana a 50000 ha.*

En 2016, el Gobierno decretó el Arco Minero del Orinoco con el fin de promover la minería en una superficie de 111850 km². Se anunció que había 130 empresas (de 35 países) interesadas en este proyecto y que iban a generar ingresos anuales por el orden de US\$5000 millones. Esas empresas no vinieron; lo que hay actualmente son "asociaciones estratégicas" con actores nacionales, en unas 3400 ha. En la realidad, *el Arco Minero del Orinoco no existe*; se sigue ejecutando la tradicional minería de alto impacto ambiental que en su mayor parte actúa de forma ilegal.

En Venezuela se han promulgado una infinidad de leyes que han intentado regular la actividad minera, principalmente estableciendo controles a la degradación ambiental y a la contaminación. Varios instrumentos legales prohibieron el uso del mercurio en 1991, 1993, 1998 y 2016. También se fijaron límites máximos permisibles de contaminación en los vertidos que van a los cuerpos de agua: 0,2 mg/L para el cianuro total y 0,01 mg/L para el mercurio. Sin embargo, la lección más importante es que *las leyes en el papel no logran nada si no existe la decisión y la fortaleza política del Estado para hacer que se cumplan.*

Numerosos trabajos han demostrado la contaminación por mercurio en varios ríos de Venezuela, en niveles que superan los límites permisibles establecidos en la legislación nacional y por la Organización Mundial de la Salud. Ese elemento también se ha detectado (con niveles de riesgo) en la orina y el cabello de habitantes del área de influencia de la minería y en los peces de esos lugares. No se han ejecutado medidas de control para este impacto.

No existen reportes técnicos que demuestren la contaminación por cianuro en los cuerpos de agua del área de influencia de la minería en Venezuela. Se han aplicado medidas de control que han sido eficaces para evitar este impacto ambiental. Existen experiencias de lagunas de colas clausuradas que han recuperado la cobertura vegetal mediante siembra de gramíneas, plantación de árboles y sucesión vegetal.

En Venezuela, es obvio que el Estado no ejerce un control efectivo de las actividades mineras. Existe una especie de anarquía fomentada por la corrupción, delincuentes organizados e inclusive grupos irregulares extranjeros. Todo parece indicar que, *en el actual contexto institucional y político del país, no habrá solución a este problema tan complejo.* Se requiere una transformación sustancial del Estado, y cuando eso ocurra deberá convocarse una comisión técnica de alto nivel para diseñar un plan de trabajo orientado a reorganizar una minería que cumpla con las leyes ambientales del país y aporte beneficios tangibles a las comunidades del área de influencia. Esa planificación deberá incluir aspectos tan variados y complicados como: seguridad y defensa, normativa ambiental, normativa minera, organización de los actores sociales y derechos humanos.

Referencias

- Aboaasi, El Nimer, E., (2016). Bolívar: minería y petróleo. Anuario Grhial 10: 108-129.
- Alvarez, L., Rojas, L., & Fuentes, N. (2001). Contribución al estudio de la contaminación Mercurial en Algunas Poblaciones Ribereñas del lago de Guri, estado Bolívar. Resúmenes de ponencias LI Convención Anual de AsoVAC, 91.
- Álvarez, L., & Rojas, L. (2006). Presencia de mercurio total en habitantes de los asentamientos indígenas el casabe, municipio autónomo Raúl Leoni y el plomo, municipio autónomo Manuel Carlos Piar—estado Bolívar. SABER. Revista Multidisciplinaria del Consejo de Investigación de la Universidad de Oriente, 18(2), 161-167.
- Arenas, A. D., Marcó, L. M., & Torres, G. (2011). Evaluación de la planta Lemna minor como biorremediadora de aguas contaminadas con mercurio. Avances en ciencias e ingeniería, 2(3), 1-11.
- Briceño, H. (1989). Contaminación Mercurial del Bajo Caroní. Informe de Avance (Litos, CA, 1989), 31-32. .
- Bolívar, P; Contreras, F; Adams, E; García, A; Santos, F; Adams, M. s/f. Acumulación de mercurio por vetiver en condiciones de invernadero en suelos contaminados de El Dorado (estado Bolívar). Disponible en: <https://www.vetiver.org/ICV4pdfs/BA21es.pdf>.
- Carrasquero-Durán, A. (2006, diciembre). Contaminación por mercurio de trabajadores de centros de procesamiento de oro en El Callao, Venezuela. En Anales de la Asociación Química Argentina (Vol. 94, No. 4-6, pp. 91-100). Asociación Química Argentina.
- Carrión, N. (2017). IMPACTO DEL USO DE MERCURIO EN LA EXPLOTACIÓN DEL ORO EN LOS POBLADORES DE LA ZONA. Guayana Sustentable, 17(17), 32-51.

COVENIN. (1994). Pescado Salado, Seco, Seco Salado. Comisión Venezolana de Normas Industriales. Norma Venezolana 2394. Disponible en: <http://www.sencamer.gob.ve/sencamer/normas/2394-94.pdf>.

COVENIN. (1995). Atún en Conserva. Comisión Venezolana de Normas Industriales. Norma Venezolana 1766. Disponible en: <http://www.sencamer.gob.ve/sencamer/normas/1766-95.pdf>.

De Quilarque, X; Vera, J. (1989). Determinación de mercurio (Hg) en muestras de agua y sedimentos del río Caroní, en los sectores mineros de: Caruachi, Flamingo y Mundo Nuevo, de la ciudad de Puerto Ordaz, estado Bolívar. Corporación Venezolana de Guayana, Gerencia de Obras Sanitarias e Hidráulicas. Mimeografiado.

Farina, O., Pisapia, D., González, M., & Lasso, C. A. (2009). Evaluación de la Contaminación por mercurio en la biota acuática, aguas y sedimentos de la Cuenca Alta del río Cuyuní, Estado Bolívar, Venezuela. In Evaluación Rápida de la Biodiversidad de los Ecosistemas Acuáticos de la Cuenca Alta del Río Cuyuní, Guayana Venezolana (p. 74). Conservation International.

García, Y., & González, V. (2011). Evaluación de la degradación natural superficial del cianuro libre en la laguna de colas de la mina choco 10 de la empresa promotora minera de guayana rusoro mining del estado Bolívar Venezuela, periodo (2006-2009). Geominas, 39(54), 63-69.

Gutiérrez, J. (2018). Venezuela: invasión de mineros ilegales en Carabobo provoca redada militar y 3000 detenciones. Disponible en: <https://es.mongabay.com/2018/04/venezuela-mineros-ilegales-en-carabobo/>.

Márquez, L. (1980). Cianuración del mineral de oro de El Callao. Proyecto de Grado para optar al Título de Ing. Químico. Universidad de Los Andes. Mérida.

Mayorca, J. I. (2010). Farc en Venezuela: Un huésped incómodo. Friedrich-Ebert-Stiftung. Disponible en: <http://library.fes.de/pdf-files/bueros/la-seguridad/08185.pdf>.

Murguey Gutiérrez, J. (1989). La explotación aurífera de Guayana y la conformación de la Compañía Minera de El Callao 1870-1890 [Gold Mining in Guayana and the Shaping of the Mining Company of El Callao 1870-1890]. Puerto Ordaz: CVG-Minervén.

Mohaweche, N., Berbin, L., Canónico, R., & Fuentes, N. (2001). Niveles de Mercurio en el Ambiente y en la Población Infantil de Algunos Sectores del Bajo Caroní, Estado Bolívar. Venezuela. I Foro Internacional sobre el problema del mercurio en los embalses: El caso del reservorio Guri. Ciudad Bolívar.

López, J. O. (2004). Tesoros legendarios de Colombia y el mundo. Plaza y Janes Editores Colombia sa.

Ou, B., & Zaidi, A. (1995). Cyanide—dispelling the myths; natural degradation. Mining Environmental Management, 5(7).

Perera, M. A. (2000). Oro y hambre: Guayana siglo XVI: ecología cultural y antropología histórica de un malentendido 1498-1597. Cdch Ucv.

Pérez, L. (2001). Incidencia del mercurio sobre la piscicultura en el Embalse Guri y otros cuerpos de agua guyaneses. Estado Bolívar, Venezuela. I Foro internacional el problema del mercurio en los embalses: el caso del Reservorio Guri. Ciudad Bolívar, 17 -19 de mayo de 2001.

Pérez, B. L. E., González, T. M., Ravelo, C. U., La, E. F., & Guayana, S. D. C. N. C. Evaluación del riesgo de exposición al metil-mercurio en poblaciones indígenas ribereñas del Río Caura (Estado Bolívar, Venezuela). Disponible en: https://garimpoilegal.amazoniasocioambiental.org/Informe_riesgo_exp_metilmercurio_Caura-33d3e628542d2a8d85f6683d7df19de0.pdf?lang=pt.

Piña, A. (2002a) . Indicadores de sustentabilidad en la toma de decisiones para creación de distritos mineros, aplicados a minería metálica: Au y Fe, en el Estado Bolívar.

Piña, A. (2002b). Datos de análisis de mercurio, diversas fuentes consultadas. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/275969275_Datos_sobre_mercurio_en_el_estado_Bolivar_2008.

Plataforma Contra el Arco Minero. (2018). Editorial. Desarmando al Arco Minero. El A.M.O como visión de proyecto nacional. Boletín No. 2. Disponible en: https://www.academia.edu/37563298/Bolet%C3%9An_Desarmando_al_Arco_Minero_No_2.

Provita. (2021a). Geoportal Provita. Disponible en: <https://geoportal.provita.org.ve>.

Provita. (2021b). Cobertura y uso de la tierra en la Amazonía venezolana. ¿Cuáles son los principales impulsores de cambio?. Disponible en: <https://www.provita.org.ve/document?id=13>.

Raffensberger, F; Colmenares, M; Ramos, S. (1989). Trabajo de investigación de los mineros de oro expuestos a riesgo de mercurio en la zona de Guayana. Instituto Venezolano de los Seguros Sociales (IVSS), Dirección de Medicina del Trabajo. Mimeografiado.

Ramírez, A. V. (2008, March). Intoxicación ocupacional por mercurio. In Anales de la Facultad de Medicina (Vol. 69, No. 1, pp. 46-51). UNMSM. Facultad de Medicina.

Ramírez, M. (2021). La huella tóxica del mercurio llegó a la Gran Sabana. Disponible en: <https://especiales.correodelcaroni.com/la-huella-toxica-del-mercurio-llego-a-la-gran-sabana/>.

República de Venezuela. (1995). Normas para la clasificación y el control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos. Decreto No. 883 del 11/10/1995. Gaceta Oficial No. 5.021 Extraordinario del 18/12/1995.

República de Venezuela. (1999). Normas y procedimientos para definir los criterios clínicos y analíticos para determinar la intoxicación del personal expuesto a la contaminación mercurial, y

la conducción de los casos clínicos. Resolución No. 11 del 21/09/1999, Ministerio de Salud y Desarrollo Social. Gaceta Oficial No. 5.382 Extraordinario del 28/09/1999.

Rodríguez, M., Carreño, P., & García, S. (1993). Contaminación mercurial en mineros y afines del Bajo Caroní. *Salud de los Trabajadores*, 1(2), 97-107.

Ruiz, O.; Alvarez, D.; González-Ruiz, G.; C. Torres. (2011). «Characterization of mercury bioremediation by transgenic bacteria expressing metallothionein and polyphosphate kinase». *BMC Biotechnology*, 11(1): 82-89.

Sandoval, MC; Veiga, MM; Hinton, J; Sandner, S. (2006). Application of sustainable development concepts to an alluvial mineral extraction project in Lower Caroni River, Venezuela. *Journal of Cleaner Production* 14(3-4), 415-426.

Singer, F. (2020). Los sindicatos del oro desangran el sur de Venezuela. Disponible en: https://elpais.com/internacional/2020/02/04/actualidad/1580824507_196347.html.

Sinha, RK, Valani, D., Sinha, S., Singh, S. y Herat, S. (2009). Biorremediación de sitios contaminados: una biotecnología natural de bajo costo para la limpieza ambiental mediante microbios, plantas y lombrices versátiles. *Manejo de residuos sólidos y remediación ambiental*, 978-1.

WHO. (1976). Environmental Health Criteria I - Mercury. World Health Organization. Disponible en: <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/29275/EHC1MERCURY.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

WHO. (1990). Environmental Health Criteria 101 - Methylmercury. World Health Organization. Disponible en: https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/38082/9241571012_eng.pdf.

WHO. (2005). Mercury in Drinking-water. World Health Organization. Disponible en: https://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/chemicals/mercuryfinal.pdf.

Esta obra se terminó de imprimir en el
mes de agosto de 2023 en los talleres
gráficos de la Universidad Nacional de
San Agustín de Arequipa