

Bogotá, D.C.

Doctora

MARIA SUSANA MUHAMAD GONZÁLEZ.

Ministra de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

despachoministra@minambiente.gov.co

La Ciudad

Asunto: Concepto técnico sobre las afectaciones y/o impactos ambientales generados por la actividad de minería subterránea de metálicos en función de la escala de desarrollo, con énfasis en la Cuenca alta del Río Lebrija a la altura de la Cuenca del Suratá y Cáchira Sur (provincia de Soto Norte del departamento de Santander).

Respetada Sra. Ministra,

En respuesta a la solicitud de la referencia, nos permitimos emitir a continuación el concepto relacionado con:

- Afectaciones en la relación de la conectividad ecológica e hidrológica de la alta montaña.
- Afectaciones al servicio ecosistémico de provisión y regulación hídrica por desarrollo de minería subterránea.
- Afectaciones a la red trófica asociado a elementos potencialmente peligrosos del agua (mercurio, cianuro, arsénico, entre otros).

CONSIDERACIONES GENERALES.

En primera instancia, informamos que el Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt no ha desarrollado investigación científica específica tendiente a identificar las afectaciones a la biodiversidad y los servicios ecosistémicos por parte de la minería subterránea de metálicos, ni ha realizado la valoración de estas afectaciones de acuerdo con la escala de dichas iniciativas mineras. Sin embargo, se presentan en los siguientes párrafos el estado del conocimiento de estos temas, de acuerdo con los resultados de una búsqueda exhaustiva en la literatura científica, inicialmente desde una perspectiva general y, posteriormente, relacionada con el área de la provincia de Soto Norte, en el departamento de Santander.

AFECTACIONES EN LA RELACIÓN DE LA CONECTIVIDAD ECOLÓGICA E HIDROLÓGICA DE LA ALTA MONTAÑA.

El Instituto Humboldt hizo parte de la Mesa Técnica Interinstitucional, conformada por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Ministerio del Interior, Ministerio de Minas y Energía, Agencia Nacional de Minería, Unidad de Parques Nacionales Naturales y Contraloría General de la República, formalizada mediante Resolución N° 0931 de 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible conforme a las órdenes impartidas por la sentencia T-445 de 2016, con el objetivo

Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt

Somos el Instituto Nacional de la Biodiversidad

principal de realizar una investigación científica y sociológica para la identificación de los impactos de la actividad minera en los ecosistemas del territorio colombiano, cuyo producto principal se tituló "Documento de investigación científica y sociológica respecto de los impactos de la actividad minera y la explotación ilícita de minerales en los ecosistemas del territorio colombiano". Vale anotar que mediante auto emitido el 28 de octubre de 2020 del Consejo de Estado, se declararon cumplidas las órdenes de dicha sentencia.

Este trabajo se desarrolló mediante un proceso de investigación tipo IPBES (Plataforma Intergubernamental de Biodiversidad y Servicios Ecosistémicos, por sus siglas en inglés), de modo que contó con la colaboración de más de 40 expertos nacionales e internacionales, provenientes tanto del ámbito académico como empresarial, además de conocedores tradicionales, con el objetivo de diagnosticar el estado del conocimiento y formular recomendaciones.

Como resultado de dicha investigación, se produjeron dos tipos de documentos. El primero, un extenso informe de más de 400 páginas dividido en cuatro capítulos¹, evalúa: i) Biodiversidad y servicios ecosistémicos, ii) Relaciones sociales, gobernanza y derechos territoriales, iii) Determinantes ambientales en salud, y iv) Políticas públicas, democracia y participación ciudadana, así como dinámicas demográficas y económicas. El segundo, un resumen dirigido a tomadores de decisiones², que presenta los principales hallazgos y recomendaciones. Y el tercero, un resumen que aborda específicamente la identificación y análisis de los impactos de la actividad minera y la extracción ilícita de minerales en los ecosistemas del territorio nacional³.

Aunque el alcance de la investigación es nacional y abarca minerales en general, no exclusivamente metálicos ni subterráneos, se destacan algunas conclusiones que pueden ser de interés para la estructuración del documento técnico de soporte de la propuesta de área de reserva temporal:

“Los impactos directos a la biodiversidad y los ecosistemas por la minería en general lo constituyen la eliminación definitiva de coberturas vegetales de diferente tipo, que son por su condición biológica, el hábitat de especies como mamíferos, aves, anfibios y reptiles, que dependen de las plantas para su subsistencia. El segundo factor perturbador, y en algunos eliminado pero no recuperado, es el suelo; la pérdida de suelo en zonas mineras a cielo abierto, de socavón o de aluvión, induce procesos de erosión que reducen la productividad, la estabilidad ambiental - en especial la vegetal - e impactan la regulación hídrica tanto a nivel de ecosistemas

¹Sentencia T 445 de 2016. Asuntos Ambientales, Sectorial y Urbana. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (26 enero, 2022). Disponible en

https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/06/Diagnostico_de_la_informacion_ambiental_y_social_respecto_a_la_actividad_minera_y_la_extraccion.pdf

²Documento de alcance del proyecto de investigación Resumen Informativo. (Junio de 2017). Disponible en https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/06/Documento_de_alcance_de_la_Investigacion-Resumen_informativo.pdf

³Documento técnico de Investigación científica y sociológica respecto a los impactos de la actividad minera y la explotación ilícita de minerales, en los ecosistemas del territorio colombiano. (Octubre, 2019). Disponible en <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/06/Investigacion-cientifica-y-sociologica-respecto-a-los-impactos-de-la-actividad-minera-y-la-explotacion-ilicita-de-minerales.pdf>

como de las unidades geográficas de cuencas” (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible et al., 2018, p. 131).

En relación con impactos sobre la biota acuática:

“Los impactos ambientales más representativos sobre el recurso hídrico se relacionan con la contaminación química, el aumento de sedimentos, el incremento de turbidez, la disminución de caudales y la alteración del curso (López-Sánchez & Medina, 2017)

La transformación de las fuentes de agua puede darse por dos vías la primera de ellas es la generación de volúmenes de drenajes que pueden ser ácidos, neutros o fuertemente básicos (INAP, 2011). Incluso pueden ser radioactivos, corrosivos y/o tóxicos (Nordstrom, Blowes, & Ptacek, 2015). El principal problema de los drenajes de mina es la alta concentración de metales que pueden alcanzar cientos de mg por litro. Estos metales, en algunos casos pesados, pueden tener un impacto negativo sobre la salud humana, si sobrepasan los niveles máximos permitidos, y sobre las plantas y los animales debido a la perturbación severa en sus procesos bioquímicos. Cuando los drenajes son vertidos en la superficie sin sus debidas acciones de control y manejo, destruyen la capa vegetal, erosionan el suelo y contaminan los cauces de los ríos eliminando los organismos bentónicos e interrumpiendo la cadena trófica (Johnson & Hallberg, 2005). Además, los valores bajos de pH incrementan la concentración de sólidos disueltos y suspendidos totales lo que puede también afectar las fuentes de agua subterránea (Alhamed & Wohnlich, 2014) (Tiwary, 2001)” (Ayala et al., 2019, p. 45).

En el mismo sentido, la contaminación del agua es uno de los impactos ambientales más graves asociados a las actividades mineras, especialmente en regiones donde la explotación de recursos naturales es intensa y a menudo desregulada:

“Una segunda vía de contaminación del agua por los procesos mineros es cuando se utiliza durante las operaciones o beneficios mineros. Esta agua al entrar en contacto con los minerales extraídos, los estériles o los relaves termina convirtiéndose en drenajes ácidos, aguas con altos contenidos de sales y en algunos casos como en los procesos del oro termina contaminada con mercurio y/o cianuro. Este problema se agrava por la presencia de minas abandonadas cerca de otras minas en explotación, ya que el agua las recorre fácilmente y luego al desembocar en cursos de aguas limpias la contaminación acaba diseminándose (Contraloría General de la República, 2014).

(...)

Para el caso específico de Colombia, el enfoque de estudio sobre los efectos de la minería aurífera en la biota acuática se ha centrado en el riesgo de la bioacumulación en la cadena trófica con un particular énfasis en aquellas interacciones que pueden afectar la salud humana. Por ejemplo, se destacan los estudios de Marrugo-Negrete et al. (2008), Marrugo-Negrete, Benítez, Olivero-Verbel, Lans, & Gutierrez (2010) y Olivero-Verbel, Caballero-Gallardo, & Turizo-Tapia (2015), en las ciénagas de Ayapel y otras zonas del Norte del país, donde las concentraciones de mercurio total en diferentes compartimientos del sistema directamente

relacionados con las especies pesqueras, se encuentra entre 3-4 veces mayores a las halladas en sistemas acuáticos naturales. Estos estudios también revelan que la distribución espacial y temporal de MeHg en los sistemas acuáticos se encuentra estrechamente relacionada con el pulso de inundación y la vegetación acuática, en particular especies flotantes como Eichhornia crassipes (buchón)” (Ayala et al., 2019, p. 91 y 96).

Conforme a lo expuesto, la minería aurífera en zonas tropicales tiene impactos complejos y variados sobre la biota acuática. Diversos estudios han analizado cómo la actividad minera afecta a las especies de peces, insectos acuáticos y otros organismos en estos ecosistemas. Sin embargo, estas respuestas pueden estar influenciadas por múltiples factores ambientales no siempre considerados, lo que complica la evaluación precisa de los efectos directos de la minería. Se señala al respecto:

“Sin embargo, un alto porcentaje de especies (70,5%) no responden a los cambios en las condiciones fisicoquímicas de las ciénagas, indicando un posible nivel alto de tolerancia de los peces a cambios en las condiciones ambientales (Lagarejo, 2015). No obstante, esta falta de respuesta de los peces a las nuevas condiciones fisicoquímicas de las ciénagas sometidas a minería aurífera podría tener otra interpretación. Por ejemplo, es posible que otras variables ambientales no cuantificadas y que se relacionan directamente con la ictiofauna y la biota acuática en general (e.g., alteración del tipo y composición del sustrato, pérdida de cobertura riparia), hayan sido impactadas por la actividad minera y, en consecuencia, afecten negativamente a las comunidades acuáticas.

Por otro lado, el estudio de Córdoba et al. (2016) sobre la ictiofauna en el río Purnio, cuenca del Magdalena, en localidades con explotación de oro y de extracción de material de arrastre para la construcción muestran que la riqueza de especies y los valores de índices de diversidad en áreas de minería no fueron diferentes en comparación con áreas de bosque y de manejo silvopastoril. Sin embargo, las zonas de minería presentan mayores valores de dominancia por especies tolerantes a condiciones de disturbio (Córdoba et al. 2016).

En otro estudio desarrollado por Villada-Bedoya et al. (2017), sobre la influencia de la actividad minera de oro a pequeña escala sobre la estructura comunitaria de insectos acuáticos, no presentan diferencias en la estructura de comunidades de insectos acuáticos en comparación con áreas sin afectación (Villada-Bedoya et al. 2017). La falta de respuesta por parte de los invertebrados a las actividades mineras podría sin embargo estar relacionado con que actividades de extracción de oro a pequeña escala presentan épocas de inactividad durante el año y no utilizan maquinaria pesada (Villada-Bedoya et al. 2017).

Otros impactos sobre la biota acuática asociados a la minería aurífera en zonas tropicales, se derivan de la fragmentación de hábitat lo cual interfiere con patrones de conectividad y el aporte excesivo de material fino sedimentario y alteración del hábitat generado por obras de dragado y lavado (Mol & Ouboter, 2004). El acrecimiento de material fino sedimentario interfiere con distintas dinámicas naturales de los sistemas fluviales y cenagosos como el aumento en los procesos de deriva de algunos macroinvertebrados bentónicos, la reducción en

la claridad del agua y su asociada productividad primaria, la reducción en la diversidad de peces y macroinvertebrados y cambios en los ciclos biogeoquímicos (Mol & Ouboter, 2004).

Es importante mencionar que, en buena parte de los trabajos consultados, el efecto ‘puro’ de la minería sobre la biota (i.e., aquel efecto originado únicamente por la actividad minera o su interacción con otras fuentes de disturbio) no fue detectado o cuantificado de forma explícita. Esto se debe a que los estudios se desarrollaron en áreas donde ya había intervención humana al momento de iniciar la extracción mineral o en localidades donde la minería se desarrolla en conjunto con actividades agropecuarias (ej. ganadería, agricultura, cultivos extensivos; Córdoba et al. 2016; Villada-Bedoya et al. 2017) que pueden también impactar negativamente a los organismos acuáticos (Blann, Anderson, Sands, & Vondracek, 2009)” (Ayala et al., 2019, p. 47).

Adicionalmente, la minería de oro en la cuenca Magdalena-Cauca ha provocado graves impactos ambientales, exacerbados por el uso de mercurio y cianuro en los procesos extractivos. No obstante, los estudios actuales no distinguen claramente entre los efectos de la minería legal e ilegal, lo que dificulta evaluar cuál de ellas es más perjudicial para los ecosistemas acuáticos. Al respecto se menciona:

Igualmente, los trabajos que evalúan los efectos de la extracción de oro sobre el hábitat y la biota no definen claramente el tipo de extracción (ilegal o legal) bajo estudio o no tienen por objetivo compararlos. Por lo tanto, consideramos que con base en la información disponible no es posible concluir con objetividad cuál tipo de minería causa efectos más adversos sobre el componente biótico de los sistemas acuáticos. Sin embargo, debido a los procesos de licenciamiento ambiental y la posterior fase de seguimiento por parte de las autoridades ambientales, se esperaría que los efectos de la minería legal fuesen menos pronunciados, pero resaltamos que esto debe ser explorado en futuros estudios

“La cuenca hidrográfica Magdalena-Cauca ha sufrido un fuerte impacto ambiental por el uso del mercurio y en algunos casos de cianuro durante el proceso de beneficio de oro. Asimismo, esta cuenca recibe los vertimientos del sur de Bolívar y el norte de Antioquia donde se localizan cerca de 12.000 explotaciones de oro que aportan al ambiente un promedio de 80 a 100 toneladas de mercurio al año (Olivero-Verbel & Johnson-Restrepo, 2014). Esta problemática está acabando con la ciénaga de La Redonda en el sur de Bolívar que utiliza maquinaria pesada para la extracción ilegal generando sedimentos que ya casi han colmatado la columna de agua” (Ayala et al., 2019, p. 95 y 96).

En relación con la disponibilidad de agua, el estudio señaló:

“Uno de los servicios ecosistémicos más importantes, en el marco de los catalogados como de “aprovisionamiento”, es la disponibilidad de recurso hídrico la cual no solo representa un servicio directo en sí mismo para el ser humano y en general para todos los seres vivos, sino que también provee beneficios indirectos a otros servicios ecosistémicos como la provisión de alimentos, la generación de energía, la recreación, entre muchos otros.

Las diferentes actividades mineras requieren el uso del recurso hídrico para sus operaciones, existiendo la posibilidad de generar una competencia con otras necesidades en sus áreas de influencia como pueden ser el consumo humano por parte de comunidades aledañas, actividades económicas (agrícolas, ganaderas, industriales, etc.) actividades recreativas o incluso la propia sustentabilidad de la biodiversidad asociada a este recurso natural.

También existe la posibilidad de que las actividades mineras restrinjan el uso del recurso hídrico para otras actividades en razón a la potencial alteración de sus condiciones de calidad, o también a la variación de la disponibilidad por efecto de desviaciones de cauces superficiales, o alteraciones de flujos subterráneos.

Si bien para evaluar de manera precisa cada una de estas potenciales alteraciones se requeriría revisar particularmente las operaciones mineras para establecer la magnitud según sus especificidades, para efectos del alcance de este proyecto, que intenta ofrecer una visión a nivel nacional sobre los impactos de la actividad minera en los ecosistemas del territorio colombiano, se utilizará la información secundaria disponible y evaluada en la fase de Diagnóstico de este documento, para buscar concluir, desde el alcance que puede ofrecer dicha información, la magnitud de estas afectaciones.

Dado que en el diagnóstico se abordaron algunos estudios de caso específicos frente a algunas operaciones de gran minería, en estas operaciones la evaluación de los impactos podrá tener un poco más de detalle, sin que esto alcance el nivel de un Estudio de Impacto Ambiental, ni que represente o sustituya evaluaciones específicas que puedan realizar autoridades ambientales o cualquier otro grupo técnico que cuente con mayor información a la obtenida para el Diagnóstico elaborado en este documento” (Ayala et al., 2019, p. 50 y 51).

AFECTACIONES AL SERVICIO ECOSISTÉMICO DE PROVISIÓN Y REGULACIÓN HÍDRICA POR DESARROLLO DE MINERÍA SUBTERRÁNEA

Sobre el uso del recurso hídrico por la actividad de extracción de minerales; el estudio mencionado respecto a los impactos señaló:

“Desde una perspectiva macro, es decir desde la visión nacional, el Estudio Nacional del Agua elaborado periódicamente por IDEAM, y cuya última versión finalizada es la del año 2014 nos ofrece una primera perspectiva sobre lo que la actividad minera representa en términos de uso del recurso hídrico. En dicho informe se concluye que la actividad minera representa el 1.8% del total de agua utilizada en el país (640 millones de m³); en contraste, la actividad agrícola hace uso del 46.6% del agua utilizada en el país, el sector de generación de energía el 21.5%, el sector pecuario el 8.5% y el uso doméstico el 8.3%

En un informe de avance de un nuevo Estudio Nacional del Agua (IDEAM, 2018), la actividad de extracción de minerales (clasificada como minería en el estudio) prácticamente mantiene su porcentaje de participación de uso del recurso hídrico (incremento del 4% respecto a la medición anterior); vale la pena resaltar de dicho informe que, tal como es esperable, la participación del uso del agua varíe dependiendo de la zona del país, siendo más representativo en algunos

departamentos; se resalta la relevancia que tiene la extracción de minerales en el uso del recurso hídrico en los departamentos del Chocó o Guainía, con una participación del orden del 48% y 30% respectivamente, o en los departamentos de Nariño, La Guajira y el Cesar, en donde la participación es superior al promedio con aproximadamente el 13%, 12% y 7% respectivamente.

Otro estudio realizado por el sector minero (UPME-UIS, 2014) estima el consumo de agua del sector extractivo de minerales en cerca de 2.600 millones de m³ para oro, y cerca de 25 millones de m³ para carbón; esto significaría que la participación del uso de agua respecto al consumo total de agua en el país podría llegar hasta un 5.8%, lo cual sigue siendo muy bajo comparado con las otras actividades económicas.

Respecto a las aguas subterráneas, el estudio de IDEAM no reporta consumos de agua por parte del sector minero, lo que parece indicar que los niveles de extracción son muy bajos y poco significativos como para incluirlos en el análisis realizado a nivel nacional.

En conclusión, a partir de esta información generada por el IDEAM y por la UPME, el sector de extracción de minerales no resulta ser, en general, un consumidor representativo del recurso hídrico y por ende no debería catalogarse como una actividad que ocasiona un impacto significativo sobre la disponibilidad de agua como servicio ecosistémico. Existen, sí, casos particulares, como el de los departamentos del Chocó y Guainía, en donde el uso del recurso es tan representativo o más que el del sector agrícola.” (Ayala et al., 2019, p. 51).

Asimismo, conviene presentar, como información disponible, la evaluación realizada por el Instituto Humboldt (en convenio con el MADS (209 de 2019)) sobre la integridad ecológica y la regulación hídrica en el macizo montañoso de Santurbán, en cumplimiento de la sentencia T-361/2017 de la Corte Constitucional. Aunque el propósito principal de esta evaluación era atender los "ineludibles" de la sentencia relacionados con la delimitación del páramo, también proporciona insumos valiosos para la delimitación de la reserva temporal de recursos naturales.

Esta evaluación permite identificar, con una resolución de 30 metros, los píxeles que presentan alta, media y baja regulación hídrica, así como alta, media y baja integridad ecológica. Esto resulta crucial para asegurar un mayor costo-beneficio en la argumentación de la delimitación de la reserva temporal de recursos naturales.

Por lo tanto, también ponemos a su disposición una serie limitada de casi 40 recursos de información espacial, junto con sus respectivos enlaces al GeoNetWork del Instituto Humboldt. Esta información puede resultar valiosa para la delimitación de la reserva temporal de recursos naturales.

ID_GEONETWORK	NOMBRE DEL RECURSO	URL DE ACCESO
1db22dd5-3081-4c06-b0f8-fcbd09071d2c	Áreas prioritarias para la conservación IAvH-NatMap	http://geonetwork.humboldt.org.co/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/1db22dd5-3081-4c06-b0f8-fcbd09071d2c
38bf87a1-9663-4a05-bb24-2c4e57a88397	Integridad forestal para Colombia	http://geonetwork.humboldt.org.co/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/38bf87a1-9663-4a05-bb24-2c4e57a88397
e1f04e91-0f4e-46a1-a990-b08e1bfade44	Integridad de bosques para Colombia Resolución 30 m año 2018	http://geonetwork.humboldt.org.co/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/e1f04e91-0f4e-46a1-a990-b08e1bfade44
f21ec6a3-d8ac-4d1b-aacf-c4030f60a924	Análisis de Vacíos en Biodiversidad Continental para Colombia, escala 1:100.000, año 2020	http://geonetwork.humboldt.org.co/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/f21ec6a3-d8ac-4d1b-aacf-c4030f60a924
1d6b06b6-8a57-4c87-97ef-e156cb40dc46	WePlan Forests - Colombia, resolución 500m, año 2021	http://geonetwork.humboldt.org.co/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/1d6b06b6-8a57-4c87-97ef-e156cb40dc46
63745d82-082c-485e-a442-7f1159195306	Estado de la Conservación de los Páramos en Colombia, escala 1:100.000, año 2020	http://geonetwork.humboldt.org.co/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/63745d82-082c-485e-a442-7f1159195306
5635ef41-994f-4867-b5b2-efb12b6c1b5d	Especies Endémicas, Áreas Protegidas y Deforestación en Colombia, año 2018	http://geonetwork.humboldt.org.co/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/5635ef41-994f-4867-b5b2-efb12b6c1b5d
cf7b6250-fa21-49ec-9513-71b9c8cc7bd3	Franja de transición bosque páramo Complejo de páramos Jurisdicciones Santurbán Berlín 2019, escala 1:25000	http://geonetwork.humboldt.org.co/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/cf7b6250-fa21-49ec-9513-71b9c8cc7bd3
b5371c0c-ca71-435e-8b37-f95107a75106	Índice de regulación hídrica Santurbán-Berlín, raster resolución: 30mts, año: 2019	http://geonetwork.humboldt.org.co/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/b5371c0c-ca71-435e-8b37-f95107a75106
3f37fa6b-5290-4399-9ea3-eaafcd0b2fbc	Índice de Huella Espacial Humana en Colombia, años 2015, 2018 y 2019	http://geonetwork.humboldt.org.co/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/3f37fa6b-5290-4399-9ea3-eaafcd0b2fbc

		ata/3f37fa6b-5290-4399-9ea3-eaafcd0b2fbe
4b345a9f-9bb6-4afb-8c7d-36b894077f2e	Propuesta de área de referencia y Franja de Transición Bosque Páramo (FTBP) - Complejo de páramos Jurisdicciones Santurbán Berlín, escala 1:25.000, año 2019	http://geonetwork.humboldt.org.co/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/4b345a9f-9bb6-4afb-8c7d-36b894077f2e
55d29ef5-e419-489f-a450-3299e4bcc4d4	Mapa de integridad del paisaje para Colombia 2023	http://geonetwork.humboldt.org.co/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/55d29ef5-e419-489f-a450-3299e4bcc4d4
0a1a6bdf-3231-4a77-8031-0dc3fa40f21b	BioModelos de 8753 especies presente y futuro para especies de diferentes grupos en Colombia, escala 1:100.000, año 2023	http://geonetwork.humboldt.org.co/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/55d29ef5-e419-489f-a450-3299e4bcc4d4
9013556a-6374-4ba6-b3af-b9d06954e0c1	Áreas de importancia y singularidad ecosistémica de Colombia 2021, 1:100.000	http://geonetwork.humboldt.org.co/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/9013556a-6374-4ba6-b3af-b9d06954e0c1
7d8f0aeb-8136-45a7-a469-f0016f618250	Índice de Huella Espacial Humana en Colombia 2022	http://geonetwork.humboldt.org.co/geonetwork/srv/spa/catalog.search#/metadata/7d8f0aeb-8136-45a7-a469-f0016f618250
c9a5d546-33b5-41d6-a60e-57cfae1cff82	Actualización de los límites cartográficos de los Complejos de Páramos de Colombia, escala 1:100.000	http://geonetwork.humboldt.org.co/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/c9a5d546-33b5-41d6-a60e-57cfae1cff82
38f3d2c5-8b4d-439e-a931-ca42e14da7ff	Base de datos de insumos cartográficos usados para la construcción del área de referencia de los de los 21 complejos de páramo priorizados por el Fondo Adaptación a escala 1:25.000, año 2017.	http://geonetwork.humboldt.org.co/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/38f3d2c5-8b4d-439e-a931-ca42e14da7ff
e3267c0a-6cce-43df-8ca4-510f490fdbd5	Capa registros biológicos, áreas de ocupación y extensión de presencia de 163 especies de plantas vasculares endémicas de los páramos y de la alta montaña en Colombia. 2018.	http://geonetwork.humboldt.org.co/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/e3267c0a-6cce-43df-8ca4-510f490fdbd5
da8eaf5c-9f5b-43da-bd89-4674dca3552d	Mapas multi-temporales (1970-1990-2000-2014-2040) de transformación de los Ecosistemas de Colombia a escala 1:100.000	http://geonetwork.humboldt.org.co/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/da8eaf5c-9f5b-43da-bd89-4674dca3552d

f2729fd5-9226-4c7f-8060-7a29eedb231b	Aportes a la delimitación del páramo mediante la identificación de los límites inferiores del ecosistema a escala 1:25.000 y análisis del sistema social asociado al territorio: Complejo de Páramos Jurisdicciones – Santurbán – Berlín Departamentos de Santander y Norte de Santander. Año 2014	http://geonetwork.humboldt.org.co/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/f2729fd5-9226-4c7f-8060-7a29eedb231b
5ac34a79-9014-4e59-abbd-55c6c26a1778	Geodatabase 14 Humedales dependientes de las aguas subterráneas y sus servicios ecosistémicos a escala 1:25000. Año 2015	http://geonetwork.humboldt.org.co/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/5ac34a79-9014-4e59-abbd-55c6c26a1778
91bb7a2d-2d23-44ef-ae1d-cbbe7574f1d0	Base de datos geográfica de los drenajes superficiales que nacen en páramo (escala 1:100.000) y municipios priorizados para posacuerdo y posconflicto (escala 1:25.000) - Año 2015.	http://geonetwork.humboldt.org.co/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/91bb7a2d-2d23-44ef-ae1d-cbbe7574f1d0
b87edf58-0ebf-476f-83dc-f61607116b9c	Número de especies amenazadas en las zonas hidrográficas de Colombia	http://geonetwork.humboldt.org.co/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/b87edf58-0ebf-476f-83dc-f61607116b9c
c604e34a-675d-451b-ac17-0aeeedc307cb	Límite superior de bosque para los 17 distritos de páramos, que contienen los 21 complejos de páramos priorizados. Resolución 90m, 2016.	http://geonetwork.humboldt.org.co/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/c604e34a-675d-451b-ac17-0aeeedc307cb
fb781283-c149-4c98-8dfd-96a51b2626ac	Número de especies por categoría de amenaza en las zonas hidrográficas de Colombia	http://geonetwork.humboldt.org.co/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/fb781283-c149-4c98-8dfd-96a51b2626ac
385f5623-ac81-42b6-a000-35dd6f6203eb	Inventario de Humedales Continentales e Insulares de Colombia, año 2015	http://geonetwork.humboldt.org.co/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/385f5623-ac81-42b6-a000-35dd6f6203eb
43885d08-8f04-4678-b651-40ac1eef1acc	Levantamiento semidetallado de suelos en las áreas de influencia de los páramos de Colombia Distrito de Páramos Santanderes, Escala 1:25.000, 2015.	http://geonetwork.humboldt.org.co/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/43885d08-8f04-4678-b651-40ac1eef1acc
511807e2-495c-41c8-b919-8c916dd65cab	Mosaico nacional territorio continental de Colombia imágenes de radar JERS 100m, 2015.	http://geonetwork.humboldt.org.co/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/511807e2-495c-41c8-b919-8c916dd65cab

64687eb4-59bb-4007-8456-d3a952d8b721	Mapa de frecuencias de inundación, desde 2007/07/23 hasta 2007/09/05, 50m y 100m, 2015.	http://geonetwork.humboldt.org.co/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/64687eb4-59bb-4007-8456-d3a952d8b721
18bc1b0b-2d96-4ca5-b7df-47f603824422	Mapa de inundación basado en imágenes de radar desde enero 2011 hasta abril 2011, a 25m, 2015.	http://geonetwork.humboldt.org.co/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/18bc1b0b-2d96-4ca5-b7df-47f603824422
159a6d7a-7c77-474f-b250-72f0bd8cbe3e	Mapa de inundación máxima nacional basado en imágenes de radar 50m y 100m, desde 2007/07/23 hasta 2007/09/05, 2015.	http://geonetwork.humboldt.org.co/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/159a6d7a-7c77-474f-b250-72f0bd8cbe3e
1c3cd131-0662-40bd-b4b3-353498d3ed52	Estructura Ecológica Urbana Municipio de Bucaramanga, año 2018, Resolución 5m.	http://geonetwork.humboldt.org.co/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/1c3cd131-0662-40bd-b4b3-353498d3ed52
2d8c2cb3-8cf8-4742-ae64-1de2c93717af	Mapa de Humedales por Gradiente Altitudinal. Colombia, año 2015.	http://geonetwork.humboldt.org.co/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/2d8c2cb3-8cf8-4742-ae64-1de2c93717af
96833c43-4ad2-4c04-a8fa-d0a635494b81	Aportes a la Conservación estratégica de los páramos de Colombia: Actualización de la cartografía de los complejos de páramos, escala 1:100.000, 2013.	http://geonetwork.humboldt.org.co/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/96833c43-4ad2-4c04-a8fa-d0a635494b81
09f1f048-80d2-482d-8164-3c09b385567a	Número de especies amenazadas en los ríos de Colombia	http://geonetwork.humboldt.org.co/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/09f1f048-80d2-482d-8164-3c09b385567a

Tabla 1. Recursos de información espacial disponibles desde el GeoNetWork Institucional.

Estudios globales de las afectaciones de la actividad minera en la biodiversidad y los servicios ecosistémicos.

Seki (2022) llevó a cabo una revisión sistemática sobre los impactos ambientales de la minería sobre la biodiversidad y los servicios ecosistémicos. En su análisis incorporó 2093 estudios. Los resultados muestran que *“el 99,8% informaba de algún tipo de impacto negativo de la minería sobre la biodiversidad y los servicios ecosistémicos. Sin embargo, mientras que el 95% informaba sobre los impactos directos, sólo el 5% lo hacía sobre los indirectos”*. Adicionalmente, respecto a la escala de la minería analizada en los distintos estudios, el análisis determinó que *“la mayoría de los estudios informaron sobre los impactos de la minería a gran escala (48,6%, n = 1017), y sólo unos pocos estudios informaron sobre la minería artesanal y a pequeña escala (5,5%, n = 116)”* (Seki, 2022).

Ofosu et al. (2020), en su revisión de literatura determinó que, si bien en términos socio económicos existe una complementariedad entre la actividad minera a pequeña escala y la agricultura, la primera, caracterizada por su alta informalidad, podría representar efectos nocivos en la agricultura por medio de 3 principales mecanismos: degradación del suelo e invasiones/plagas agrícolas, contaminación del agua por mercurio, y el fenómeno de la enfermedad holandesa: el desplazamiento de mano de obra del sector agrícola al sector de la minería de pequeña escala.

Respecto a la expresión de impactos sobre la biodiversidad, el análisis realizado por Seki (2022) señala que *“de todos los estudios, el 27,1%, n = 568, informaron sobre los impactos de la minería utilizando el término general “biodiversidad”, mientras que la mayoría de los estudios restantes informaron sobre plantas (27,2%, n = 570), peces (11. 0, n = 229), mamíferos (5,6%, n = 119), invertebrados terrestres (4,7%, n = 99), aves (4,0, n = 83), invertebrados bentónicos (3,7%, n = 78), macrófitos (3,2%, n = 66) y hongos (3,0%, n = 62). Pocos estudios informaron sobre microorganismos generales (2,5%, n = 52), fitoplancton (2,3%, n = 48), zooplancton (1,8%, n = 37), invertebrados acuáticos (1. 1%, n = 22), bivalvos (0,8%, n = 17), anfibios (0,8%, n = 16), reptiles (0,5%, n = 11), algas (0,4, n = 8), cangrejos (0,1%, n = 3) y erizos de mar (0,05%, n = 1)”* (Seki, 2022).

Seki (2022), categoriza los tipos de impactos identificados en dos: *“Impactos de sumidero”* que ocurren cuando materiales provenientes de la operación minera son agregados al ambiente, y los *“impactos de fuente”*, que ocurren cuando se extraen materias del ambiente para la operación. Entre los distintos impactos identificados, se pueden enumerar los siguientes:

Impactos de sumidero:

1. Contaminación agua superficial
2. Contaminación de suelos
3. Bioacumulación en flora y fauna acuática y terrestre
4. Contaminación por relaves en zonas de alta biodiversidad y conservación
5. Contaminación del aire

Impactos de fuente:

1. Afectación en la cobertura vegetal
2. Afectación en el uso del suelo
3. Afectación en hábitats silvestres
4. Afectación en especies amenazadas y endémicas
5. Afectación en áreas protegidas

En línea con lo planteado por Seki (2022), Sonter et al. (2018) ya señalaban las distintas escalas en las que se expresan los impactos sobre la biodiversidad asociados a la actividad minera. La mayoría de las investigaciones se han abordado desde una escala de sitio, resaltando los efectos asociados a la pérdida y degradación del hábitat. Sin embargo, los impactos sobre la biodiversidad pueden operar a través de paisajes y regiones, la mayoría de estos, de acuerdo a los estudios revisados, se asocian a la contaminación por distintas fuentes de la operación minera (Sonter et al., 2018).

Particularmente, señalan el impacto acumulativo que se puede expresar cuando interactúa el efecto de múltiples minas en comparación del efecto individual de una sola.

Respecto a los impactos sobre los servicios ecosistémicos, la revisión de literatura hecha por Seki (2022) determinó que muy pocos estudios abordaban el tema, y además su diseño no fue enfocado con tal fin. De manera muy general, los estudios revisados reportaron sobre la calidad del suelo y el agua, la calidad del aire, el ciclado de nutrientes y oferta de hábitat, secuestro de carbono, entre otros. Sin embargo, Boldy et al. (2021) observaron una amplia variación en la conceptualización de cada uno de los servicios ecosistémicos evaluados, generando así, dificultades para la correcta interpretación de los posibles impactos de la minería sobre la oferta de servicios ecosistémicos.

De cualquier forma, aun cuando los estudios citados han evaluado un número sorprendente de investigaciones a nivel global, la conclusión en la que concuerdan, es la necesidad de enfocar esfuerzos en el desarrollo de investigaciones que permitan generar conclusiones apropiadas sobre el efecto de la minería en la biodiversidad, haciendo énfasis en los distintos tipos de minería ya sea desde su escala (pequeña, mediana, grande) así como de las particularidades de los distintos minerales que se extraen.

AFECTACIONES A LA RED TRÓFICA ASOCIADO A ELEMENTOS POTENCIALMENTE PELIGROSOS DEL AGUA (mercurio, cianuro, arsénico, entre otros)

La contaminación de los sistemas acuáticos con arsénico (As) se considera un problema ambiental de importancia internacional, pues en estos ecosistemas puede ingresar a la red trófica y causar impactos nocivos en organismos vivos, sin embargo, dado que factores como el pH, el potencial redox, los óxidos de hierro/manganeso y la presencia de ciertas bacterias y algas controlan el ciclo biogeoquímico del As y su especiación; su biotransformación en el agua aún no se comprende totalmente (Mahroz, et al, 2021). En general, las concentraciones más altas de este metal están asociadas con las regiones mineras, especialmente donde se practica la minería de oro artesanal y en pequeña escala (Calao-Ramos, 2023).

Actualmente, en la literatura no se dispone de datos de monitoreo a largo plazo de As en ecosistemas contaminados, además su relación con las actividades antrópicas en zonas mineras suele ser difícil de caracterizar, a razón de las altas concentraciones encontradas en las matrices ambientales pueden ser producto de su distribución natural (Alonso, et al, 2020). En general, los procesos biológicos y la geoquímica tienen una gran influencia en el comportamiento del As en ambientes cercanos a la superficie, de baja temperatura y subterráneos (Islam et al., 2013). Por otra parte, la concentración de As en diferentes cuerpos de agua puede variar debido a diferencias en la fuente de contaminación y de las formas geoquímicas, incluso la movilidad de As en el agua subterránea puede regularse mediante reacciones de interfaz agua-roca (Smedley, 2008; Khalid et al., 2017).

Alonso y otros (2020), realizaron un estudio con el objetivo de evaluar el efecto del distrito minero de oro Vetás-California sobre la distribución de As en sedimentos de arroyos y muestras de agua superficial del río Surata, ubicado en la zona suroeste del páramo de Santurban, Colombia. Para ello,

se seleccionaron muestras distribuidas a lo largo de la cuenca alta del río Suratá, tanto en zonas cercanas como alejadas de zonas mineras. Las muestras fueron caracterizadas químicamente y en tal sentido la movilidad, el enriquecimiento y las fuentes de As fueron evaluadas mediante extracciones únicas y secuenciales.

Los resultados destacan un alto contenido de As (que alcanza hasta 484 mg/kg) en los sedimentos de la corriente muestreados cerca del distrito minero de oro. Tanto para el sedimento como para el agua el contenido relativo de As a lo largo del río Suratá excedió el contenido de fondo en 220 y 64,9 veces, respectivamente. De las extracciones de una sola etapa, las fracciones reducibles encontradas en As (NaOH) y As (HCl) fueron mayores en todos los casos, lo que significa un alto nivel de movilidad y lixiviación del contenido de As en las muestras de agua por cambios de pH y potenciales redox. El cálculo del factor de enriquecimiento (EF) confirma cifras altas alrededor de sitios hoy activos de explotación de oro como los municipios de Vetas, California y Matanza con valores de EF de 285, 204 y 133, respectivamente.

La caracterización química de los sedimentos de arroyos recolectados a lo largo de la cuenca alta del río Suratá, indicó que las concentraciones de As encontradas en el área de estudio cercanas a zonas mineras exceden los estándares regulatorios internacionales y la contaminación es mucho más grave allí que en otras zonas alejadas del distrito minero de Vetas-California.

Los resultados obtenidos para las extracciones secuenciales y de una sola etapa mostraron que, si bien la mayor parte del As se encuentra inmovilizado, se encontró una considerable concentración de este en la fase reducible, principalmente en las zonas afectadas por la actividad minera, lo que significa un riesgo importante de transferencia de As hacia las aguas superficiales del río Suratá.

Dado el corto número de muestras de este estudio, Alonso y otros (2020) afirman que sus resultados resaltan la necesidad de realizar investigaciones más exhaustivas en esta zona debido a la debilidad del control ambiental de las actividades mineras. Lo anterior, sumado a que en el caso del As su comportamiento en fuentes contaminadas es altamente dependiente de las condiciones biológicas, geoquímicas y de temperatura del lugar, conduce a que el control de las afectaciones ambientales generados por la minería subterránea de metálicos depende de mayores análisis in situ y principalmente de una actividad extractiva vigilada y controlada.

En el caso del Mercurio (Hg), este metal es considerado uno de los 10 elementos químicos de mayor preocupación a nivel mundial (Wang et al., 2020). Debido a su transformación de estado elemental a orgánico es una sustancia altamente tóxica cuando se libera a la atmósfera y en la cadena trófica de los seres vivos (Zaferani & Biester, 2021), causando impactos en los organismos cuando entran en contacto con cantidades tan bajas como 0,05 µg/g (Zulkipli et al., 2021). Entre los problemas que genera la contaminación por Hg en el agua se encuentra su acumulación en los peces, provocando graves daños en sus tejidos al convertirse en metilmercurio (Ghezzi et al., 2022). La contaminación por Hg puede llegar a los ecosistemas a través de las lluvias y las malas prácticas mineras que provocan erosión y filtraciones. La contaminación por Hg puede contribuir a la desaparición de especies endémicas y alteración de los ecosistemas (Ebadian, 2001).

La minería artesanal de oro es una actividad económica muy extendida en el Páramo de Santurbán. Por ejemplo, en la comunidad de Vetas, la minería artesanal contribuye directa o indirectamente al 80% de la economía, representando así la fuente más importante de ingresos y desarrollo económico y social (Quintero et al, 2021). Sin embargo, en esta zona se sigue utilizando mercurio para el proceso de amalgamación del oro, especialmente en California y Suratá.

Un estudio realizado por Ortega y García (2024) efectuó mediciones de mercurio en el suelo y el aire en diferentes áreas de recolección, producción y disposición de la actividad minera. Esta investigación tenía como objetivo analizar los diferentes impactos y riesgos ambientales asociados al uso de mercurio en la minería de oro artesanal. Para ello, se caracterizaron y evaluaron los procesos mineros y su área de influencia, y se midieron las concentraciones de mercurio en el suelo y el aire en las zonas mineras consideradas en el estudio.

Se realizaron 19 mediciones en relaves de cuatro zonas. En la primera zona, el material había sido empacado en sacos y se había utilizado mercurio para la extracción de oro. Allí se encontró una concentración de 226 g/t de mercurio. En la misma zona, en una mina en California, los resultados fueron de 17 g/t en los sedimentos. La segunda zona correspondió a una planta procesadora, donde se halló una concentración máxima de 220 g/t de mercurio. En la zona 3 se alcanzó una concentración máxima de 160 g/t, pero al estar ubicada en un suelo residencial, el límite permitido es de 11 g/t de mercurio. Finalmente, en la mina Tronadora se encontraron mediciones entre 38-56 g/t y concentraciones en el aire de 3,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, por encima de los niveles permitidos en la Resolución 2254 de 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. En los relaves estudiados en California hubo una alta presencia de mercurio inorgánico tanto en el aire como en el suelo, nuevamente superando los valores permitidos.

Finalmente, se evaluaron los impactos y riesgos ambientales causados por las actividades mineras en el Páramo de Santurbán. Los resultados mostraron un nivel medio de impactos relacionados con el hábitat de especies endémicas y un alto nivel en la alteración de los recursos naturales directamente relacionados con la minería, lo que desencadena problemas en la cobertura vegetal y la alteración del ecosistema de organismos acuáticos y terrestres. Según los resultados de este estudio, la presencia de mercurio en las muestras analizadas se identificó en áreas donde la actividad extractiva se lleva a cabo principalmente a escala artesanal.

En cuanto al cianuro y otros contaminantes, no se identificó literatura sobre estudios realizados en Santurbán asociados a la actividad minera. De acuerdo con la información disponible, las afectaciones generadas por la minería subterránea de metálicos en la zona se refieren principalmente a la minería artesanal y a pequeña escala.

Bibliografía

Alhamed, M., & Wohnlich, S. (2014). Environmental impact of the abandoned coal mines on the surface water and the groundwater quality in the south of Bochum, Germany. *Environmental Earth Sciences*, 72(9), 3251–3267.

Alonso, David L., Pérez, Rodrigo, Okio, Coco K.Y.A y Castillo, Eliena, 2020. Assessment of mining activity on arsenic contamination in surface water and sediments in southwestern area of Santurbán paramo, Colombia, *Journal of Environmental Management*, 264, 110478.

Betancur-Corredor et al 2018. Gold mining as a potential driver of development in Colombia: Challenges and opportunities. *Journal of Cleaner Production* 199 (2018) 538e553

Blann, K., Anderson, J., Sands, G., & Vondracek, B. (2009). Effects of agricultural drainage on aquatic ecosystems: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 39., 909-1001.

Boldy, R., Talitha Santini, Mark Annandale, Peter D. Erskine, Laura J. Sonter, 2021. Understanding the impacts of mining on ecosystem services through a systematic review. *The Extractive Industries and Society*, Volume 8, Issue 1, Pages 457-466, ISSN 2214-790X, <https://doi.org/10.1016/j.exis.2020.12.005>.

Calao-Ramos, Clelia R., Marrugo N., Jose L. y Urango C., Iván, 2023. Genotoxicity and mutagenicity in blood and drinking water induced by arsenic in an impacted gold mining region in Colombia, *Environmental Research*, 233, 116229.

Contraloría General de la República. (2014). *Minería en Colombia Institucionalidad y territorio, paradojas y conflictos*. Bogotá D.C., Colombia.: Contraloría General De La República.

Contraloría General de la República. (2014). *Minería en Colombia: daños ecológicos y socioeconómicos y consideraciones sobre un modelo minero alternativo*. Contraloría General de la República.

Córdoba, D., Vásquez, D., Arboleda, S., Hernández, C., & Giraldo, A. (2016). Fish diversity in lotic and lentic systems associated to a dry forest biome in Victoria, Caldas. *Revista de Ciencias*, 20(2):61-78.

Ebadian, M. A. (2001). *Mercury contaminated material decontamination methods: Investigation and assessment*. Florida: Florida International University.

Ghezzi, L., Arrighi, S., Gianecchini, R., Bini, M., Valerio, M., & Petrini, R. (2022). The legacy of mercury contamination from a past leather manufacturer and health risk assessment in an urban area Pisa municipality, Italy. *Sustainability*, 14(7), 4367. <https://doi.org/10.3390/su14074367>

IDEAM. (2018). Décimo Tercer (13) Boletín de Alertas Tempranas de Deforestación (A-D), Cuarto Semestre 2017. Sistema de Monitoreo de Bosque y Carbono. Bogotá: IDEAM.

INAP, I. (Febrero de 2011). What is Acid Drainage? Obtenido de http://www.inap.com.au/what_is_acid_drainage.htm

Islam, A., Maity, J.P., Bundschuh, J., Chen, C.-Y., Bhowmik, B.K., Tazaki, K., 2013. Arsenic mineral dissolution and possible mobilization in mineral–microbe–groundwater environment. *J. Hazard. Mater.* 262, 989–996.

Johnson, D., & Hallberg, K. (2005). Acid mine drainage remediation options: a review. *Science of the Total Environment*, 338(1–2), 3–14. Obtenido de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969704006199>

Khalid, S., Shahid, M., Niazi, N.K., Rafiq, M., Bakhat, H.F., Imran, M., Abbas, T., Bibi, I., Dumat, C., 2017. Arsenic Behaviour in Soil-Plant System: Biogeochemical Reactions and Chemical Speciation Influences. In: Anjum, N.A., Gill, S.S., Tuteja, N. (Eds.), *Enhancing Cleanup of Environmental Pollutants*, Volume 2. Springer International Publishing, Cham, pp. 97–140.

Lagarejo, M. (2015). Análisis de los impactos ecológicos generados por la actividad minera sobre los ensamblajes ícticos en complejos cenagosos de sanceno y puné en la cuenca media del Atrato. Manizales, Colombia: Universidad de Manizales.

López-Sánchez, L., López-Sánchez, M., & Medina, G. (2017). La prevención y mitigación de los riesgos de los pasivos ambientales mineros (PAM) en Colombia: una propuesta metodológica. *Entramado*, Vol. 13 No. 1 (78-91). Obtenido de <https://doi.org/10.18041/entramado.2017v13n1.25138>

Mahroz H., Muhammad, Wang, Jianxu, Bibi, Irshad, Shahid, Muhammad, Khan N., Nabeel, Iqbal, Jibran, Ahmad M., Ishaq, Shaheen, Sabry M., Bashir, Safdar, Shah, Noor S., Hina, Kiran y Rinklebe, Jorg, 2021. Arsenic speciation and biotransformation pathways in the aquatic ecosystem: The significance of algae, *Journal of Hazardous materials*, 403, 124027.

Mol, J. H., & Ouboter, P. E. (2004). Downstream Effects of Erosion from Small-Scale Gold Mining on the Instream Habitat and Fish Community of a Small Neotropical Rainforest Stream. *Conservation Biology*, 18(1), 201-214.

Nordstrom, D., Blowes, D., & Ptacek, C. (2015). Hydrogeochemistry and microbiology of mine drainage: An update. *Applied Geochemistry*, Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2015.02.008>

Rojas C. M. y Montes C., 2024 El uso del mercurio en la minería artesanal del oro en Colombia. Universidad Externado de Colombia, 2016. Obtenido de <https://bdigital.uexternado.edu.co/server/api/core/bitstreams/f26075d0-bcb9-472b-856a-0c9ca7ad61a1/content>

Ofosu, G, Andreas Dittmann, David Sarpong, David Botchie. 2020. Socio-economic and environmental implications of Artisanal and Small-scale Mining (ASM) on agriculture and livelihoods. *Environmental Science & Policy*, Volume 106, Pages 210-220, ISSN 1462-9011, <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.02.005>.

Olivero-Verbel, J., & Johnson-Restrepo, B. (2014). *El Lado gris de la minería*. Cartagena, Colombia.: Editorial Universidad de Cartagena.

Ortega R., Angie T. y García M. Daniela, 2024. Environment risk and impact assessment of the use of mercury for gold mining in the Santurban Paramo area, Colombia, *International Journal of Sustainable Energy and Environmental Research*, Vol. 13, No.1, pp. 36-51.

Palacios-Torres Y. et al. 2018. Mercury pollution by gold mining in a global biodiversity hotspot, the Choco biogeographic region. *Chemosphere* 193 (2018) 421e430. Colombia.

Minenergía (2023). Plan de Acción Nacional sobre Mercurio en la Minería Artesanal y de Pequeña Escala. <https://www.minenergia.gov.co/documents/11527/PlanAccionNacional-MercurioMineriaArtesanal-Peque%C3%B1aEscala-2023.pdf>

Quintero, E. C., Ríos, W. G., Monroy, E. R., & Londoño, J. L. S. (2021). Sustainable gold mining: Implications of using waste as aggregate for concrete. *INVENTUM*, 16(31), 71-77. <https://doi.org/10.26620/uniminuto.inventum.16.31.2021.71-77>

Seki, Hamidu (2022) Environmental impacts of mining on biodiversity and ecosystem services. PhD thesis, University of York. https://etheses.whiterose.ac.uk/32791/1/Seki_205037423_Thesis_2022.pdf

Smedley, P.L., 2008. Sources and Distribution of Arsenic in Groundwater and Aquifers. In: Appelo, T. (Ed.), *Arsenic in Groundwater: A World Problem*, International Association of Hydrogeologists. Publication, Utrecht, the Netherlands, pp. 4–32.

Sonter LJ, Ali SH, Watson JEM. 2018 Mining and biodiversity: key issues and research needs in conservation science. *Proc. R. Soc. B* 285: 20181926. <http://dx.doi.org/10.1098/rspb.2018.1926>

Tiwary, R. (2001). Environmental Impact of Coal Mining on water Regime and Its Management. *Water, Air, and Soil Pollution* (132), 185. Obtenido de <https://doi.org/10.1023/A:1012083519667>

UPME-UIS. (2014). Estimación de áreas intervenidas, consumo de agua, energía y costos de producción en la actividad minera. (D. d.–O. –UIS, Ed.) Obtenido de UPME: http://www.upme.gov.co/seccionmineria_sp/areas_intervenidas.pdf

Vallejo Toro et al 2016. Impact of terrestrial mining and intensive agriculture in pollution of estuarine surface sediments: Spatial distribution of trace metals in the Gulf of Urabá, Colombia. *Marine Pollution Bulletin* 111 (2016) 311–320

Villada-Bedoya et al 2017. Diversidad de insectos acuáticos en quebradas impactadas por agricultura y minería. *Revista Biología tropical*. Vol. 65 (4): 1635-1659, Caldas, Colombia

Villada-Bedoya, S., Triana-Moreno, L., & Díaz, L. (2017). Grupos funcionales alimentarios de insectos acuáticos en quebradas andinas afectadas por agricultura y minería: Functional feeding groups of aquatic insects in Andean streams affected by agriculture and mining. *Caldasia*, 39(2), 370-387.

Wang, L., Hou, D., Cao, Y., Ok, Y. S., Tack, F. M., Rinklebe, J., & O'Connor, D. (2020). Remediation of mercury contaminated soil, water, and air: A review of emerging materials and innovative technologies. *Environment International*, 134, 105281. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105281>

Zaferani, S., & Biester, H. (2021). Mercury accumulation in Marine sediments—a comparison of an upwelling area and two large river mouths. *Frontiers in Marine Science*, 8, 732720. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.732720>

Zulkipli, S. Z., Liew, H. J., Ando, M., Lim, L. S., Wang, M., Sung, Y. Y., & Mok, W. J. (2021). A review of mercury pathological effects on organs specific of fishes. *Environmental Pollutants and Bioavailability*, 33(1), 76-87. <https://doi.org/10.1080/26395940.2021.1920468>.

Cordialmente,

Director General

Elaboró: Germán Corzo, Margarita Roa, Gisele Didier.

Revisó: Ana Karina Perico. Adriana Camelo. Gisele Didier. Juan Castañeda.

Aprobó: Hernando García Martínez.